PUPUK ORGANIK DAN PUPUK HAYATI

ORGANIC FERTILIZER AND BIOFERTILIZER

Editor:
R.D.M. Simanungkalit, Didi Ardi Suriadikarta, Rasti Saraswati,
Diah Setyorini, dan Wiwik Hartatik

Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian
Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian
2006

Penanggungjawab:
Kepala Balai Besar Penelitian dan Pengembangan
Sumberdaya Lahan Pertanian

Wakil:
Kepala Balai Penelitian Tanah

Editor:
R.D.M. Simanungkalit
Didi Ardi Suriadikarta
Rasti Saraswati
Diah Setyorini
Wiwik Hartatik

Redaksi Pelaksana:
Herry Sastramihardja
Sri Erita Aprillani
Farida Manalu

Setting/*Lay Out*:
Didi Supardi

Penerbit:
Balai Besar Penelitian dan Pengembangan
Sumberdaya Lahan Pertanian
Jl. Ir. H. Juanda No.98 Bogor 16123
Jawa Barat
Telp. 0251-336757, Fax: 062-0251-321608
E_mail: soil_ri@indo.net

ISBN 978-979-9474-57-5

Penulisan dan pencetakan buku ini dibiayai DIPA TA 2006 Satker Balai Penelitian Tanah, Bogor
http//balittanah.litbang.deptan.go.id

KATA PENGANTAR

Pupuk organik sudah lama dikenal para petani, jauh sebelum Revolusi Hijau berlangsung di Indonesia pada tahun 1960-an. Sedangkan pupuk hayati dikenal para petani sejak proyek intensifikasi kedelai pada tahun 1980-an. Namun sejak Revolusi Hijau petani mulai banyak menggunakan pupuk buatan karena praktis penggunaannya dan sebagian besar varietas unggul memang membutuhkan hara makro (NPK) yang tinggi dan harus cepat tersedia. Bangkitnya kesadaran sebagian masyarakat akhir-akhir ini akan dampak penggunaan pupuk buatan terhadap lingkungan dan terjadinya penurunan kesuburan tanah mendorong dan mengharuskan penggunaan pupuk organik dan pupuk hayati.

Pupuk organik adalah nama kolektif untuk semua jenis bahan organik asal tanaman dan hewan yang dapat dirombak menjadi hara tersedia bagi tanaman. Sedangkan pupuk hayati merupakan inokulan berbahan aktif organisme hidup yang berfungsi untuk menambat hara tertentu atau memfasilitasi tersedianya hara dalam tanah bagi tanaman.

Buku ini memuat 13 bab topik bahasan mengenai pupuk organik dan pupuk hayati yang ditulis oleh para peneliti Balai Penelitian Tanah. Dengan diterbitkannya buku ini, diharapkan dapat bermanfaat bagi para pengguna sebagai salah satu acuan tentang perkembangan dan peranan pupuk organik dan pupuk hayati bagi pengembangan pertanian di Indonesia.

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Balai Penelitian Tanah dan semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyelesaian buku ini.

Balai Besar Penelitian dan Pengembangan
Sumberdaya Lahan Pertanian
Kepala,

Prof. Dr. Irsal Las, MS.
NIP. 080 037 663

DAFTAR ISI

Halaman

KATA PENGANTAR i

DAFTAR ISI iii

1. PENDAHULUAN
Didi Ardi Suriadikarta dan R.D.M. Simanungkalit 1

2. KOMPOS
Diah Setyorini, Rasti Saraswati, dan Ea Kosman Anwar 11

3. PUPUK HIJAU
Achmad Rachman, Ai Dariah, dan Djoko Santoso 41

4. PUPUK KANDANG
Wiwik Hartatik dan L.R. Widowati 59

5. PUPUK LIMBAH INDUSTRI
Ea Kosman Anwar dan Husein Suganda 83

6. BAKTERI PENAMBAT NITROGEN
R.D.M. Simanungkalit, Rasti Saraswati, Ratih Dewi Hastuti, dan Edi Husen 113

7. MIKROORGANISME PELARUT FOSFAT
Rohani Cinta Badia Ginting, Rasti Saraswati, dan Edi Husen 141

8. CENDAWAN MIKORIZA ARBUSKULER
R.D.M. Simanungkalit 159

9. RIZOBAKTERI PEMACU TUMBUH TANAMAN
Edi Husen, Rasti Saraswati, dan Ratih Dewi Hastuti 191

10. ORGANISME PEROMBAK BAHAN ORGANIK
Rasti Saraswati, Edi Santosa, dan Erny Yuniarti 211

11. BAKU MUTU PUPUK ORGANIK
Didi Ardi Suriadikarta dan Diah Setyorini 231

12. BAKU MUTU PUPUK HAYATI DAN SISTEM PENGAWASANNYA
R.D.M. Simanungkalit, Edi Husen, dan Rasti Saraswati 245

13. PROSPEK PUPUK ORGANIK DAN HAYATI
R.D.M. Simanungkalit 265

GLOSARIUM 273

LAMPIRAN 283

1. PENDAHULUAN

Didi Ardi Suriadikarta dan R.D.M. Simanungkalit

Summary

Introduction. This chapter includes some understanding on organic fertilizer and biofertilizer. Organic fertilizer is defined as fertilizer containing a large part or all of the materials which is of plant and or animal origin through decomposition. Organic matter is used to supply organic fertilizer to improve chemical, physical as well as biological characteristics of the soil. The most important characteristic of organic fertilizer is indicated by its content of organic carbon, rather than its nutrient composition. Low content of organic matter will be classified as a soil ameliorant. It consists of either synthetic or natural, either in the form of organic or mineral. Compost, green manure, animal manure, and plant residues such as rice straw, corn stover, sugarcane bagasse and coconut coir dust, agriculture-based industrial waste and municipal waste can be used as a source of organic fertilizer. Organic matter-decomposing microorganisms cover not only microfauna but also macrofauna such as soil worms. The application of organic fertilizer has been practiced in Indonesia since very long before Green Revolution. Biofertilizer is defined as inoculant containing active material of living microorganisms which functions to fix a particular nutrient and facilitate the availability of soil nutrients to plants. Facilitating the availability of nutrient can be carried out by increasing access to soil nutrients by arbuscular mycorrhizal fungi, phosphate solubilization by phosphate-solubilizing microorganisms, as well decomposition by fungi, actinomycetes or soil worms. Many research findings indicate that most agricultural lands have been degraded and their productivity has been decreasing. Organic fertilizers and biofertilizers can play a great role to improve the fertility of the soil.

Pupuk organik adalah nama kolektif untuk semua jenis bahan organik asal tanaman dan hewan yang dapat dirombak menjadi hara tersedia bagi tanaman. Dalam Permentan No.2/Pert/Hk.060/2/2006, tentang

pupuk organik dan pembenah tanah, dikemukakan bahwa pupuk organik adalah pupuk yang sebagian besar atau seluruhnya terdiri atas bahan organik yang berasal dari tanaman dan atau hewan yang telah melalui proses rekayasa, dapat berbentuk padat atau cair yang digunakan mensuplai bahan organik untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Definisi tersebut menunjukkan bahwa pupuk organik lebih ditujukan kepada kandungan C-organik atau bahan organik daripada kadar haranya; nilai C-organik itulah yang menjadi pembeda dengan pupuk anorganik. Bila C-organik rendah dan tidak masuk dalam ketentuan pupuk organik maka diklasifikasikan sebagai pembenah tanah organik. Pembenah tanah atau *soil ameliorant* menurut SK Mentan adalah bahan-bahan sintesis atau alami, organik atau mineral.

Sumber bahan organik dapat berupa kompos, pupuk hijau, pupuk kandang, sisa panen (jerami, brangkasan, tongkol jagung, bagas tebu, dan sabut kelapa), limbah ternak, limbah industri yang menggunakan bahan pertanian, dan limbah kota. Kompos merupakan produk pembusukan dari limbah tanaman dan hewan hasil perombakan oleh fungi, aktinomiset, dan cacing tanah. Pupuk hijau merupakan keseluruhan tanaman hijau maupun hanya bagian dari tanaman seperti sisa batang dan tunggul akar setelah bagian atas tanaman yang hijau digunakan sebagai pakan ternak. Sebagai contoh pupuk hijau ini adalah sisa–sisa tanaman, kacang-kacangan, dan tanaman paku air *Azolla.* Pupuk kandang merupakan kotoran ternak. Limbah ternak merupakan limbah dari rumah potong berupa tulang-tulang, darah, dan sebagainya. Limbah industri yang menggunakan bahan pertanian merupakan limbah berasal dari limbah pabrik gula, limbah pengolahan kelapa sawit, penggilingan padi, limbah bumbu masak, dan sebagainya. Limbah kota yang dapat menjadi kompos berupa sampah kota yang berasal dari tanaman, setelah dipisah dari bahan-bahan yang tidak dapat dirombak misalnya plastik, kertas, botol, dan kertas.

Istilah pupuk hayati digunakan sebagai nama kolektif untuk semua kelompok fungsional mikroba tanah yang dapat berfungsi sebagai penyedia hara dalam tanah, sehingga dapat tersedia bagi tanaman. Pemakaian istilah ini relatif baru dibandingkan dengan saat penggunaan salah satu jenis pupuk hayati komersial pertama di dunia yaitu inokulan *Rhizobium* yang sudah lebih dari 100 tahun yang lalu. Pupuk hayati dalam buku ini dapat didefinisikan sebagai inokulan berbahan aktif organisme hidup yang berfungsi untuk menambat hara tertentu atau memfasilitasi tersedianya hara dalam tanah bagi tanaman. Memfasilitasi tersedianya hara ini dapat berlangsung melalui peningkatan akses tanaman terhadap hara misalnya oleh cendawan mikoriza arbuskuler, pelarutan oleh mikroba pelarut fosfat, maupun perombakan oleh fungi, aktinomiset atau cacing tanah. Penyediaan hara ini berlangsung melalui hubungan simbiotis atau nonsimbiotis. Secara

simbiosis berlangsung dengan kelompok tanaman tertentu atau dengan kebanyakan tanaman, sedangkan nonsimbiotis berlangsung melalui penyerapan hara hasil pelarutan oleh kelompok mikroba pelarut fosfat, dan hasil perombakan bahan organik oleh kelompok organisme perombak. Kelompok mikroba simbiotis ini terutama meliputi bakteri bintil akar dan cendawan mikoriza. Penambatan N_2 secara simbiotis dengan tanaman kehutanan yang bukan legum oleh aktinomisetes genus *Frankia* di luar cakupan buku ini. Kelompok cendawan mikoriza yang tergolong ektomikoriza juga di luar cakupan baku ini, karena kelompok ini hanya bersimbiosis dengan berbagai tanaman kehutanan. Kelompok endomikoriza yang akan dicakup dalam buku ini juga hanya cendawan mikoriza vesikuler-abuskuler, yang banyak mengkolonisasi tanaman-tanaman pertanian.

Kelompok organisme perombak bahan organik tidak hanya mikrofauna tetapi ada juga makrofauna (cacing tanah). Pembuatan vermikompos melibatkan cacing tanah untuk merombak berbagai limbah seperti limbah pertanian, limbah dapur, limbah pasar, limbah ternak, dan limbah industri yang berbasis pertanian. Kelompok organisme perombak ini dikelompokkan sebagai bioaktivator perombak bahan organik.

Sejumlah bakteri penyedia hara yang hidup pada rhizosfir akar (rhizobakteri) disebut sebagai rhizobakteri pemacu tanaman (plant growth-promoting rhizobacteria=PGPR). Kelompok ini mempunyai peranan ganda di samping (1) menambat N_2, juga; (2) menghasilkan hormon tumbuh (seperti IAA, giberelin, sitokinin, etilen, dan lain-lain); (3) menekan penyakit tanaman asal tanah dengan memproduksi siderofor glukanase, kitinase, sianida; dan (4) melarutkan P dan hara lainnya (Cattelan *et al*., 1999; Glick *et al*., 1995; Kloepper, 1993; Kloepper *et al*., 1991). Sebenarnya tidak hanya kelompok ini yang memiliki peranan ganda (multifungsi) tetapi juga kelompok mikroba lain seperti cendawan mikoriza. Cendawan ini selain dapat meningkatkan serapan hara, juga dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit terbawa tanah, meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan, menstabilkan agregat tanah, dan sebagainya, tetapi berdasarkan hasil-hasil penelitian yang ada peranan sebagai penyedia hara lebih menonjol daripada peranan-peranan lain. Pertanyaan yang mungkin timbul ialah apakah multifungsi suatu mikroba tertentu apabila digunakan sebagai inokulan dapat terjadi secara bersamaan, sehingga tanaman yang diinokulasi dapat memperoleh manfaat multifungsi mikroba tersebut. Kebanyakan kesimpulan tersebut berasal dari penelitian-penelitian terpisah, misalnya pengaruh terhadap serapan hara pada suatu percobaan, dan pengaruh terhadap toleransi kekeringan pada percobaan lain. Mungkin sekali fungsi-fungsi tersebut hanya dimiliki spesies tertentu pada suatu kelompok fungsional tertentu, atau mungkin juga fungsi-fungsi ini hanya

dimiliki oleh strain atau strain-strain tertentu dalam suatu spesies, atau kondisi lingkungan dimana tanaman tersebut tumbuh.

Subha Rao (1982) menganggap sebenarnya pemakaian inokulan mikroba lebih tepat dari istilah pupuk hayati. Ia sendiri mendefinisikan pupuk hayati sebagai preparasi yang mengandung sel-sel dari strain-strain efektif mikroba penambat nitrogen, pelarut fosfat atau selulolitik yang digunakan pada biji, tanah atau tempat pengomposan dengan tujuan meningkatkan jumlah mikroba tersebut dan mempercepat proses mikrobial tertentu untuk menambah banyak ketersediaan hara dalam bentuk tersedia yang dapat diasimilasi tanaman.

FNCA Biofertilizer Project Group (2006) mengusulkan definisi pupuk hayati sebagai substans yang mengandung mikroorganisme hidup yang mengkolonisasi rizosfir atau bagian dalam tanaman dan memacu pertumbuhan dengan jalan meningkatkan pasokan ketersediaan hara primer dan/atau stimulus pertumbuhan tanaman target, bila dipakai pada benih, permukaan tanaman, atau tanah. Pengertian pupuk hayati pada buku ini lebih luas daripada istilah yang dikemukakan oleh Subha Rao (1982) dan FNCA Biofertilizer Project Group (2006). Mereka hanya membatasi istilah pupuk hayati pada mikroba, sedangkan istilah yang dipakai pada buku ini selain melibatkan mikroba juga makrofauna seperti cacing tanah. Bila inokulan hanya mengandung pupuk hayati mikroba, inokulan tersebut dapat juga disebut pupuk mikroba (microbial fertilizer)

Mikroorganisme dalam pupuk mikroba yang digunakan dalam bentuk inokulan dapat mengandung hanya satu strain tertentu atau monostrain tetapi dapat pula mengandung lebih dari satu strain atau multistrain. Strain-strain pada inokulan multistrain dapat berasal dari satu kelompok inokulasi silang (cross-inoculation) atau lebih. Pada mulanya hanya dikenal inokulan yang hanya mengandung satu kelompok fungsional mikroba (pupuk hayati tunggal), tetapi perkembangan teknologi inokulan telah memungkinkan memproduksi inokulan yang mengandung lebih dari satu kelompok fungsional mikroba. Inokulan-inokulan komersial saat ini mengandung lebih dari suatu spesies atau lebih dari satu kelompok fungsional mikroba. Karena itu Simanungkalit dan Saraswati (1993) memperkenalkan istilah pupuk hayati majemuk untuk pertama kali bagi pupuk hayati yang mengandung lebih dari satu kelompok fungsional.

Sejarah perkembangan pupuk organik dan hayati

Sejarah penggunaan pupuk pada dasarnya merupakan bagian daripada sejarah pertanian itu sendiri. Penggunaan pupuk diperkirakan sudah mulai pada permulaan dari manusia mengenal bercocok tanam >5.000 tahun yang lalu. Bentuk primitif dari pemupukan untuk memperbaiki kesuburan

tanah terdapat pada kebudayaan tua manusia di negeri-negeri yang terletak di daerah aliran sungai-sungai Nil, Euphrat, Indus, di Cina, Amerika Latin, dan sebagainya (Honcamp, 1931). Lahan-lahan pertanian yang terletak di sekitar aliran-aliran sungai tersebut sangat subur karena menerima endapan lumpur yang kaya hara melalui banjir yang terjadi setiap tahun.

Di Indonesia sebenarnya pupuk organik itu sudah lama dikenal para petani. Mereka bahkan hanya mengenal pupuk organik sebelum Revolusi Hijau turut melanda pertanian di Indonesia. Setelah Revolusi Hijau kebanyakan petani lebih suka menggunakan pupuk buatan karena praktis menggunakannya, jumlahnya jauh lebih sedikit dari pupuk organik, harganyapun relatif murah karena di subsidi, dan mudah diperoleh. Kebanyakan petani sudah sangat tergantung kepada pupuk buatan, sehingga dapat berdampak negatif terhadap perkembangan produksi pertanian, ketika terjadi kelangkaan pupuk dan harga pupuk naik karena subsidi pupuk dicabut.

Tumbuhnya kesadaran akan dampak negatif penggunaan pupuk buatan dan sarana pertanian modern lainnya terhadap lingkungan pada sebagian kecil petani telah membuat mereka beralih dari pertanian konvensional ke pertanian organik. Pertanian jenis ini mengandalkan kebutuhan hara melalui pupuk organik dan masukan-masukan alami lainnya.

Penggunaan pupuk hayati untuk membantu tanaman memperbaiki nutrisinya sudah lama dikenal. Pupuk hayati pertama yang dikomersialkan adalah rhizobia, yang oleh dua orang ilmuwan Jerman, F. Nobbe dan L. Hiltner, proses menginokulasi benih dengan biakan nutrisinya dipatenkan. Inokulan ini dipasarkan dengan nama Nitragin, yang sudah sejak lama diproduksi di Amerika Serikat.

Pada tahun 1930-an dan 1940-an berjuta-juta ha lahan di Uni Sovyet yang ditanami dengan berbagai tanaman diinokulasi dengan *Azotobacter*. Bakteri ini diformulasikan dengan berbagai cara dan disebut sebagai pupuk bakteri Azotobakterin. Pupuk bakteri lain yang juga telah digunakan secara luas di Eropa Timur adalah fosfobakterin yang mengandung bakteri *Bacillus megaterium* (Macdonald, 1989). Bakteri ini diduga menyediakan fosfat yang terlarut dari pool tanah ke tanaman. Tetapi penggunaan kedua pupuk ini kemudian terhenti. Baru setelah terjadinya kelangkaan energi di dunia karena krisis energi pada tahun 1970-an dunia memberi perhatian terhadap penggunaan pupuk hayati. Pada waktu pertama kali perhatian lebih dipusatkan pada pemanfaatan rhizobia, karena memang tersedianya nitrogen yang banyak di atmosfer dan juga pengetahuan tentang bakteri penambat nitrogen ini sudah banyak dan pengalaman menggunakan pupuk hayati penambat nitrogen sudah lama.

Di Indonesia sendiri pembuatan inokulan rhizobia dalam bentuk biakan murni rhizobia pada agar miring telah mulai sejak tahun 1938 (Toxopeus, 1938), tapi hanya untuk keperluan penelitian. Sedangkan dalam skala komersial pembuatan inokulan rhizobia mulai di Laboratorium Mikrobiologi, Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta sejak tahun 1981 untuk memenuhi keperluan petani transmigran (Jutono, 1982). Pada waktu itu inokulan diberikan kepada petani sebagai salah satu komponen dalam paket yang diberikan dalam proyek intensifikasi kedelai. Penyediaan inokulan dalam proyek ini berdasarkan pesanan pemerintah kepada produsen inokulan, yang tadinya hanya satu produsen saja menjadi tiga produsen. Inokulan tidak tersedia di pasar bebas, tetapi hanya berdasarkan pesanan. Karena persaingan yang tidak sehat dalam memenuhi pesanan pemerintah ini, dan baru berproduksi kalau ada proyek, mengakibatkan ada produsen inokulan yang terpaksa menghentikan produksi inokulannya, pada hal mutu inokulannya sangat baik. Perkembangan penggunaan inokulan selanjutnya tidak menggembirakan. Baru setelah dicabutnya subsidi pupuk dan tumbuhnya kesadaran terhadap dampak lingkungan yang dapat disebabkan pupuk buatan, membangkitkan kembali perhatian terhadap penggunaan pupuk hayati.

Peranan pupuk organik dan pupuk hayati dalam keberlanjutan produksi dan kelestarian lingkungan

Berbagai hasil penelitian mengindikasikan bahwa sebagian besar lahan pertanian intensif menurun produktivitasnya dan telah mengalami degradasi lahan, terutama terkait dengan sangat rendahnya kandungan C-organik dalam tanah, yaitu <2%, bahkan pada banyak lahan sawah intensif di Jawa kandungannya <1%. Padahal untuk memperoleh produk-tivitas optimal dibutuhkan C-organik >2,5%. Di lain pihak, sebagai negara tropika basah yang memiliki sumber bahan organik sangat melimpah, tetapi belum dimanfaatkan secara optimal.

Bahan/pupuk organik sangat bermanfaat bagi peningkatan produksi pertanian baik kualitas maupun kuantitas, mengurangi pencemaran lingkungan, dan meningkatkan kualitas lahan secara berkelanjutan. Penggunaan pupuk organik dalam jangka panjang dapat meningkatkan produktivitas lahan dan dapat mencegah degradasi lahan. Sumber bahan untuk pupuk organik sangat beranekaragam, dengan karakteristik fisik dan kandungan kimia/hara yang sangat beragam sehingga pengaruh dari penggunaan pupuk organik terhadap lahan dan tanaman dapat bervariasi.

Pupuk organik atau bahan organik tanah merupakan sumber nitrogen tanah yang utama, selain itu peranannya cukup besar terhadap perbaikan sifat fisika, kimia biologi tanah serta lingkungan. Pupuk organik

yang ditambahkan ke dalam tanah akan mengalami beberapa kali fase perombakan oleh mikroorganisme tanah untuk menjadi humus atau bahan organik tanah.

Bahan dasar pupuk organik yang berasal dari sisa tanaman umumnya sedikit mengandung bahan berbahaya. Namun penggunaan pupuk kandang, limbah industri dan limbah kota sebagai bahan dasar kompos/pupuk organik cukup mengkhawatirkan karena banyak mengandung bahan berbahaya seperti misalnya logam berat dan asam-asam organik yang dapat mencemari lingkungan. Selama proses pengomposan, beberapa bahan berbahaya ini justru terkonsentrasi dalam produk akhir pupuk. Untuk itu diperlukan seleksi bahan dasar kompos yang mengandung bahan-bahan berbahaya dan beracun (B3).

Bahan/pupuk organik dapat berperan sebagai “pengikat” butiran primer menjadi butir sekunder tanah dalam pembentukan agregat yang mantap. Keadaan ini besar pengaruhnya pada porositas, penyimpanan dan penyediaan air, aerasi tanah, dan suhu tanah. Bahan organik dengan C/N tinggi seperti jerami atau sekam lebih besar pengaruhnya pada perbaikan sifat-sifat fisik tanah dibanding dengan bahan organik yang terdekomposisi seperti kompos. Pupuk organik/bahan organik memiliki fungsi kimia yang penting seperti: (1) penyediaan hara makro (N, P, K, Ca, Mg, dan S) dan mikro seperti Zn, Cu, Mo, Co, B, Mn, dan Fe, meskipun jumlahnya relatif sedikit. Penggunaan bahan organik dapat mencegah kahat unsur mikro pada tanah marginal atau tanah yang telah diusahakan secara intensif dengan pemupukan yang kurang seimbang; (2) meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah; dan (3) dapat membentuk senyawa kompleks dengan ion logam yang meracuni tanaman seperti Al, Fe, dan Mn.

Pertanian konvensional yang telah dipraktekkan di Indonesia sejak Revolusi Hijau telah banyak mempengaruhi keberadaan berbagai mikroba berguna dalam tanah. Mikroba-mikroba ini mempunyai peranan penting dalam membantu tersedianya berbagai hara yang berguna bagi tanaman. Praktek inokulasi merupakan suatu cara untuk memberikan atau menambahkan berbagai mikroba pupuk hayati hasil skrining yang lebih unggul ke dalam tanah.

Bahan organik juga berperan sebagai sumber energi dan makanan mikroba tanah sehingga dapat meningkatkan aktivitas mikroba tersebut dalam penyediaan hara tanaman. Jadi penambahan bahan organik di samping sebagai sumber hara bagi tanaman, sekali gus sebagai sumber energi dan hara bagi mikroba

Penggunaan pupuk organik saja, tidak dapat meningkatkan produktivitas tanaman dan ketahanan pangan. Oleh karena itu sistem pengelolaan hara terpadu yang memadukan pemberian pupuk

organik/pupuk hayati dan pupuk anorganik dalam rangka meningkatkan produktivitas lahan dan kelestarian lingkungan perlu digalakkan. Hanya dengan cara ini keberlanjutan produksi tanaman dan kelestarian lingkungan dapat dipertahankan. Sistem pertanian yang disebut sebagai LEISA (low external input and sustainable agriculture) menggunakan kombinasi pupuk organik dan anorganik yang berlandaskan konsep *good agricultural practices* perlu dilakukan agar degredasi lahan dapat dikurangi dalam rangka memelihara kelestarian lingkungan.

Pemanfaatan pupuk organik dan pupuk hayati untuk meningkatkan produktivitas lahan dan produksi pertanian perlu dipromosikan dan digalakkan. Program-program pengembangan pertanian yang mengintegrasikan ternak dan tanaman (*crop-livestock*) serta penggunaan tanaman legum baik berupa tanaman lorong (*alley cropping*) maupun tanaman penutup tanah (*cover crop*) sebagai pupuk hijau maupun kompos perlu diintensifkan.

Penggunaan pupuk organik dan hayati

Data tentang penggunaan pupuk organik dan hayati sampai sekarang sulit diperoleh. Penyebabnya antara lain: 1). karena kebanyakan pupuk organik dan pupuk hayati diproduksi oleh pengusaha kecil dan menengah, 2). pupuk organik banyak diproduksi *in situ* untuk digunakan sendiri, dan 3). jumlah penggunaan pupuk organik dan pupuk hayati masih sangat terbatas. Pupuk organik komersial yang kebanyakan diproduksi *ex situ* dipakai untuk tanaman hias pot di kota-kota besar. Baru pada tahun-tahun terakhir ini perusahaan pupuk BUMN Pupuk Sriwijaya sudah mulai memproduksi pupuk organik. Penggunaan pupuk organik yang diproduksi secara *in situ* dilakukan pada tingkat usaha tani dengan menggunakan limbah pertanian/limbah ternak yang ada di usaha tani yang bersangkutan. Beberapa perusahaan pertanian/perkebunan seperti kelapa sawit, nanas, jamur merang mengolah limbahnya menjadi kompos untuk kebutuhan sendiri.

Penggunaan pupuk hayati pernah terdata dengan baik beberapa waktu, yaitu ketika pupuk hayati (inokulan rhizobia) merupakan salah satu komponen paket produksi untuk proyek intensifikasi kedelai pemerintah. Pemerintah mengadakan kontrak pesanan inokulan untuk seluruh areal intensifikasi kedelai. Karena adanya sistem kontrak ini beberapa pabrik inokulan berdiri karena dengan sistem ini produksi inokulan mereka terjamin pembelinya.

Pada periode 1983-1986, inokulan (Legin) sebanyak 68.034,67 kg telah digunakan untuk menginokulasi tanaman kedelai seluas 453.564 ha pada 25 provinsi di Indonesia (Sebayang and Sihombing, 1987). Pada

musim tanam tahun 1997/1998, jenis inokulan lain (pupuk hayati majemuk Rhizoplus) sebanyak 41.348,75 kg digunakan untuk menginokulasi 330.790 ha kedelai di 26 provinsi (Saraswati *et al*., 1998).

Perkembangan penggunaan inokulan Legin tiap tahun sejak tahun 1981-1995 tidak menunjukkan tendensi meningkat seperti diperlihatkan pada Tabel 1.

Pencanangan “Go organic 2010” oleh Departemen Pertanian diharapkan akan menunjang perkembangan pupuk organik dan hayati di Indonesia. Selain itu juga mulai dilaksanakannya sistem pertanaman padi SRI oleh para petani mendorong mulai dproduksinya kompos *in situ* oleh para petani.

Tabel 1. Penggunaan inokulan Legin

Tahun	Jumlah	Tahun	Jumlah
	T		t
1981	7,5	1989	< 1,0
1982	6,1	1990	< 1,0
1983	10,1	1991	15,0
1984	20,1	1992	15,0
1985	17,1	1993	<1,0
1986	24,7	1994	< 1,0
1987	13,0	1995	>2,0*
1988	< 1,0		

* perkiraan

DAFTAR PUSTAKA

Cattelan, A.J., P.G. Hartel, and J.J. Fuhrmann. 1999. Screening for plant growth-promoting rhizobacteria to promote early soybean growth. Soil Sci.Soc.Am.J. 63: 1.670-1.680.

FNCA Biofertilizer Project Group. 2006. Biofertilizer Manual. Forum for Nuclear Cooperation in Asia (FNCA). Japan Atomic Industrial Forum, Tokyo.

Glick, B.R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. Can. J. Microbial. 4: 109-117.

Honcamp, F. 1931. Historisches über die Entwicklung der Pflanzener-nährungslehre, Düngung und Düngemittel. *In* F. Honcamp (Ed.). Handbuch der Pflanzenernährung und Düngelehre, Bd. I und II. Springer, Berlin.

Jutono. 1982. The application of *Rhizobium*-inoculant on soybean in Indonesia. Ilmu Pert. (Agric. Sci.) 3(5): 215-222.

Kloepper, J.W. 1993. Plant growth-promoting rhizobacteria as biological control agents. p. 255-274. *In* F.Blaine Metting, Jr. (Ed.). Soil Microbiology Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc., New York.

Kloepper, J.W., R.M. Zablotowicz, E.M. Tipping, and R. Lifshitz. 1991. Plant growth promotion mediated by bacterial rhizosphere colonizers. p. 315-326. *In* D.L. Keister and P.B. Cregan (Eds.). The Rhizosphere and Plant Growth. Kluwer Academic Pub., Dordrecht.

Macdonald, 1989. An overview of crop inoculation, p. 1-9. *In* R.Campbell and R.M. Macdonald (Eds.). Microbial Inoculation of Crop Plants. IRL Press, Oxford.

Saraswati, R., D.H. Goenadi, D.S. Damardjati, N. Sunarlim, R.D.M. Simanungkalit, dan Djumali Suparyani. 1998. Pengembangan Rhizo-plus untuk Meningkatkan Produksi, Efisiensi Pemupukan Menunjang Keberlanjutan Sistem Produksi Kedelai, Laporan Akhir Penelitian Riset Unggulan Kemitraan I Tahun (1995/1996-1997-1998). Balai Penelitian Bioteknologi Tanaman Pangan.

Sebayang, K. dan D.A. Sihombing 1987. The technology impact on soybean yield in Indonesia. pp. 37-48. *In* J.W.T. Bottema, F. Dauphin, and G. Gijsbers (Eds.). Soybean Research and Development in Indonesia. CGPRT Centre, Bogor.

Simanungkalit, R.D.M and R. Saraswati 1993. Application of biotechnology on biofertilizer production in Indonesia. pp. 45-57. *In* S. Manuwoto, S. Sularso, and K. Syamsu (Eds.). Proc. Seminar on Biotechnology: Sustainable Agriculture and Alternative Solution for Food Crisis. PAU-Bioteknologi IPB, Bogor.

Subba Rao, N.S. 1982. Biofertilizer in Agriculture. Oxford and IBH Publishing Co., New Delhi.

Toxopeus, H.J. 1938. Over het voorkomen van de knolltjesbacterien van kedelee in verband met de wenschelijk van enten van het zaaizaad. Landbouw 14: 197-217.

2. KOMPOS

Diah Setyorini, Rasti Saraswati, dan Ea Kosman Anwar

Summary

Compost. Composts are organic matter such as leaves, straw, grasses, rice bran, corn stovers, vines, tendrils, and animal manure which have been decomposed by decomposer microorganisms in order to be applied to improve soil health and fertility and to provide nutrients to plants. Generally composts or organic fertilizers are characterized by relatively low content of macro and micro nutrients, slow nurient availability, and providing limited nutrients. Organic fertilizers can improve soil physical characteristics (bulk density, aeration, pores, soil density), soil chemical characteristics (cation exchange capacity, macro and micro nutrients, organic acids), soil biological characteristics (energy for soil microbes and other biological activities), social conditions (recycle of municipal wastes, job opportunites, public income) and environment (beauty). Various composting methods which are often applied: (1) Indore method, (2) Heap method, (3) Bangalore method, (4) Berkeley method, and (5) Vermicomposting. The selection of composting method depends on ability and material condition and composting site. The method which is very often applied currently is Berkeley method producing mature compost within 2 weeks by using microorganisms. In order to apply for fertilizing soil, compost should be really stable (mature). Parameters to be used to determine compost maturity are among others: (1) carbon/nitrogen ratio (2) pH, (3) dark brown compost color, (4) not rotten smell but earthy, (5) crumble or loose. Composts are low in nutrient content in comparison to synthethic fertilizers. However, composts have some other advantages which mineral fertilizers do not have, the role in improving soil physical structure and microbiology. Compost enrichment is intended to increase its nutrient status. Rockphosphate, bone meal, and dry blood can be added because the material contains macro nutrients as well as micro nutrients and cost relatively cheap compared to synthetic fertilizers. Nitrogen can be

added microbiologically by inoculating with *Azotobacter*, while the addition of phosphate-solubilizing microorganisms can increase the availability of P in compost. Inoculation of compost with microorganisms can be done when compost temperature has been stable at about 30-35 ^{o}C.

Kompos merupakan bahan organik, seperti daun-daunan, jerami, alang-alang, rumput-rumputan, dedak padi, batang jagung, sulur, carang-carang serta kotoran hewan yang telah mengalami proses dekomposisi oleh mikroorganisme pengurai, sehingga dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah. Kompos mengandung hara-hara mineral yang esensial bagi tanaman.

Sisa tanaman, hewan, atau kotoran hewan, juga sisa jutaan makhluk kecil yang berupa bakteri jamur, ganggang, hewan satu sel, maupun banyak sel merupakan sumber bahan organik yang sangat potensial bagi tanah, karena perannya yang sangat penting terhadap perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah, namun bila sisa hasil tanaman tidak dikelola dengan baik maka akan berdampak negatif terhadap lingkungan, seperti mengakibatkan rendahnya keberhasilan pertumbuhan benih karena imobilisasi hara, allelopati, atau sebagai tempat berkembangbiaknya patogen tanaman. Bahan-bahan ini menjadi lapuk dan busuk bila berada dalam keadaan basah dan lembap, seperti halnya daun-daun menjadi lapuk bila jatuh ke tanah dan menyatu dengan tanah. Selama proses perubahan dan peruraian bahan organik, unsur hara akan bebas menjadi bentuk yang larut dan dapat diserap tanaman. Sebelum mengalami proses perubahan, sisa hewan dan tumbuhan ini tidak berguna bagi tanaman, karena unsur hara masih dalam bentuk terikat yang tidak dapat diserap oleh tanaman.

Di lingkungan alam terbuka, proses pengomposan bisa terjadi dengan sendirinya. Lewat proses alami, rumput, daun-daunan dan kotoran hewan serta sampah lainnya lama kelamaan membusuk karena adanya kerja sama antara mikroorganisme dengan cuaca. Proses tersebut bisa dipercepat oleh perlakuan manusia, yaitu dengan menambahkan mikroorganisme pengurai sehingga dalam waktu singkat akan diperoleh kompos yang berkualitas baik.

Sifat dan karakterisasi kompos

Penggunaan kompos sebagai bahan pembenah tanah (soil conditioner) dapat meningkatkan kandungan bahan organik tanah sehingga mempertahankan dan menambah kesuburan tanah pertanian. Karakteristik umum dimiliki kompos antara lain: (1) mengandung unsur hara dalam jenis

dan jumlah bervariasi tergantung bahan asal; (2) menyediakan unsur hara secara lambat (slow release) dan dalam jumlah terbatas; dan (3) mempunyai fungsi utama memperbaiki kesuburan dan kesehatan tanah. Berikut ini diuraikan fungsi kompos dalam memperbaiki kualitas kesuburan fisik, kimia, dan biologi tanah.

Sifat fisika tanah

Kompos memperbaiki struktur tanah yang semula padat menjadi gembur sehingga mempermudah pengolahan tanah. Tanah berpasir menjadi lebih kompak dan tanah lempung menjadi lebih gembur. Penyebab kompak dan gemburnya tanah ini adalah senyawa-senyawa polisakarida yang dihasilkan oleh mikroorganisme pengurai serta miselium atau hifa yang berfungsi sebagai perekat partikel tanah. Dengan struktur tanah yang baik ini berarti difusi O_2 atau aerasi akan lebih banyak sehingga proses fisiologis di akar akan lancar. Perbaikan agregat tanah menjadi lebih remah akan mempermudah penyerapan air ke dalam tanah sehingga proses erosi dapat dicegah. Kadar bahan organik yang tinggi di dalam tanah memberikan warna tanah yang lebih gelap (warna humus coklat kehitaman), sehingga penyerapan energi sinar matahari lebih banyak dan fluktuasi suhu di dalam tanah dapat dihindarkan. Institut Pertanian Bogor (IPB) melaporkan bahwa takaran kompos sebanyak 5 t ha^{-1} meningkatkan kandungan air tanah pada tanah-tanah yang subur (CPIS, 1991).

Sifat kimia tanah

Kompos merupakan sumber hara makro dan mikromineral secara lengkap meskipun dalam jumlah yang relatif kecil (N, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu, B, Zn, Mo, dan Si). Dalam jangka panjang, pemberian kompos dapat memperbaiki pH dan meningkatkan hasil tanaman pertanian pada tanah-tanah masam. Pada tanah-tanah yang kandungan P-tersedia rendah, bentuk fosfat organik mempunyai peranan penting dalam penyediaan hara tanaman karena hampir sebagian besar P yang diperlukan tanaman terdapat pada senyawa P-organik. Sebagian besar P-organik dalam organ tanaman terdapat sebagai fitin, fosfolipid, dan asam nukleat. Kedua yang terakhir hanya terdapat sedikit dalam bahan organik tanah karena senyawa tersebut mudah digunakan oleh jasad renik tanah. Turunan senyawa-senyawa tersebut sangat penting dalam tanah (karena kemampuannya membentuk senyawa dengan kation polivalen), terdapat dalam jumlah relatif tinggi, tetapi yang dekomposisinya lambat ialah inositol. Pada tanah alkalin, terbentuk inositol fosfat dengan Ca atau Mg, sedangkan pada tanah masam dengan Al atau Fe. P-anorganik dalam bentuk Al-Fe; Ca-P yang tidak tersedia bagi tanaman, akan dirombak oleh organisme pelarut P menjadi P-anorganik yang larut atau tersedia bagi tanaman.

Selain itu, kompos juga mengandung humus (bunga tanah) yang sangat dibutuhkan untuk peningkatan hara makro dan mikro dan sangat dibutuhkan tanaman. Misel humus mempunyai kapasitas tukar kation (KTK) yang lebih besar daripada misel lempung (3-10 kali) sehingga penyediaan hara makro dan mikromineral lebih lama. Kapasitas tukar kation (KTK) asam-asam organik dari kompos lebih tinggi dibandingkan mineral liat, namun lebih peka terhadap perubahan pH karena mempunyai sumber muatan tergantung pH (pH dependent charge). Pada nilai pH 3,5, KTK liat dan C-organik sebesar 45,5 dan 199,5 me 100 g^{-1} sedangkan pada pH 6,5 meningkat menjadi 63 dan 325,5 me 100 g^{-1}. Nilai KTK mineral liat kaolinit (3-5 me 100 g^{-1}), illit (30-40 me 100 g^{-1}), montmorilonit (80-150 me 100 g^{-1}), sedangkan pada asam humat (485-870 me 100 g^{-1}) dan asam fulfat (1.400 me 100 g^{-1}). Oleh karena itu, penambahan kompos ke dalam tanah dapat meningkatkan nilai KTK tanah (Tan, 1991).

Peranan bahan organik yang juga penting pada tanah ialah kemampuannya bereaksi dengan ion logam untuk membentuk senyawa kompleks. Dengan demikian ion logam yang bersifat meracuni tanaman serta merugikan penyediaan hara pada tanah seperti Al, Fe, dan Mn dapat diperkecil dengan adanya khelat dengan bahan organik.

Sifat biologi tanah

Kompos banyak mengandung mikroorganisme (fungi, aktinomisetes, bakteri, dan alga). Dengan ditambahkannya kompos ke dalam tanah tidak hanya jutaan mikroorganisme yang ditambahkan, akan tetapi mikroorganisme yang ada dalam tanah juga terpacu untuk berkembang. Proses dekomposisi lanjut oleh mikro-organisme akan tetap terus berlangsung tetapi tidak mengganggu tanaman. Gas CO_2 yang dihasilkan mikroorganisme tanah akan dipergunakan untuk fotosintesis tanaman, sehingga pertumbuhan tanaman akan lebih cepat. Amonifiksi, nitrifikasi, dan fiksasi nitrogen juga meningkat karena pemberian bahan organik sebagai sumber karbon yang terkandung di dalam kompos. Aktivitas berbagai mikroorganisme di dalam kompos menghasilkan hormon-hormon pertumbuhan, misalnya auksin, giberelin, dan sitokinin yang memacu pertumbuhan dan perkembangan akar-akar rambut sehingga daerah pencarian makanan lebih luas. Pemberian kompos pada lahan sawah akan membantu mengendalikan atau mengurangi populasi nematoda, karena bahan organik memacu perkembangan musuh alami nematoda, yaitu cendawan dan bakteri serta memberi kondisi yang kurang menguntungkan bagi perkembangan nematoda. Munculnya serangan nematoda penyebab penyakit bintil akar pada akar tanaman padi di beberapa daerah dipicu oleh penggunaan pupuk urea yang intensif.

Bahan organik memberikan efek positif pada aktivitas berbagai enzim hidrolase yang kemungkinan disebabkan oleh meningkatkan biomassa mikroba (Garcia *et al*., 1994). Setelah 10 tahun penambahan bahan organik, siklus biokimia N, aktivitas (urease dan protease-BAA), P (phosphatase) dan karbon (ß-glucosidase) dapat di reaktivasi, sehingga kesuburan tanah meningkat (Ladd, 1985).

Jenis dan sumber bahan kompos

Bahan organik yang dapat digunakan sebagai sumber pupuk organik dapat berasal dari limbah/hasil pertanian dan nonpertanian (limbah kota dan limbah industri) (Kurnia *et al*., 2001). Dari hasil pertanian antara lain berupa sisa tanaman (jerami dan brangkasan), sisa hasil pertanian (sekam padi, kulit kacang tanah, ampas tebu, dan belotong), pupuk kandang (kotoran sapi, kerbau, ayam, itik, dan kuda), dan pupuk hijau. Limbah kota atau sampah organik kota biasanya dikumpulkan dari pasar-pasar atau sampah rumah tangga dari daerah pemukiman serta taman-taman kota. Limbah industri yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik antara lain limbah industri pangan. Berbagai bahan organik tersebut dapat dijadikan pupuk organik melalui teknologi pengomposan sederhana maupun dengan penambahan mikroba perombak serta pengkayaan dengan hara lain.

Pupuk organik yang berasal dari pupuk kandang merupakan bahan pembenah tanah yang paling baik dibanding bahan pembelah lainnya. Kadar hara yang dikandung pupuk organik pada umumnya rendah dan sangat bervariasi. Sebagai bahan pembenah tanah, pupuk organik membantu dalam mencegah terjadinya erosi dan mengurangi terjadinya retakan tanah. Pemberian bahan organik mampu meningkatkan kelembapan tanah dan memperbaiki porositas tanah.

Sisa tanaman

Kandungan hara beberapa tanaman pertanian ternyata cukup tinggi dan bermanfaat sebagai sumber energi utama mikroorganisme di dalam tanah. Apabila digunakan sebagai mulsa, maka ia akan mengontrol kehilangan air melalui evaporasi dari permukaan tanah, dan pada saat yang sama dapat mencegah erosi tanah. Hara dalam tanaman dapat dimanfaatkan setelah tanaman mengalami dekomposisi. Kandungan haranya sangat bervariasi tergantung dari jenis bahan tanaman (Tabel 1). Rasio C/N sisa tanaman bervariasi dari 80:1 pada jerami gandum hingga 20:1 pada tanaman legum. Selama proses dekomposisi ini nilai rasio C/N akan menurun mendekati 10:1 pada saat bahan tersebut bercampur dengan tanah. Berbagai sumber bahan kompos dari limbah pertanian dengan nilai C/N rasio disajikan pada Tabel 2 (FAO, 1987).

Tabel 1. Komposisi hara dalam tanaman

Tanaman	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
			%					mg kg^{-1}		
Gandum	2,80	0,36	2,26	0,61	0,58	155	28	45	108	23
Jagung	2,97	0,30	2,39	0,41	0,16	132	12	21	117	17
Kc. tanah	4,59	0,25	2,03	1,24	0,37	198	23	27	170	28
Kedelai	5,55	0,34	2,41	0,88	0,37	190	11	41	143	39
Kentang	3,25	0,20	7,50	0,43	0,20	165	19	65	160	28
Ubi jalar	3,76	0,38	4,01	0,78	0,68	126	26	40	86	53

Sumber: Tan (1993)

Tabel 2. Sumber bahan kompos, kandungan nitrogen, dan rasio C/N

Jenis bahan	Nitrogen per berat kering	C/N rasio
	%	
Limbah cair dari hewan	15 - 18	0,8
Darah kering	10 - 14	3
Kuku dan tanduk	12	-
Limbah ikan	4 - 10	4 - 5
Limbah minyak biji-bijian	3 - 9	3 - 15
Night soil	5,5 - 6,5	6 - 10
Lumpur limbah	5 - 6	6
Kotoran ternak unggas	4	-
Tulang	2 - 4	8
Rumput	2 - 4	12
Sisa tanaman hijauan	3 - 5	10 - 15
Limbah pabrik bir	3 - 5	15
Limbah rumah tangga	2 - 3	10 - 16
Kulit biji kopi	1,0 - 2,3	8
Eceng gondok	2,2 - 2,5	20
Kotoran babi	1,9	-
Kotoran ternak	1,0 -1,8	-
Limbah lumpur padat	1,2 - 1,8	-
Millet	0,7	70
Jerami gandum	0,6	80
Daun-daunan	0,4 -1,0	40 - 80
Limbah tebu	0,3	150
Serbuk gergaji	0,1	500
Kertas	0,0	*

Sumber: FAO, 1987
Keterangan: - tidak ditentukan, * tidak tertentu

Kotoran hewan

Kotoran hewan yang berasal dari usaha tani pertanian antara lain adalah kotoran ayam, sapi, kerbau, kambing, kuda, dan sebagainya. Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan berbeda tergantung pada jumlah dan jenis makanannya. Secara umum, kandungan hara dalam kotoran hewan jauh lebih rendah daripada pupuk kimia (Tabel 3) sehingga takaran penggunaannya juga akan lebih tinggi.

Namun demikian, hara dalam kotoran hewan ini ketersediaannya (*release*) lambat sehingga tidak mudah hilang. Ketersediaan hara sangat dipengaruhi oleh tingkat dekomposisi/mineralisasi dari bahan-bahan tersebut. Rendahnya ketersediaan hara dari pupuk kandang antara lain disebabkan karena bentuk N, P serta unsur lain terdapat dalam bentuk senyawa kompleks organo protein atau senyawa asam humat atau lignin yang sulit terdekomposisi. Selain mengandung hara bermanfaat, pupuk kandang juga mengandung bakteri saprolitik, pembawa penyakit, dan parasit mikroorganisme yang dapat membahayakan hewan atau manusia. Contohnya: kotoran ayam mengandung S*almonella* sp. Oleh karena itu pengelolaan dan pemanfaatan pupuk kandang harus hati-hati.

Tabel 3. Kandungan hara beberapa jenis kotoran hewan

Sumber	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe
				%			
Sapi perah	0,53	0,35	0,41	0,28	0,11	0,05	0,004
Sapi daging	0,65	0,15	0,30	0,12	0,10	0,09	0,004
Kuda	0,70	0,10	0,58	0,79	0,14	0,07	0,010
Unggas	1,50	0,77	0,89	0,30	0,88	0,00	0,100
Domba	1,28	0,19	0,93	0,59	0,19	0,09	0,020

Sumber: Tan (1993)

Hasil penelitian pembuatan kompos dari kotoran hewan di Jepang menunjukkan bahwa 10-25% dari N dalam bahan asal kompos akan hilang sebagai gas NH_3 selama proses pengomposan. Selain itu dihasilkan pula 5% CH_4 dan sekitar 30% N_2O yang berpotensi untuk mencemari lingkungan sekitarnya. Sebaliknya akan terjadi penyusutan volume bahan dan mempunyai rasio C/N yang lebih rendah dan suhu 60-65^oC saat proses pengomposan berakhir.

Sampah kota

Sampah (waste) didefinisikan sebagai bahan-bahan yang sudah tidak digunakan dan tidak bermanfaat sehingga disebut bahan buangan.

Menurut sumbernya, sampah dibagi menjadi sampah domestik/kota dan sampah industri. Berdasarkan data di berbagai tempat, sampah kota ini relatif kurang tertangani dibandingkan sampah bahan lain. Hal ini terjadi karena bahan tersebut banyak terkontaminasi B_3 (bahan beracun berbahaya), seperti logam berat sehingga apabila dimanfaatkan sebagai kompos untuk tanaman pangan dapat mencemari hasil. Tertimbunnya sampah domestik dalam waktu lama akan mengundang risiko penurunan kualitas sanitasi, keindahan lingkungan serta berjangkitnya penyakit tertentu.

Di beberapa kota besar di Indonesia, masalah sampah kota banyak menjadi sorotan seiring dengan semakin meningkatnya jumlah penduduk dan perbaikan kualitas hidup masyarakatnya. Hasil buangan sampah rumah tangga, tempat fasilitas umum kota, pasar dan sebagainya di ibukota Jakarta telah mencapai volume sekitar 26.750 m^3 $hari^{-1}$, Semarang 1.500 m^3 ha^{-1} dan Bogor sekitar 2.000 m^3 $hari^{-1}$ (Sibuea *et al*., 1993). Kondisi ini sudah sangat mengkhawatirkan dan mengganggu kenyamanan dan kebersihan lingkungan bila tidak ditangani secara baik. Salah satu kendala pemanfaatan sampah kota adalah kurang praktisnya pemakaian secara langsung dan memerlukan biaya relatif tinggi untuk pendistribusiannya di lapangan.

Menurut jenis dan asalnya sampah domestik dibedakan menjadi sampah kertas, plastik, kaca, karet, dan logam yang biasanya dimanfaat-kan oleh pemulung untuk didaur ulang menjadi produk yang bermanfaat. Sedangkan sampah organik yang proporsinya (volume) jauh lebih besar daripada sampah anorganik biasanya tertimbun tanpa ada yang memanfaatkan. Sampah organik terdiri atas sisa sayuran, tanaman, dan sisa makanan yang mengandung karbon (C) berupa senyawa sederhana maupun kompleks. Selulosa merupakan salah satu senyawa kompleks yang memerlukan proses dekomposisi relatif lama namun dapat dipecah oleh enzim selulosa yang dihasilkan oleh bakteri menjadi senyawa monosakarida, alkohol, CO_2, dan asam-asam organik lain (Rao, 1975).

Ditinjau dari ketersediaan dan jenis bahan bakunya, ketiga bentuk sampah organik (sisa tanaman, kotoran hewan, dan sampah kota) ini berpotensi besar untuk didaur ulang melalui proses pengomposan menjadi pupuk organik. Dengan memanfaatkan teknologi yang ada diharapkan dapat membuka peluang usaha baru yang hasilnya (berupa pupuk organik) dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas lahan-lahan pertanian di Indonesia.

Vermikompos

Vermikompos disebut juga kompos cacing, *vermicast* atau pupuk kotoran cacing, yang merupakan hasil akhir dari hasil penguraian bahan organik oleh jenis-jenis cacing tertentu. Vermikompos merupakan bahan yang

kaya hara, dapat digunakan sebagai pupuk alami atau *soil conditioner* (pembenah tanah). Proses pembuatan vermikompos disebut *vermikomposting*.

Cacing yang digunakan dalam proses pembuatan vermikompos diantaranya *brandling-worms* (*Eisenia foetida*), dan *redworms* (cacing merah) (*Lumbricus rubellus*). Cacing-cacing ini jarang ditemukan di dalam tanah, dan dapat menyesuaikan dengan kondisi tertentu di dalam pergiliran tanaman. Di luar negeri ”bibit” cacing-cacing telah diperjualbelikan di toko-toko pertanian. *Vermikomposting* dalam skala kecil dapat mendaur ulang sampah dapur menjadi vermikompos yang berkualitas dengan menggunakan ruang terbatas. Kandungan hara vermikompos yang dihasilkan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kandungan hara vermikompos

Parameter sifat kimia	Nilai
pH	6,5 -7,5
C-organik %	20,43 – 30,31
Nitrogen %	1,80 – 2,05
Fosfor %	1,32 – 1,93
Kalium %	1,28 – 1,50
Rasio Karbon: nitrogen	14-15 : 1
Kalsium %	3,0 – 4,5
Magnesium %	0,4 – 0,7
Natrium %	0,02 – 0,30
Sulfur %	Traces to 0,40
Fe (ppm)	0,3 – 0,7
Seng (ppm)	0,028 – 0,036
Mangan (ppm)	Traces to 0,40
Tembaga (ppm)	0,0027 – 0,0123
Boron (ppm)	0,0034 – 0,0075
Aluminium (ppm)	Traces to 0,071
Kobalt, Molibdenum (ppm)	-

Proses pengomposan

Sejarah proses pengomposan

Pengomposan merupakan praktek tertua untuk menyiapkan pupuk organik yang selanjutnya dikembangkan menjadi kunci teknologi untuk mendaur ulang limbah permukiman dan perkotaan. Di Indonesia, pemanfaatan kotoran ternak sebagai pupuk kandang sudah sejak lama dipraktekkan oleh petani tradisional. Meskipun tidak ada catatan sejarah sejak kapan petani memanfaatkan kotoran ternak sebagai pupuk organik.

Tidak ada catatan sejarah tentang pendekatan ilmiah proses pengomposan di Indonesia, kemungkinan besar ini diperkenalkan oleh pakar pertanian Belanda. Pengomposan merupakan praktek yang biasa dilakukan di pekarangan dengan memanfaatkan sampah pekarangan untuk bahan kompos, atau di desa dengan memanfaatkan kotoran ternak. Tetapi beberapa publikasi populer lama menjelaskan bahwa kompos yang baik dibuat dari campuran sisa tanaman dan kotoran ternak dengan perbandingan 3:1.

Prinsip proses pengomposan

Bahan organik tidak dapat digunakan secara langsung oleh tanaman karena perbandingan kandungan C/N dalam bahan tersebut tidak sesuai dengan C/N tanah. Rasio C/N merupakan perbandingan antara karbohidrat (C) dan nitrogen (N). Rasio C/N tanah berkisar antara 10-12. Apabila bahan organik mempunyai rasio C/N mendekati atau sama dengan rasio C/N tanah, maka bahan tersebut dapat digunakan tanaman. Namun pada umumnya bahan organik segar mempunyai rasio C/N tinggi (jerami 50-70; dedaunan tanaman 50-60; kayu-kayuan >400; dan lain-lain).

Prinsip pengomposan adalah untuk menurunkan rasio C/N bahan organik hingga sama dengan C/N tanah (<20). Semakin tinggi rasio C/N bahan organik maka proses pengomposan atau perombakan bahan semakin lama. Waktu yang dibutuhkan bervariasi dari satu bulan hingga beberapa tahun tergantung bahan dasar.

Proses perombakan bahan organik terjadi secara biofisiko-kimia, melibatkan aktivitas biologi mikroba dan mesofauna. Secara alami proses peruraian tersebut bisa dalam keadaan aerob (dengan O_2) maupun anaerob (tanpa O_2). Proses penguraian aerob dan anaerob secara garis besar sebagai berikut:

$$\text{Bahan organik} + O_2 \xrightarrow[\text{N, P, K}]{\text{Mikroba aerob}} H_2O + CO_2 + \text{hara} + \text{humus} + \text{enersi}$$

$$\text{Bahan organik} \xrightarrow[\text{N, P, K}]{\text{Mikroba anaerob}} CH_4 + \text{hara} + \text{humus}$$

Proses perombakan tersebut, baik secara aerob maupun anaerob akan menghasilkan hara dan humus, proses bisa berlangsung jika tersedia N, P, dan K. Penguraian bisa berlangsung cepat apabila perbandingan antara kadar C (C-organik):N:P:K dalam bahan yang terurai setara 30:1:0,1:0,5. Hal ini disebabkan N, P, dan K dibutuhkan untuk aktivitas metabolisme sel mikroba dekomposer (Gaur, 1980a). Oleh karena itu penggunaan bahan organik segar (belum mengalami proses dekomposisi)

(nilai C/N >25) secara langsung yang dicampur/dibenam di dalam tanah akan mengalami proses penguraian secara aerob (pemberian bahan organik di lahan kering) atau anaerob (pemberian bahan organik di lahan sawah) lebih dahulu. Hal ini menyebabkan ketersediaan hara N, P, dan K tanah menurun, karena diserap dan digunakan oleh mikroba dekomposer untuk aktivitas peruraian bahan organik. Akibatnya terjadi persaingan antara tanaman dengan mikroba dekomposer dalam pengambilan unsur N, P, dan K. Selain terjadi persaingan dalam pengambilan hara, proses peruraian aerob juga menghasilkan enersi/suhu sehingga suhu tanah meningkat. Kedua hal tersebut dapat menyebabkan tanaman kekurangan hara (pertumbuhan tanaman terhambat) atau bahkan tanaman mati, oleh karena itu penggunaan bahan organik yang mempunyai kadar C tinggi tetapi kadar N, P, dan K rendah, sebaiknya sebelum digunakan diproses lebih dahulu sampai bahan organik tersebut menjadi kompos. Pada bahan organik yang telah terdekomposisi (menjadi kompos) telah terjadi proses mineralisasi unsur hara dan terbentuk humus yang sangat bermanfaat bagi kesuburan dan kesehatan tanah.

Di lingkungan alam terbuka, kompos bisa terjadi dengan sendirinya. Proses pembusukan terjadi secara alami namun tidak dalam waktu yang singkat, melainkan secara bertahap. Lewat proses alami, rumput, daun-daunan, dan kotoran hewan serta sampah lainnya lama kelamaan membusuk karena kerja sama antara mikroorganisme dengan cuaca. Lamanya proses pembusukan tersebut lebih kurang sekitar 5 minggu hingga 2 bulan. Namun jika kita ingin waktu yang lebih singkat, 2 minggu, proses tersebut dapat dipercepat dengan menggunakan bioaktivator perombak bahan organik, seperti *Trichoderma* sp.

Komponen utama limbah padat pertanian adalah selulosa. Selulosa merupakan senyawa yang secara alami sulit untuk didekomposisi. Hal ini menyebabkan petani lebih suka membakar jeraminya di lahan pertanian daripada mengembalikannya lagi ke tanah dalam bentuk kompos, sebab pengomposan secara alami membutuhkan waktu yang lama (4-5 bulan), terlebih pada bahan organik berlignin pada tanaman perkebunan seperti pelepah daun dan tandan kosong kelapa sawit yang mengandung lignin tinggi. Lignin merupakan polimer struktural fenilpropan pada tanaman vaskuler yang membuat kekakuan tanaman dan mengikat serat dinding sel, berfungsi menurunkan permeasi air melintasi dinding jaringan xilem dan membuat kayu resisten terhadap serangan mikroba. Di dalam tanah lignin dari tanaman mati didegradasi oleh mikroba menjadi humus, air dan karbon dioksida. Humus pada permukaan tanah penting untuk struktur tanah, meningkatkan aerasi dan *moisture-holding capacity*. Humus berfungsi sebagai penukar ion dasar dan mampu menyimpan serta melepaskan hara di sekitar tanaman (Eriksson *et al*., 1989). Walaupun manfaat penggunaan bahan organik untuk meningkat-

kan kesuburan kimia, fisik, dan biologi tanah telah dipahami betul oleh para ahli dan praktisi pertanian, tetapi sampai sekarang masih sulit petani memanfaatkan kembali sisa tanaman untuk menyuburkan lahannya. Hal ini disebabkan karena secara alami perombakan limbah pertanian memerlukan waktu yang lama, sedangkan apabila memakai kompos yang telah jadi selain diperlukan biaya yang mahal juga diperlukan tenaga karena kompos harus diberikan dalam jumlah yang besar (bulky).

Komponen penyusun struktur tanaman terbesar setelah selulosa adalah hemiselulosa (xylan) yang merupakan polimer karbohidrat kompleks dengan *xylan* dan glukomanan sebagai komponen utama. Hemiselulosa merupakan polimer dari unit-unit gula pentosa dan hexosa dimana fibril-fibrilnya membentuk susunan amorf. Struktur hemiselulosa yang banyak dipelajari adalah dari kelompok *xylan* karena menempati 7-30% dari bobot tanaman. Degradasi dari hemiselulosa secara enzimatis memerlukan suatu kompleks enzim yang mampu menghidrolisis *xylan* dan kerangka glukomanan. Hemiselulosa umumnya relatif mudah didekomposisi dan merupakan polisakarida yang mula-mula didekomposisi terlebih dahulu oleh mikroba di alam, sehingga penyusutan bobot tanaman pada suatu proses dekomposisi terjadi karena terurainya hemiselulosa.

Proses pengomposan juga bermanfaat untuk mengubah limbah yang berbahaya, seperti misalnya tinja, sampah, dan limbah cair lain menjadi bahan yang aman dan bermanfaat. Organisme yang bersifat patogen akan mati karena suhu yang tinggi pada saat proses pengomposan berlangsung.

Berdasarkan uraian tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa kompos merupakan sumber bahan organik dan nutrisi tanaman. Kemungkinan bahan dasar kompos mengandung selulosa 15-40%, bahan mineral (abu) 3-5%, selain itu terdapat bahan larut air panas dan dingin (gula, pati, asam amino, urea, dan garam amonium) sebanyak 2-30%, dan 1-15% lemak larut eter dan alkohol, minyak dan lilin. Komponen organik ini mengalami proses dekomposisi di bawah kondisi mesofilik dan termofilik. Pengomposan dengan metode timbunan di permukaan tanah, lubang galian tanah, sistem Indore menghasilkan bahan yang terhumufikasi berwarna gelap setelah 3-4 bulan dan merupakan sumber bahan organik untuk pertanian berkelanjutan.

a. Proses mikrobiologi

Konversi biologi bahan organik dilaksanakan oleh bermacam-macam kelompok mikroorganisme heterotropik seperti bakteri, fungi, aktinomisetes, dan protozoa. Organisme tersebut mewakili jenis tanaman dan hewan (Biddlestone dan Gray,1985).

Selama proses pengomposan berlangsung, perubahan secara kualitatif dan kuantitatif terjadi, pada tahap awal akibat perubahan lingkungan beberapa spesies flora menjadi aktif, makin berkembang dalam waktu yang cepat, dan kemudian hilang untuk memberikan kesempatan pada populasi lain untuk menggantikan. Pada minggu kedua dan ketiga, kelompok fisiologi yang berperan aktif pada proses pengomposan dapat diidentifikasikan yaitu bakteri sebanyak 10^6–10^7, bakteri amonifikasi (10^4), pektinolitik (10^3), dan bakteri penambat nitrogen (10^3). Mulai hari ketujuh kelompok mikrobia meningkat dan setelah hari ke-14 terjadi penurunan jumlah kelompok. Kemudian kembali terjadi kenaikan populasi selama minggu keempat. Mikroorganisme yang berperanan adalah mikroorganisme selulopatik dan lignolitik demikian juga fungi (Tabel 5).

Tabel 5. Organisme yang aktif dalam proses pengomposan

Kelompok	Organisme	Jumlah/g kompos lembap
Miklofora	Bakteri	$10^8 – 10^9$
	Fungi	10^5 - 10^8
Mikrofauna	Protozoa	$10^4 – 10^8$
Makroflora	Fungi	10^4 - 10^5
Makrofauna	Cacing tanah, rayap, semut, kumbang	

Sumber: Sutanto (2002)

Pengomposan aerob: Dalam sistem ini, kurang lebih dua pertiga unsur karbon (C) menguap (menjadi CO_2) dan sisanya satu pertiga bagian bereaksi dengan nitrogen dalam sel hidup. Selama proses pengomposan aerob tidak timbul bau busuk. Selama proses pengomposan berlangsung akan terjadi reaksi eksotermik sehingga timbul panas akibat pelepasan energi. Kenaikan suhu dalam timbunan bahan organik menghasilkan suhu yang menguntungkan mikroorganisme temofilik. Akan tetapi, apabila suhu melampaui 65-70^oC, kegiatan mikroorganisme akan menurun karena kematian organisme akibat panas yang tinggi.

Pengomposan anaerob: penguraian bahan organik terjadi pada kondisi anaerob (tanpa oksigen). Tahap pertama, bakteri fakultatif penghasil asam menguraikan bahan organik menjadi asam lemak, aldehida, dan lain-lain.; proses selanjutnya bakteri dari kelompok lain akan mengubah asam lemak menjadi gas metan, amoniak, CO_2 dan hidrogen. Pada proses aerob energi yang dilepaskan lebih besar (484-674 kcal mole glukosa^{-1}) sedangkan pada proses anaerob hanya 25 kcal mole glukosa^{-1} (Sutanto, 2002).

b. Tahapan proses pengomposan

Proses dekomposisi bahan organik dapat dibagi menjadi tiga tahap seperti disajikan dalam Tabel 6 (Sutanto, 2002). Pada tahap awal atau dekomposisi intensif berlangsung, dihasilkan suhu yang cukup tinggi dalam waktu yang relatif pendek dan bahan organik yang mudah terdekomposisi akan diubah menjadi senyawa lain. Pada tahap pematangan utama dan pasca pematangan, bahan yang sukar akan terdekomposisi akan terurai dan membentuk ikatan kompleks lempung-humus. Produk yang dihasilkan adalah kompos matang yang mempunyai ciri antara lain: (1) tidak berbau; (2) remah; (3) berwarna kehitaman; (4) mengandung hara yang tersedia bagi tanaman; dan (5) kemampuan mengikat air tinggi.

Tabel 6. Tahapan pengomposan

No.	Tahapan	Pematangan bahan	Produk	Kategori pematangan
1.	Tahap dekomposisi dan sanitasi	Pra-matang/ dekomposisi intensif	Kompos segar	II
2.	Tahap konversi	Pematangan utama	Kompos segar	III
3.	Tahap sintetik	Pasca pematangan	Kompos matang	IV & V

Sumber: Sutanto (2002)

Perkembangan proses dekomposisi yang kurang baik pada umumnya disebabkan oleh kandungan lengas tidak sesuai dan atau campuran bahan campuran kompos yang tidak sesuai. Selama proses dekomposisi berlangsung harus dilakukan monitoring terhadap kelembapan dan suhu dengan tujuan mengidentifikasi dan memperbaiki kesalahan pada tahap awal dekomposisi. Pada Tabel 7 disajikan daftar permasalahan yang mungkin timbul selama proses pengomposan, identifikasi penyebab, dan cara memperbaikinya.

Tabel 7. Diagnosis permasalahan yang mungkin timbul, identifikasi penyebabnya, dan cara memperbaikinya

Permasalahan	Penyebab	Cara menanggulangi
Bahan baku terlalu kering, proses dekomposisi berhenti	- Kelembapan turun di bawah batas ambang yang dibutuhkan mikroba karena suhu meningkat - Bahan dasar kompos terlalu kering	- Kompos dibalik secara berkala - Menambah bahan kompos segar - Menutup timbunan kompos untuk mengurangi penguapan
Bahan baku terlalu basah, warna kehitaman, kekurangan oksigen	- Curah hujan terlalu tinggi - Bahan campuran mengandung air tinggi, namun kandungan nitrogen rendah	- Kompos dibalik secara berkala, bagian dasar diberi alas kering berupa potongan kayu atau ranting - Menambah tanah, batuan yang dihaluskan atau kapur
Dekomposisi berjalan lambat	- Prosentase kandungan lignin terlalu tinggi sehingga rasio C/N tinggi - Terlalu kering	- Kompos dibalik secara berkala - Menambahkan bahan yang kaya nitrogen (kotoran ternak, limbah dapur/rumah tangga)
Bau busuk	- Tergenang - Kekurangan oksigen - Prosentase bahan yang mengandung nitrogen terlalu tinggi - Kekurangan bahan yang ruah - Bahan memadat	- Kompos dibalik secara berkala - Menambahkan bahan yang ruah
Kompos mengandung benih gulma	- Selama proses dekomposisi suhu terlalu rendah	- Kelembapan dan aerasi diatur - Bahan yang mengandung biji gulma diletakkan di bagian tengah timbunan agar mencapai peningkatan suhu yang tinggi
Kompos diserang kecoa	- Tersisa makanan dan hewan di sekitar timbunan dan tidak ditutup	- Menempatkan bahan limbah dapur di bagian tengah timbunan kemudian ditutup.

Sumber: Diolah dari Sutanto (2002)

(a) (b) (c)

Gambar 1. Pembuatan pupuk organik yang berasal dari campuran kotoran ternak dan sisa tanaman yang dilakukan dalam skala kecil: (a) bahan dasar; (b) pencampuran; dan (c) pemberian air untuk menjaga kelembapan

Foto: Ladiyani Retno W. (2004)

Gambar 2. Pembuatan pupuk organik berbentuk padat yang berasal dari sampah kota (atas) dan pupuk organik cair dari urine ternak (bawah) dalam skala industri milik PT Agro Duta, Bandung

Foto: Diah Setyorini (2006)

c. Syarat-syarat pembuatan kompos

Agar pembuatan kompos berhasil, beberapa syarat yang diperlukan antara lain:

Ukuran bahan mentah. Sampai pada batas tertentu, semakin kecil ukuran potongan bahan mentahnya, semakin cepat pula waktu pembusukannya. Penghalusan bahan akan meningkatkan luas permukaan spesifik bahan kompos sehingga memudahkan mikroba dekomposer untuk menyerang dan menghancurkan bahan-bahan tersebut. Meskipun demikian, kalau penghalusan bahan terlalu kecil, timbunan akan menjadi mampat sehingga udara sedikit. Ukuran bahan sekitar 5-10 cm sesuai untuk pengomposan ditinjau dari aspek sirkulasi udara yang mungkin terjadi. Untuk mempercepat proses pelapukan, dilakukan pemotongan/mencacah daun-daunan, ranting-ranting dan material organis lainnya secara manual dengan tangan atau mesin. Untuk pembuatan kompos skala industri, tersedia mesin penggilingan bertenaga listrik yang dirancang khusus untuk memotong atau mencacah bahan organis limbah pertanian menjadi potongan-potongan yang cukup kecil hingga bisa melapuk dengan cepat.

Suhu dan ketinggian timbunan kompos. Timbunan bahan yang mengalami dekomposisi akan meningkat suhunya hingga 65-70^{o}C akibat terjadinya aktivitas biologi oleh mikroba perombak bahan organik (Gaur, 1980). Penjagaan panas sangat penting dalam pembuatan kompos agar proses dekomposisi berjalan merata dan sempurna. Hal yang menentukan tingginya suhu adalah nisbah volume timbunan terhadap permukaan. Makin tinggi volume timbunan dibanding permukaan, makin besar isolasi panas dan makin mudah timbunan menjadi panas. Timbunan yang terlalu dangkal akan kehilangan panas dengan cepat, karena bahan tidak cukup untuk menahan panas dan menghindari pelepasannya. Dalam keadaan suhu kurang optimum, bakteri-bakteri yang menyukai panas (yang bekerja di dalam timbunan itu) tidak akan berkembang secara wajar. Akibatnya pembuatan kompos akan berlangsung lebih lama. Sebaliknya timbunan yang terlampau tinggi dapat mengakibatkan bahan memadat karena berat bahan kompos itu sendiri. Hal tersebut akan mengakibatkan suhu terlalu tinggi dan udara di dasar timbunan berkurang. Panas yang terlalu banyak juga akan mengakibat-kan terbunuhnya mikroba yang diinginkan. Sedang kekurangan udara mengakibatkan tumbuhnya bakteri anaerobik yang baunya tidak enak. Tinggi timbunan yang memenuhi syarat adalah sekitar 1,25-2 m. Pada waktu proses pembusukan berlangsung, pada timbunan material yang tingginya 1,5 m akan menurun sampai kira-kira setinggi 1 atau 1,25 m.

Nisbah C/N. Mikroba perombak bahan organik memerlukan karbon dan nitrogen dari bahan asal. Karbon dibutuhkan oleh mikroba sebagai sumber energi untuk pertumbuhannya dan nitrogen diperlukan untuk membentuk protein. Bahan dasar kompos yang mempunyai rasio C/N 20:1 hingga 35:1 sesuai untuk dikomposkan. Menurut Mathur (1980) mikroorganisme memerlukan 30 bagian C terhadap satu bagian N, sehingga rasio C/N 30 merupakan nilai yang diperlukan untuk proses pengomposan yang efisien. Terlalu besar rasio C/N (>40) atau terlalu kecil (<20) akan mengganggu kegiatan biologis proses dekomposisi. Bahan berkadar C/N tinggi bisa menyebabkan timbunan membusuk perlahan-lahan karena mikroba utama yang aktif pada suhu rendah adalah jamur. Hal ini berarti bahwa pembuatan kompos dari bahan-bahan keras seperti kulit biji-bijian yang keras dan berkayu, tanaman menjalar atau pangkasan-pangkasan pohon (semua dengan kadar C/N tinggi) harus dicampur dengan bahan-bahan berair seperti pangkasan daun dan sampah-sampah lunak. Bila tidak ada bahan hijauan yang mengandung nitrogen, dapat diganti dengan berbagai pupuk organik.

Kelembapan. Timbunan kompos harus selalu lembap, dengan kandungan lengas 50-60%, agar mikroba tetap beraktivitas. Kelebihan air akan mengakibatkan volume udara jadi berkurang, sebaliknya bila terlalu kering proses dekomposisi akan berhenti. Semakin basah timbunan tersebut, harus makin sering diaduk atau dibalik untuk menjaga dan mencegah pembiakan bakteri anaerobik. Pada kondisi anaerob, penguraian bahan akan menimbulkan bau busuk. Sampah-sampah yang berasal dari hijauan, biasanya tidak membutuhkan air sama sekali pada waktu awal, tetapi untuk bahan dari cabang atau ranting kering dan rumput-rumputan memerlukan penambahan air yang cukup.

Sirkulasi udara (aerasi). Aktivitas mikroba aerob memerlukan oksigen selama proses prombakan berlangsung (terutama bakteri dan fungi). Ukuran partikel dan struktur bahan dasar kompos mempengaruhi sistem aerasi. Makin kasar struktur maka makin besar volume pori udara dalam campuran bahan yang didekomposisi. Pembalikan timbunan bahan kompos selama proses dekomposisi berlangsung sangat dibutuhkan dan berguna mengatur pasokan oksigen bagi aktivitas mikroba.

Nilai pH. Bahan organik dengan nilai pH 3-11 dapat dikomposkan. pH optimum berkisar antara 5,5-8,0. Bakteri lebih menyukai pH netral, sedangkan fungi aktif pada pH agak masam. Pada pH yang tinggi, terjadi kehilangan nitrogen akibat volatilisasi, oleh karena itu dibutuhkan kehati-hatian saat menambahkan kapur pada saat pengomposan. Pada awal proses pengomposan, pada umumnya pH agak masam karena aktivitas

bakteri yang menghasilkan asam. Namun selanjutnya pH akan bergerak menuju netral. Variasi pH yang ekstrem selama proses pengomposan menunjukkan adanya masalah dalam proses dekomposisi.

d. Metode pengomposan

Beberapa metode pengomposan yang sering digunakan dan dipraktekkan secara sederhana adalah:

1. Metode Indore

Bahan dasar yang digunakan adalah campuran antara sisa/residu tanaman, kotoran ternak, urine ternak, abu bakaran kayu, dan air. Bahan yang keras seperti ranting kayu tidak boleh melebihi 10% total berat bahan dasar. Semua bahan yang tersedia kemudian disusun menurut lapisan-lapisan dengan ketebalan masing-masing 15 cm, dengan total ketebalan timbunan 1,0-1,5 m. Lokasi pembuatan kompos dipilih yang agak tinggi dekat kandang ternak agar terbebas dari masalah penggenangan air. Lubang galian dibuat dengan kedalaman 1 m dan lebar 1,5-2,0 m dengan panjang lubang ter-gantung ketersediaan lahan. Selanjutnya, kotoran ternak yang telah disiapkan dimasukkan ke dalam lubang setebal 10-15 cm secara merata kemudian ditaburi dengan urine ternak yang dicampur tanah. Kelembapan tumpukan bahan dijaga pada kelembapan sekitar 90%. Selama proses pengomposan dilakukan pembalikan tiga kali pada 15, 30, dan 60 hari setelah kompos mulai dibuat.

2. Metode Heap

Pengomposan dilakukan di permukaan tanah berukuran dasar 2 m, tinggi 1,5 m dan panjang 2 m. Bagian tepi dipadatkan dan di sekitar timbunan diberi peneduh atau pelindung. Sebagai lapisan dasar pertama adalah bahan yang kaya karbon setebal 15 cm (dedaunan, jerami, serbuk gergaji, dan batang jagung) kemudian lapisan berikutnya adalah bahan yang kaya nitrogen setebal 10-15 cm (residu sisa tanaman, rumput segar, kotoran ternak, dan sampah organik). Demikian seterusnya disusun bertumpuk hingga ketinggian 1,5 m, bahan dasar harus bervariasi agar proses dekomposisi berjalan dengan baik dan bila perlu dicacah agar lebih halus. Kelembapan dijaga dengan menambahkan air secukupnya dan proses pembalikan dilakukan setelah 6 dan 12 minggu proses pengomposan berlangsung.

3. Metode Bangalore

Metode ini direkomendasikan apabila bahan dasar pembuat kompos yang digunakan adalah tinja dan sampah kota di daerah yang mempunyai curah hujan rendah. Metode ini mempunyai banyak kelemahan, dimana selama proses pengomposan bahan-bahan selalu berada di dalam lubang atau bak pengomposan. Selama proses pengomposan sekitar 3 bulan, tidak dilakukan proses penyiraman atau pembalikan. Permukaan kompos yang ditutup dengan lumpur menyebabkan kehilangan kelembapan dapat ditekan sehingga laju dekomposisi bahan-bahan berjalan sangat lambat dan dapat berlangsung hingga 6-8 bulan sampai kompos matan. Dalam proses ini tidak terjadi kehilangan karbon dan nitrogen sehingga kualitas kompos sangat tergantung pada bahan dasar yang digunakan. Metode yang dikembangkan di Bangalore, India ini kurang populer karena kesulitan dalam pengelolaan, waktu lama dan menimbulkan bau busuk dan lalat yang banyak.

Gambar 3. Jerami, sumber bahan organik yang melimpah di lahan sawah dan proses pengomposan jerami secara langsung di lahan menggunakan mikroba dekomposer

Foto: Diah Setyorini (2006)

4. Metode Berkeley

Metode pengomposan ini relatif cepat hanya sekitar 2 minggu dengan menggunakan bahan dasar campuran dua bagian bahan organik kaya selulosa dan satu bagian bahan organik yang kaya nitrogen dengan nilai rasio C/N sekitar 30:1. Bahan disusun berlapis-lapis 2,4 x 2,2 x 1,5 m dan dikomposkan dalam waktu 2 minggu. Selama 2-3 hari proses pengomposan berjalan terbentuk suhu tinggi sehingga secara berkala kompos harus dibalik dan diaduk. Setelah hari ke-10, suhu mulai menurun dan bahan berubah menjadi remah dan berwarna coklat gelap.

5. **Vermikompos**

Prinsip dari metode ini adalah memanfaatkan cacing sebagai perombak bahan organik. Cacing tanah dapat memakan semua jenis bahan organik dengan kemampuan makan setara dengan berat badannya per hari. Kotoran cacing yang disebut kascing ini kaya nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, dan magnesium bentuk tersedia bagi tanaman, mengandung vitamin, enzim, dan mikroorganisme. Tapiador (1981) memprediksi dari sekitar 1.000 t bahan organik lembap dapat diubah menjadi 300 t vermikompos.

Vermikompos dapat dibuat dalam skala kecil (sederhana) maupun skala besar (industri). Pada pembuatan skala kecil digunakan kotak dari papan kayu atau kotak plastik yang sudah tidak terpakai. Stirofoam atau logam tidak dianjurkan untuk membuat kotak vermikompos karena mengeluarkan racun ke dalam lingkungan hidup cacing, sedangkan logam menyerap panas, mudah berkarat dan mengeluarkan logam berat ke dalam vermikompos. Terdapat tiga cara pembuatan yaitu: (1) k**otak tidak bersekat** dimana cacing dan bahan organik ditempatkan di atas alas pada bagian dasar. Tipe ini sering digunakan namun mempunyai kesulitan saat memanen kompos karena cacing dan material kompos menyatu; (2) k**otak bersekat vertikal** berupa nampan-nampan yang disusun secara vertikal berisi bahan organik. Diharapkan, sebagian cacing akan bermigrasi ke lapisan nampan diatasnya. Apabila cacing yang bermigrasi sudah cukup, kompos di bawah bisa dipanen; dan (3) k**otak bersekat horizontal** dimana nampan diletakkan berdampingan untuk memberi kesempatan cacing tanah bermigrasi mencari sumber makanan pada kotak disampingnya. Ketika migrasi cacing ke kotak sebelahnya telah dianggap cukup, kompos yang sudah matang beserta cacing yang masih tertinggal bisa dipanen.

Pembuatan vermikompos berskala besar menggunakan tempat terbuka, terdiri atas hamparan bahan organik lalu cacing melakukan pengomposan dengan memakan bahan organik tersebut. Cacing pada

umumnya tetap tinggal dan tidak meloloskan diri dari hamparan karena melimpahnya bahan makanan. Permukaan hamparan bahan organik sering diperkeras dengan beton untuk mencegah predators memakan populasi cacing tanah.

Proses pembuatan vermikompos dilaksanakan melalui tiga tahap: (1) pengadaan bahan organik; (2) perbanyakan cacing tanah; dan (3) proses pengomposan. Bahan organik berupa campuran limbah dapur dan bahan mengandung karbon (kertas koran, serbuk gergaji, jerami, kardus, gambut, bahan-bahan lapuk, dan daun kering) diperlukan sebagai media berstruktur lepas untuk memudahkan cacing bernafas dan sebagai sarana proses dekomposisi aerobik. Aktivitas cacing optimal pada suhu 12-21^{O}C, cacing *Pheretima hupiensis*, optimal pada suhu media sekitar 28^{o}C, pada suhu 30^{o}C, kokon menetas, dan pada suhu 32^{o}C anak cacing mati.

e. Waktu pengomposan

Waktu yang diperlukan untuk proses pengomposan guna memperoleh kompos matang dan stabil tergantung pada beberapa faktor yaitu: (1) rasio C/N bahan dasar; (2) ukuran partikel; (3) keberadaan udara (keadaan aerobik); dan (4) kelembapan (Jain *dalam* FAO, 1980).

Selama proses pengomposan, bahan kompos mengalami perombakan oleh beberapa spesies mikroorganisme yang akan berubah selama proses pengomposan berlangsung. Bakteri dan fungi yang tahan suhu tinggi akan dijumpai terutama pada tahap pertengahan dari periode pengomposan dimana pada saat ini suhu dalam tumpukan kompos (pile) tinggi. Dengan berlanjutnya proses pengomposan, kandungan (total) karbon akan menurun sementara kandungan nitrogen meningkat, kemudian suhu menjadi stabil. Pada akhir proses akan terbentuk kompos matang yang secara biologis bersifat stabil dengan C/N rasio relatif rendah. Kematangan kompos merupakan aspek yang penting dalam penentuan kualitas kompos. Penggunaan kompos yang tidak matang akan mendatangkan efek yang merugikan terhadap pertumbuhan tanaman karena panas yang ditimbulkan selama proses pengomposan berlangsung.

Nilai C/N rasio dari suatu bahan organik merupakan aspek penting dalam pengomposan dan laju dekomposisi bahan organik. Mikro-organisme membutuhkan sumber karbon untuk pertumbuhan dan nitrogen untuk sintesis protein. Organisme biasanya membutuhkan 30 bagian dari berat karbon terhadap satu bagian nitrogen sehingga rasio C/N 30 merupakan nilai yang paling efisien untuk proses pengomposan. Pengomposan bahan-bahan yang mempunyai C/N rasio lebih tinggi memerlukan waktu pengomposan yang lebih lama. Untuk memperpendek waktu pengomposan

digunakan bahan-bahan yang kaya akan nitrogen. Bahan tersebut dinamakan aktivator.

Aktivator adalah segala bentuk substansi yang secara mikrobiologis akan menstimulir proses dekomposisi di dalam tumpukan kompos. Aktivator organik adalah materi yang mengandung nitrogen yang tinggi dalam berbagai bentuk seperti protein, asam amino, urea, dan lain-lain. Bahan-bahan tersebut terdapat dalam *manure*, darah, sampah, kompos, dan tanah yang mengandung humus.

Faktor yang mempengaruhi mutu kompos

Mutu kompos dipengaruhi oleh tipe dan mutu dari bahan dasar-nya, serta mutu dari proses pengomposannya. Proses pengomposan dipengaruhi oleh beberapa parameter, seperti ukuran partikel, kandungan air, skrening, formasi timbunan, aerasi, dan sebagainya. Mutu kompos yang sudah siap dipakai sangat tergantung kepada tingkat kontaminan dari bahan pembentuknya. Bahan organik dapat tercemar melalui air yang tercemar, sumber bahan organik, dan residu pestisida. Sumber logam berat yang mencemari kompos tersebut antara lain: baterai (merkuri, kadminium, plumbum, dan seng), kulit (kromium), cat (kromium, plumbum, dan kadmium), plastik (kadmium, plumbum, dan nikel), pelapis cahaya (plumbum), kertas (plumbum), elektronik (plumbum dan kadmium), keramik (plumbum dan kadmium), kosmetika (kadmium dan seng), dan debu.

Masalah logam berat

Masalah yang paling utama pada produksi kompos adalah hadirnya logam atau bahan beracun yang berbahaya, baik untuk kesehatan manusia maupun untuk pertumbuhan tanaman. Bahan dasar kompos yang paling banyak digunakan adalah sampah kota dan *sewage*. Bahan tersebut dapat mengandung logam berat yang cukup tinggi seperti arsen (As), kadmium (Cd), dan timah (Pb). Unsur-unsur ini akan terserap oleh tanaman dan termakan oleh manusia dan akhirnya akan mengkontaminasi seluruh rantai makanan. Tiap negara mempunyai peraturan yang berbeda untuk nilai logam berat yang diperbolehkan berada dalam kompos yang dihasilkan. Di Florida maksimum Cd dan Pb dalam kompos adalah masing-masing 15 mg kg^{-1} dan 500 mg kg^{-1}. Canada 3 mg kg^{-1} dan 150 mg kg^{-1}. Korea 5 mg kg^{-1} dan 150 mg kg^{-1} (Setyorini dan Prihatini, 2003). Petunjuk atau peraturan ini merupakan bentuk pengamanan terhadap kualitas kompos yang harus diikuti dengan cara monitoring secara teratur yang dilakukan oleh pihak produsen juga oleh pemerintah. Di Korea telah dibuat suatu peraturan mengenai kriteria kandungan logam berat dalam bahan dasar kompos yang akan digunakan, yaitu: (dalam mg kg^{-1}) As (<50), Hg (<2), Pb (<150), Cd

(<5), Cu (<500), Cr (<300), Zn (<900), dan Ni (<50) (Myung and Youn Lee, 2001 *dalam* Setyorini dan Prihatini, 2003). Seleksi ini penting dilakukan terutama untuk material kompos yang berasal dari sampah kota, industri makanan, tekstil, pembuatan oli, aki, dan lain-lain. Hasil yang dicapai dengan adanya peraturan ini sangat signifikan, karena saat itu banyak produsen pupuk organik yang ingin mencari keuntungan maksimal dengan menggunakan bahan dasar kompos yang kurang baik. Dengan adanya peraturan tersebut, maka pemalsuan pupuk organik dapat dikendalikan.

Kematangan kompos

Agar dapat digunakan sebagai bahan penyubur tanah, kompos harus benar-benar stabil (matang). Beberapa metode dan parameter yang diuji untuk menentukan derajat kestabilan kompos, antara lain: (1) karbon/nitrogen (rasio C/N); (2) stabilitas terhadap pemanasan; (3) reduksi dalam bahan organik; dan (4) parameter humifikasi. Peneliti lain menunjukkan indikator kematangan kompos seperti disajikan pada (Tabel 8) antara lain penetapan rasio C/N, pH, KTK, sedangkan sifat-sifat yang perlu diketahui pada tingkat petani yaitu warna kompos serta aroma. Kompos yang sudah matang berwarna coklat gelap dan berbau tanah (*earthy*) (Yang, 1996).

Tabel 8. Beberapa indikator kematangan kompos

Parameter	Indikator	Pustaka
Suhu	Stabil	Stickelberger, 1975
pH	Alkalis	Jaun *et al.,*1959
COD	Stabil	Yang *et al.,*1993
BOD	Stabil	Yang *et al.,*1993
C/N rasio	< 20	Juste,1980
Laju respirasi	< 10 mg g^{-1} kompos	Morel *et al.,* 1979
Warna	Coklat tua	Sugahara *et al.,*1982
Bau	*Earthy*	Chanyasak *et al.,*1982
KTK	> 60 me $100g^{-1}$ abu	Harada *et al.,*1971

Sumber: Yang,1996

Departemen Pertanian RI telah menerbitkan Permentan No. 02/Pert/III/2006 tentang tata cara pendaftaran pupuk organik yang juga mengatur tentang kriteria minimal mutu pupuk organik. Pembicaraan mengenai standarisasi pupuk organik ini akan disampaikan pada Bab 11 di dalam buku ini.

Keuntungan dan kelemahan penggunaan kompos

Selain bernilai positif, penggunaan kompos juga mempunyai pengaruh yang negatif atau merugikan. Penggunaan kompos yang belum matang akan menyebabkan dekomposisi pada kondisi anaerobik. Hal tersebut akan menghasilkan senyawa fitotoksik dari asam-asam organik, amoniak, nitrit-nitrogen, besi, dan mangan. Untuk mengatasi hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan kompos yang telah memenuhi standar yang telah ditentukan.

Salah satu kriteria mutu kompos yang baik adalah nisbah C/N. Nisbah C/N yang tinggi (>30:1) pada kompos yang belum matang menyebabkan dekomposisi yang lambat dan menghambat pertumbuhan tanaman karena kekurangan nitrogen tersedia. Sedangkan nisbah C/N yang rendah (<15:1) menyebabkan nitrat-N yang dapat mengurangi mutu tanaman pertanian atau perkolasi ke dalam suplai air. Rasio C/N kompos yang matang menurut MSW sekitar 20. Mutu kompos tidak hanya ditentukan oleh kematangan kompos tersebut dan kandungan haranya tetapi juga ditentukan oleh kandungan polutan terutama logam berat dan bahan kimia organik seperti pestisida. Penggunaan kompos yang tercemar oleh bahan-bahan polutan dalam waktu yang lama akan menyebabkan terakumulasinya bahan pencemar tersebut dalam tanah. Akumulasi bahan polutan tersebut akan menyebabkan toksik bagi tanaman, atau juga diambil dan diserap oleh tanaman lalu dikonsumsi oleh hewan atau manusia sehingga bersifat toksik juga pada hewan atau manusia yang mengkosumsinya. Logam berat yang merupakan polutan bagi tanaman, hewan dan kesehatan manusia antara lain arsenik (As), boron (B), kadminium (Cd), kuprum (Cu), merkuri (Hg), molibdenum (Mo), nikel (Ni), plumbum (Pb), selenium (Se), dan seng (Zn). Namun demikian banyak negara telah membuat standar untuk kandungan logam berat ini kecuali untuk boron, molibdenum, dan selenium.

Beberapa bahan yang dapat dikomposkan dapat merupakan masalah bagi kesehatan manusia. Kebanyakan sisa-sisa organik dari manusia dan hewan mengandung berbagai macam mikroorganisme patogenik. Namun demikian jika dalam proses pengomposan mengikuti proses produksi yang aman untuk pengomposan, hal tersebut dapat dicegah. Penggunaan suhu 55^{o}C selama 2-3 hari pada waktu pengomposan dapat mematikan mikroorganisme yang patogen tersebut.

Dalam pembuatan vermikompos, masalah yang sering timbul adalah bau busuk disebabkan terlalu banyak hijauan di dalam kotak, terutama terlalu banyak nitrogen yang bercampur dengan hidrogen dan membentuk amoniak. Untuk menetralkan bau ini, dapat ditambahkan sejumlah bahan karbon lalu dicampur. Karbon akan menyerap nitrogen dan membentuk

campuran yang tidak berbau. Kertas dan daun kering merupakan sumber karbon yang bagus. Penambahan karbon terlalu banyak menyebabkan proses dekomposisi lambat.

Pengkayaan kompos untuk peningkatan kualitas

Dasar pemikiran

Kompos mempunyai kandungan hara yang rendah dibandingkan dengan pupuk sintetis pabrik. Namun kompos memiliki keuntungan lain yang tidak dimiliki oleh pupuk mineral, seperti peran untuk memperbaiki struktur fisik tanah dan mikrobiologi tanah. Berbagai substansi dapat meningkatkan status hara dalam kompos. Meskipun penambahan pupuk pabrik dapat meningkatkan kandungan hara dalam kompos, tetapi cara ini tidak dianjurkan karena pupuk nitrogen yang ditambahkan akan menguap selain itu penambahan pupuk tidak akan menyebabkan meningkatnya hara kompos.

Pupuk mineral tergolong mahal dan hanya mampu menyuplai satu atau dua nutrisi untuk pertumbuhan tanaman. Pengkayaan kompos dimaksudkan untuk meningkatkan status nutrisinya. Pupuk P-alam, tepung tulang serta darah kering dapat ditambahkan karena bahan-bahan tersebut, selain mengandung hara makro juga mengandung hara mikro serta harganya relatif murah dibandingkan pupuk pabrik. Penambahan nitrogen dapat dilakukan secara mikrobiologis yaitu dengan cara inokulasi dengan bakteri *Azotobacter*, sedangkan penambahan mikroorganisme pelarut fosfat dapat meningkatkan ketersediaan P dalam kompos. Inokulasi kompos dengan mikroorganisme harus dilakukan pada saat suhu kompos sudah stabil yaitu sekitar 30-35 ^{o}C (Gaur, 1980b).

Pengapuran pada timbunan kompos

Hasil kompos terbaik mempunyai pH mendekati netral atau sedikit ke arah alkali. Untuk mencapai nilai pH netral, untuk bahan kompos yang sifatnya masam perlu ditambahkan kapur pada saat proses pengomposan. Bahan kapur yang biasa digunakan adalah kapur pertanian (kaptan), dolomit, dan kalsium karbonat. Selain itu, limbah atau hasil samping industri berupa ampas bijih atau terak dapat pula digunakan sebagai bahan pengapuran kompos.

Pengkayaan dengan fosfor

Pengkayaan kompos dengan fosfor dilakukan dengan menambahkan superfosfat atau fosfat alam sebanyak 5% saat proses pengomposan. Sumber lain yang bisa digunakan adalah bahan alami seperti tulang yang dijadikan tepung, dan darah kering. Batuan fosfat alam yang dipakai sebaiknya mengandung kadar fosfat rendah (<11%). Batuan ini lebih

menguntungkan karena mengandung kalsium dan unsur mikro. Selain fosfor, tepung tulang juga menyediakan nitrogen sekitar 2-4%. Tepung tulang yang telah direbus mengandung nitrogen lebih sedikit dibanding yang alami. Terak baja mengandung kalsium, magnesium, dan hara lain setara dengan sumber fosfor yang lain. Sedangkan pohon pisang mengandung 1-1,5% fosfor saat berbentuk abu.

Pengkayaan dengan kalium

Serbuk granit atau kalium bubuk mengandung material seperti *feldspar* yang dapat ditambahkan untuk memperkaya kompos. Bunga bakung air, kulit dan batang pisang merupakan tanaman yang kaya unsur kalium dan mineral lain yang diperlukan tanaman. Kulit dan batang pisang mengandung 34-42% kalium, rumput laut kaya akan iodine, boron, tembaga, magnesium, kalsium, dan fosfor. Dedaunan seperti tithonia (kirinyu dan kipait) merupakan salah satu sumber yang dapat ditambahkan dalam bahan dasar kompos. Kulit kentang dan kentang kering mengandung 1% kalium, 4% kalsium, dan 1% magnesium.

Pengkayaan dengan nitrogen

Penambahan senyawa nitrogen yang mengandung 2% N akan menurunkan rasio C/N sampai ke angka 10, namun aplikasi ini tidak ekonomis karena biaya produksi menjadi mahal. Padahal teknologi pengomposan menghendaki bahan pengkaya yang murah dan dapat diperoleh dengan mudah.

Pengkayaan dengan mikroba

Kompos merupakan media dan lingkungan yang baik untuk pertumbuhan bakteri heterotrof dan kemoautotrof. Faktor yang membatasi pertumbuhan mikroba menguntungkan adalah kadar nitrogen serta bahan dasar kompos yang mempunyai rasio C/N yang besar. Dalam kondisi seperti ini, dapat diupayakan untuk menambah mikroba penambat nitrogen dari atmosfer untuk mengurangi kompetisi dari mikroorganisme lain yang tidak dapat menambat nitrogen. Organisme-organisme ini secara aktif dapat menurunkan rasio C/N kompos dan memperkayanya dengan bakteri penambat nitrogen seperti *Azotobacter*.

Penambahan mikroba pelarut fosfor akan meningkatkan kualitas kompos setara dengan penambahan fosfor dari hewan dan tumbuhan. Mikroba pelarut fosfor ini akan merombak batuan fosfat yang tidak larut dan bentuk mineral fosfor yang tidak tersedia menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman.

Gambar 4. Bahan pengkaya kompos seperti P-alam, dolomit, dan mikroba (kiri) dan proses pengayakan kompos yang telah matang sebelum ditambah bahan pengkaya (kanan)

Gambar 5. Proses pencampuran bahan pengkaya dolomit, P-alam, dan mikroba multiguna (MTM) pada kompos yang telah matang dan diayak

Foto: Saraswati (2006)

DAFTAR PUSTAKA

Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. New York: John Wiley and Sons.

Anonim. 1991. Penelitian dan Pengembangan Pupuk Kompos Sampah Kota. Kerjasama Penelitian antara Center for Policy and Implementation Studies dengan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.

Biddlestone, A.J., and K.R. Gray. 1985. Composting. *In* C.W. Robinson and J.A. Howel (*Eds*.). Comprehensive Biotechnology. Vol. 4. Pergamon Press, Oxford, U.K.

CPIS (Centre for Policy and Implementation Studies) dan Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. (1991). Penelitian dan Pengembangan Pupuk Kompas Sampah Kota. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Litbang Pertanian, Departemen Pertanian.

Eriksson, K.E.L., R.A. Blanchette, and P. Ander. 1989. Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components. Springer-Verlag Heildeberg. New York.

FAO. 1980. Mechanized compost plant, Delhi. *In* Compost Technology. Project Field Document No. 13.

FAO. 1987. Princples of composting. *In* Soil Management: Compost Production and use in Tropical and Sub-tropical Environments. FAO Soils Bulletin 56.

Gaur, A.C.1980a. Rapid composting. *In* Compost Technology. Project Field Document No. 13. Food and Agriculture Organization of The United Nations.

Gaur, A.C. 1980b. A Manual of Rural Composting. Project Field Document No. 15. Food and Agriculture Organization of The United Nations.

Garcia C, Hernandez T, Costa F, Ceccanti B. 1994. Biochemical parameters in soils regenerated by the addition of organic wastes. Wastes Management and Res. 12: 457-466.

Haug, R.T. 1980. Composting Engineering and Practices. Ann Arbor Science, Michigan.

Kurnia, U., D. Setyorini, T. Prihatini, S. Rochayati, Sutono dan H. Suganda. 2001. Perkembangan dan Penggunaan Pupuk Organik di Indonesia. Rapat Koordinasi Penerapan Penggunaan Pupuk Berimbang dan Peningkatan Penggunaan Pupuk Organik. Direktorat Pupuk dan Pestisida, Direktorat Jendral Bina Sarana Pertanian, Jakarta, Nopember 2001.

Ladd, J.N. 1985. Soil enzymes. p. 175-221. *In* D. Vaughan and R.E. Malcolm (*Eds*.). Soil Organik Matter and Biological Activity. The Hague, the Netherlands, Nijhoff & Junk Publ.

Mathur, R.S. 1980. Use of Indigenous Materials for Accelerating Composting In. Compost Technology. FAO Project Field Document No. 13.

Myung Ho Un and Youn Lee. 2001. Evaluation of organic waste for composting and quality control of commercial composts in Korea.

International Workshop on Recent Technologies of Composting and their Application.

Ladd, J.N. 1985. Soil enzymes. p. 175-221. *In* D. Vaughan and R.E. Malcolm (*Eds*.). Soil Organik Matter and Biological Activity. The Hague, the Netherlands, Nijhoff & Junk Publ..

Mathur, R.S. 1980. Use of Indigenous Materials for Accelerating Composting In. Compost Technology. FAO Project Field Document No. 13.

Rao, S.S.N. 1975. Soil Microorganism and Plant Growth. Oford & IBH Publ. Co. New Delhi, India.

Sibuea, L.H., K. Prastowo, Moersidi S., dan Edi Santoso. 1993. Penambahan pupuk untuk mempercepat pembuat kompos dari bahan sampah pasar. hlm. 267-280 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat: Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah. Bogor, 18-21 Februari 1993. Puslittanak, Bogor.

Setyorini, D. 2003. Persyaratan mutu pupuk organik untuk menunjang budidaya pertanian organik. Disampaikan pada Seminar Sehari Penggunaan Pupuk Organik. BPTP DI Yogyakarta.

Setyorini, D. dan Prihatini, T. 2003. Menuju "*quality control*" pupuk organik di Indonesia. Disampaikan dalam Pertemuan Persiapan Penyusunan Persyaratan Minimal Pupuk Organik di Dit. Pupuk dan Pestisida, Ditjen Bina Sarana Pertanian, Jakarta 27 Maret 2003.

Sutanto, R. 2002. Pertanian Organik: Menuju Pertanian Alternatif dan Berkelanjutan. Penerbit Kanisius. Yogyakarta.

Tan, K.H. 1991. Dasar-dasar Kimia Tanah. Didiek, H.G (penerjemah). Edisi I. Gadjah Mada University Press.

Tan, K.H. 1993. Environmental Soil Science. Marcel Dekker. Inc. New York.

Tapiador, D.D. 1981. Vermiculite and its potential in Thailand and other Asian countries. First National Earthworm Grower's Convention, Manila Philippines.

Yang, S.S. 1996. Preparation and characterization of compost. *In* Proceedings of International Training Workshop on Microbial Fertilizers and Composting. October 15-22, 1996 Taiwan Agricultural Research Institute Taichung, Taiwan, Republic of China.FFTC and TARI.

3. PUPUK HIJAU

Achmad Rachman, Ai Dariah, dan Djoko Santoso

SUMMARY

Green Manure. Application of green manure in agricultural lands is intended to increase soil organic matter and nutrient content, to improve soil physical and chemical characteristics in order to give positive impacts on soil productivity and resistence against erosion. Cultivation of green manure-producing plants can be done *in situ* by growing in rotation with main crops, or grown as fence or strip crops. Green manure-producing crops can be grown *ex situ*, outside areas of main crop. Application of green manure is determined by the main objective of green manure use, and material or plant residues applied. If the main objective is to increase and provide a relatively faster supply of nutrients, it is meaningful to mix or incorporate green manures into the soil, or composting before use. Incorporation of green manures can be done in fresh form if the C/N ratio of the material is relatively low. However, a previously composted plant material is required if it is too high. Plant material with high C/N ratio can be immediately applied without composting if it is applied as mulses. Dosage of green manure application should consider the expected nutrients be available to the plant and the requirement to reduce nutrient loss or other disadvantages. Minimum dosage required to maintain life activities of microbes in soils amounting about 3-5 ton/ha. Organic matter including green manure has become one of the remedial tools for rehabilitating degraded lands, however it is difficult to find high quality sources of green manure in such areas, because green manure crops could not grow well in the area. Therefore, it is needed to do research on the development of crop sources for good quality of green manures which can grow well on degraded lands.

Bahan organik tanah merupakan kunci utama kesehatan tanah baik fisik, kimia maupun biologi. Namun demikian, banyak lahan pertanian di Indonesia (baik lahan kering maupun sawah) yang mempunyai kadar bahan organik <1%. Padahal kadar bahan organik yang optimum untuk pertumbuhan tanaman sekitar 3-5% (Adiningsih, 2005).

Sebelum tahun lima puluhan penggunaan pupuk organik pada lahan pertanian relatif tinggi dibandingkan dengan pupuk anorganik. Namun sejak tahun 1960-an penggunaan pupuk anorganik mulai mendominasi, bahkan peran dari pupuk organik seolah terabaikan. Hal ini sejalan dengan semakin meningkatnya produksi pupuk anorganik dengan harga persatuan hara yang relatif murah dibanding pupuk organik, dan semakin berkembangnya varietas-varietas unggul yang responsif terhadap pupuk kimia.

Dengan semakin meluasnya lahan yang terdegradasi, diantara-nya banyak disebabkan oleh merosotnya kadar bahan organik tanah (Kurnia *et al*., 2005), para ahli mulai menggali sumber-sumber bahan organik potensial yang bisa digunakan untuk proses pemulihan dan pengelolaan lahan. Manfaat dari bahan organik baik sebagai sumber hara (pupuk) maupun sebagai pembenah tanah (soil ameliorant) telah banyak dibuktikan, namun pada prakteknya sering terbentur pada aspek pengadaan/sumber bahan organik.

Jenis pupuk organik tertua yang digunakan pada budi daya pertanian adalah pupuk hijau, yaitu pupuk organik yang berasal dari tanaman/tumbuhan atau berupa sisa panen. Bahan dari tanaman ini dapat dibenamkan pada waktu masih hijau atau segera setelah dikomposkan (FFTC, 1995).

Tujuan pemberian pupuk hijau adalah untuk meningkatkan kandungan bahan organik dan unsur hara dalam tanah, sehingga terjadi perbaikan sifat fisik, kimia dan biologi tanah, yang akhirnya berdampak pada peningkatan produktivitas tanah dan ketahanan tanah terhadap erosi.

Tulisan ini akan membahas berbagai aspek yang berhubungan dengan pupuk hijau, meliputi berbagai sumber pupuk hijau, kandungan hara, cara penanaman, pemeliharaan dan aplikasinya, serta beberapa aspek dari pupuk hijau yang masih memerlukan penelitian secara lebih mendalam.

Sumber pupuk hijau

Sumber pupuk hijau dapat berupa sisa-sisa tanaman (sisa panen) atau tanaman yang ditanam secara khusus sebagai penghasil pupuk hijau atau yang berasal dari tanaman liar (misalnya dari areal di pinggir lahan, jalan atau saluran irigasi).

Penanaman tanaman penghasil pupuk hijau dapat dilakukan secara *in situ* misalnya pertanaman tumpang gilir dengan tanaman utama (contoh: pergiliran tanaman pangan dengan tanaman legum penutup tanah) atau

ditanam pada sebagian areal pertanaman utama, misalnya sebagai tanaman pagar atau strip. Tanaman penghasil pupuk hijau dapat juga ditanam di luar areal pertanaman utama.

Jenis tanaman/tumbuhan yang dijadikan sumber pupuk hijau diutamakan dari jenis legum, karena tanaman ini mempunyai kandungan hara (utamanya nitrogen) yang relatif tinggi dibanding jenis tanaman lainnya. Namun demikian, sesungguhnya dari jenis nonlegum pun misalnya sisa tanaman jagung, ubi-ubian, jerami padi, dan lain-lain, dapat juga dimanfaatkan sebagai sumber pupuk hijau, karena meskipun kandungan nitrogennya relatif rendah, namun beberapa unsur lainnya seperti kalium relatif tinggi. Alasan lain dipilihnya jenis legum sebagai pupuk hijau adalah karena tanaman atau sisa tanaman dari jenis legum relatif lebih mudah terdekomposisi, sehingga penyediaan haranya menjadi lebih cepat. Tanaman atau sisa tanaman dari jenis nonlegum sebaiknya dikomposkan terlebih dahulu bila akan digunakan sebagai pupuk organik, atau sering pula dimanfaatkan sebagai bahan mulsa (dimulsakan). Tanaman penambat N seperti *Sesbania rostrata, Aeshynomene*, dan *Azolla pinata* dapat juga digunakan sebagai pupuk hijau.

Beberapa kriteria penting yang harus dipenuhi jika bahan-bahan tersebut akan digunakan sebagai pupuk organik yaitu: kandungan bahan kering, kandungan humus total dan yang mudah dimineralisasi, kandungan N yang dapat dimanfaatkan secara cepat (quick-acting), C/N rasio, tingkat kandungan bahan-bahan berbahaya bagi pertumbuhan, kualitas hasil tanaman terutama unsur-unsur logam berat harus di bawah ambang batas yang sudah ditentukan (dibahas dalam Bab 11), dan tidak mengandung senyawa yang bersifat allelopati terhadap tanaman utama.

Palm *et al.* (2001) secara garis besar membagi bahan tanaman berdasarkan kualitas, yakni tergolong berkualitas tinggi bila mengandung N paling sedikit 2,5%, kandungan lignin dan polifenol masing-masing <15% dan <4%. Bila diaplikasikan ke dalam tanah (sebagai pupuk hijau), pelepasan N benar-benar dapat terjadi (net release of nitrogen) jika kandungan lignin dan polifenol masing-masing <15% dan <4%. Di sisi lain, bahan tanaman yang mengandung N <2,5% tergolong berkualitas rendah, demikian juga halnya bahan-bahan tanaman yang menyebabkan terjadinya imobilisasi N selama terjadinya proses dekomposisi, yakni tanaman yang mengandung lignin dan polifenol tinggi.

Sisa tanaman

Banyak petani yang membuang atau tidak memanfaatkan sisa tanamannya sebagai sumber hara dan bahan organik. Padahal sisa tanaman berupa daun atau brangkasan merupakan sumber bahan organik yang paling ekonomis, karena bahan ini merupakan hasil sampingan dari kegiatan usaha tani, sehingga tidak membutuhkan biaya dan areal khusus untuk pengadaan-

nya. Pengembalian sisa tanaman ke dalam tanah juga merupakan usaha untuk mengembalikan sebagian unsur hara yang terangkut oleh panen.

Sumbangan unsur hara dari sisa tanaman merupakan hal yang tidak bisa diremehkan, karena selain pemberiannya berpeluang untuk berlangsung secara kontinu, kandungan haranya juga cukup tinggi terutama sisa tanaman yang berasal dari legum.

Tanaman dari jenis legum sering dijadikan pilihan utama sebagai sumber pupuk hijau, selain karena kandungan haranya terutama N relatif lebih tinggi dibanding tanaman nonlegum, penyediaan haranya juga lebih cepat karena relatif lebih mudah terdekomposisi. Namun demikian, sisa tanaman meskipun rata-rata persen kandungan haranya relatif lebih rendah, namun karena total sisa tanaman yang dihasilkan untuk setiap musim (panen) relatif lebih banyak, maka total unsur hara yang dapat disumbangkan dari setiap musim tidak kalah dibanding tanaman jenis legum (Tabel 1).

Tabel 1. Total hara yang terkandung dalam sisa panen (kecuali akar)

Tanaman	Total hara dalam sisa tanaman kecuali akar					
	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha^{-1}					
Kacang-kacangan						
K. tunggak	25	2	21	17	8	6
K. tanah	70	5	59	60	17	16
K. hijau	35	3	54	18	9	7
Kedelai	15	2	13	1	2	6
K. panjang	65	6	33	23	16	8
Biji-bijian						
Jagung Hibrida	45	7	58	7	12	6
Jagung lokal	25	4	32	4	7	4
Padi unggul	30	2	93	10	6	1
Padi lokal	15	2	49	5	3	1
Umbi-umbian						
Singkong	61	5	41	42	11	6
Kentang	39	8	46	9	4	5
Ubi jalar	30	5	29	4	2	3

Diolah dari: Agus dan Widianto (2004)

Kendala yang sering timbul dalam pemanfaatan sisa tanaman sebagai pupuk hijau adalah sering timbul persaingan dengan kebutuhan akan pakan ternak. Namun demikian hal ini tidak menjadi masalah, bila kotoran ternak yang dihasilkan dikembalikan ke lahan.

Tanaman pagar

Salah satu cara untuk menyediakan sumber pupuk hijau secara *in situ* adalah dengan mengembangkan sistem pertanaman lorong (alley cropping), dimana tanaman pupuk hijau (berupa tanaman perdu dari jenis legum/legum tree) ditanam sebagai tanaman pagar (hedge grow) berseling dengan tanaman utama (pangan atau perkebunan) sebagai lorong (Gambar 1). Tanaman pagar dapat menghasilkan bahan organik secara periodik; pada musim hujan tanaman pagar dapat dipangkas hampir setiap 2 bulan. Aplikasi sistem pertanaman lorong pada lahan miring, dimana tanaman legum pohon ditanam searah kontur juga sangat efektif menekan erosi (Haryati *et al.*, 1991; Erfandi *et al.*, 1988; Suganda *et al.*, 1991).

Istilah pertanaman lorong mulai diperkenalkan oleh *International Institute for Tropical Agriculture* (IITA) di Ibadan, Nigeria (Kang *et al*., 1984). Kemudian dipopulerkan di Indonesia kira-kira sejak tahun 1980-an (Sukmana, 1995). Sebenarnya sistem ini sudah lama dipraktekkan banyak petani di Flores, disana sistem ini lebih dikenal dengan istilah lamtoronisasi, karena tanaman pagar yang digunakan adalah lamtoro, tanaman ini utamanya ditanam sebagai sumber pakan.

Gambar 1. Penanaman pupuk hijau dalam pola pertanaman lorong
Foto: Husein Toha

Secara umum setiap semak atau pohon yang tergolong legum bisa dijadikan tanaman pagar, namun lebih efektif apabila tanaman pagar tersebut memenuhi sifat-sifat sebagai berikut: (1) berakar dalam agar tidak menjadi pesaing bagi tanaman semusim; (2) pertumbuhan cepat, dan setelah pemangkasan cepat bertunas kembali; (3) mampu menghasilkan bahan hijauan dalam jumlah banyak dan terus-menerus yang dapat digunakan sebagai pupuk hijau; dan (4) mampu memperbaiki kandungan nitrogen tanah dan kandungan hara lainnya.

Selain lamtoro, jenis legum lainnya yang telah teruji keunggulannya jika digunakan sebagai tanaman pagar adalah: *Flemingia macrophylla* (hahapaan), *Gliricidia sepium* (glirisidia atau gamal), *Tephrosia candida*, dan kaliandra. Di antara jenis-jenis tanaman tersebut, flemingia merupakan tanaman yang paling unggul dalam menghasilkan bahan organik (Tabel 2), sedangkan glirisida merupakan tanaman yang tahan kekeringan sehingga tanaman ini banyak ditemukan di daerah beriklim kering seperti Nusa Tenggara Timur (NTT), terutama setelah tanaman lamtoro di daerah ini hampir punah terserang kutu loncat. Lamtoro sebenarnya merupakan legum pohon yang banyak disukai petani, namun sampai saat ini petani sering kesulitan untuk mendapatkan jenis lamtoro yang tahan kutu loncat.

Tabel 2. Produksi pangkasan (data pangkasan tahun kedua atau ketiga) beberapa jenis tanaman pagar

Jenis tanaman pagar*	Hasil bahan hijau segar	Sumber
	t ha^{-1} $tahun^{-1}$	
Flemingia (*Flemingia macrophylla*)	$4,7_{(1)}$-$26,2_{(2)}$	Suganda *et al*., 1991; Haryati *et al*., 1991; Erfandi *et al*., 1988
Glirisidia (*Gliricidia sepium*)	$2,9_{(1)}$-$9,2_{(2)}$	Suganda *et al*., 1991
Lamtoro gung	$1,3_{(1)}$-$2,9_{(2)}$	Suganda *et al*., 1991; Kang *et al.*, 1984
Lamtoro (*Leucaena leucephala*)	$6,1_{(3)}$-$20_{(3)}$	Erfandi et al., 1988
Thephrosia (*Thephrosia candida*)	$13,5_{(2)}$	Haryati *et al*., 1991
Kaliandra (*Calliandra callothyrsus*)	$4,3_{(1)}$-$22,8_{(3)}$	Suganda *et al*., 1991; Erfandi *et al.,* 1988
Sengon (*Paraserianthes falcataria*)	$1,5_{(1)}$-$1,6_{(2)}$	Suganda *et al*., 1991

* Jarak tanaman pagar 4-5 m, (1), (2), dan (3) produksi tahun pertama dan kedua atau ketiga

Selain dilihat dari tingkat produksi bahan organiknya (hasil pangkasan), potensi tanaman pagar untuk dijadikan sumber pupuk hijau dapat dilihat dari kandungan haranya (Tabel 3).

Tabel 3. Kandungan C-organik dan unsur hara pada beberapa jenis tanaman pagar

Jenis tanaman pagar	Kandungan*					
	C-org	N	P	K	Ca	Mg
	%					
Flemingia (*Flemingia macrophylla*) [1 dan 2)]	40,4-51,0	2,9-3,0	0,2-0,4	0,5-1,3	1,6	0,41
Glirisidia (*Gliricidia sepium*)[1 dan 2)]	36,9-40,7	2,4-3,7	0,2	0,9-2,2	1,9-3,2	0,5-0,8
Lamtoro (*Leucaena leucocephala*) [3)]	td	3,1-4,6	0,2-0,3	1,5-1,9	0,8-2,1	0,3-0,4
Kaliandra (*Calliandra callothyrsus*) [2)]	41,9-46,4	2,6-4,1	0,1-0,2	0,5-0,6	0,9-1,8	0,4-0,5
Sesbania (Sesbania sesban) [2) dan 3)]	37,0	4,0-4,7	0,2	1,1-2,4	0,8-1,7	0,2-0,5

(1) Agus dan Widianto, 2004; (2) Palm *et al.* (2001); (3) Panjaitan (1988)

* % kering, td=tidak ada data

Selain persaingan dengan kebutuhan akan pakan ternak, kendala yang sering dihadapi dari penerapan sistem pertanaman lorong adalah tersitanya sebagian areal tanam tanaman utama, hal ini sering menjadi masalah untuk areal pertanian dengan tingkat kepemilikan lahan yang relatif sempit. Luas areal tanam dapat berkurang antara 4-16% (tergantung kemiringan lahan, semakin miring semakin rapat jarak tanaman pagarnya) dengan diaplikasikannya sistem pertanaman lorong.

Tanaman penutup tanah

Tanaman penutup tanah adalah tanaman yang ditanam tersendiri yakni pada saat tanah tidak ditanami tanaman utama atau ditanam bersamaan dengan tanaman pokok (khususnya bila tanaman pokok berupa tanaman tahunan). Tujuan utama dari penanaman tanaman penutup tanah adalah: untuk melindungi tanah dari daya perusak butir-butir air hujan, mempertahankan/memperbaiki kesuburan tanah, dan menyediakan bahan organik. Penanaman tanaman penutup tanah juga merupakan tindakan rehabilitasi lahan secara vegetatif yang relatif murah dan mudah untuk diaplikasikan.

Berdasarkan masa tumbuhnya tanaman penutup tanah dapat dibedakan atas: (a) tanaman penutup tanah yang ditanam secara simultan (bersamaan) dengan tanaman utama (Gambar 2), contohnya tanaman *Arachis* untuk tanaman lada atau kopi, *Pueraria* dan *Centrosema* untuk tanaman karet atau sawit dan (b) tanaman penutup yang ditanam secara

sekuensial (bergantian) dengan tanaman utama (Gambar 3) (Agus dan Widianto, 2004). Penanaman tanaman penutup secara sekuensial biasanya dilakukan pada akhir musim hujan, sehingga tanaman ini dapat menutup tanah pada musim kemarau. Pada awal musim hujan tanaman dimatikan (dibabat lalu diaplikasikan sebagai pupuk hijau atau bahan mulsa). Penanaman tanaman penutup juga dapat mendukung penerapan sistem olah tanah konservasi (olah tanah minimum atau tanpa olah tanah).

Beberapa jenis tanaman legum yang baik digunakan sebagai tanaman penutup tanah, total produksi hijauan, dan unsur hara yang dikandungnya disajikan pada Tabel 4 dan 5. Dari segi jumlah pangkasan yang dihasilkan dan hara yang dikandungnya, benguk atau mukuna merupakan jenis tanaman penutup yang paling unggul.

Kendala yang dihadapi dalam pengaplikasian tanaman penutup tanah pada level petani khususnya untuk tanaman penutup yang bersifat sekuensial adalah adanya keberatan dari petani, bila tanaman penutup tanah yang ditanam hanya semata menghasilkan pupuk hijau, tanpa ada hasil yang bisa dikonsumsi. Untuk menanggulangi hal ini dapat dipilih jenis tanaman penutup yang mempunyai *output* yang dapat dikonsumsi, misalnya mukuna, komak, dan kacang tunggak.

Gambar 2.
Tanaman penutup yang ditanam secara simultan dengan tanaman utama
Foto: Ai Dariah

Gambar 3.
Tanaman penutup yang ditanam secara sequensial (bergantian dengan tanaman utama
Foto: Ai Dariah

Tabel 4. Produksi pangkasan (data pangkasan tahun kedua atau ketiga) beberapa jenis tanaman pagar

Jenis tanaman pagar*	Hasil biomassa	Sumber
	t ha^{-1}	
Benguk (*Mucuna munaneae*)	7,9-15,6$^{**)}$	Sudharto *et al.* (1993),
Komak (*Dolichos lablab*)	0,51$^{*)}$	Purnomo *et al.* (1992)
Kacang tunggak (*Vigna sinensis*)	5,02$^{*)}$	Purnomo *et al.* (1992)
Kakacangan (*Arachis pintoi*)	14-59	Purnomo *et al.* (1992)
		Maswar *et al.* (2005)

* Berat kering, ** Berat basah (segar)

Tabel 5. Kandungan C-organik dan unsur hara pada beberapa jenis tanaman penutup tanah

Jenis tanaman Penutup tanah	Kandungan						Sumber
	C-org	N	P	K	Ca	Mg	
	%						
Mucuna munaneae	td	2,3	0,2	1,9	0,8	0,2	Adiningsih & Mulyadi, 1993
Mucuna pruriens	45,6	2,2	0,3	1,3	3,8	0,5	Pujianto, 2004
Arachis pitoi	45,4	1,7	0,3	2,8	2,2	0,4	
Calopogonium caeralium	45,4	2,9	0,2	2,7	1,9	0,3	Nasution, 1984
Crotalaria grahamiana	37,8	3,4	0,2	0,6	1,8	0,5	

Tumbuhan liar

Tanaman liar seperti kembang telekan (*Lantana camara*), paitan (*Tithonia diversifolia*), kirinyu (*Cromolaena odorata*), dan wedusan (*Ageratum conyzoides*) dapat dijadikan sebagai salah satu alternatif sumber/bahan pupuk hijau, terutama jika ketersediaan sumber pupuk hijau lainnya sangat terbatas. Biomassa *Ageratum conyzoides* dan *Tithonia diversifola* yang mempunyai kandungan P-total 0,57% dan 0,47% dapat dikelompokkan sebagai bahan organik berkualitas tinggi khususnya sebagai sumber hara P, *Lantana camara* juga mempunyai kecepatan mineralisasi P yang lebih tinggi dibanding gliriside (Pratikno *et al.*, 2004; Cong, 2000). Kandungan unsur hara dari beberapa jenis tanaman liar disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Kandungan hara pada beberapa tanaman liar

Jenis	C-org	N-total	Rasio C/N	P-total	Rasio C/P
	%				
Ageratum conyzoides	42,11	3,78	11,15	0,21	201,37
Cromolaena odorata	49,97	3,04	16,44	0,29	173,86
Lantana camara	46,92	3,19	14,71	0,31	150,19
Tithonia diversifolia	43,48	1,31	33,19	0,13	325,73

Sumber: Pratikno *et al.*, 2004

Hal yang harus diwaspadai bila menggunakan tanaman liar sebagai pupuk hijau adalah bila tanaman tersebut mempunyai biji yang dapat berkecambah dengan cepat, sehingga dapat menjadi gulma yang sulit untuk dikendalikan.

Azolla

Azolla merupakan salah satu sumber N alternatif khususnya untuk padi sawah. Tanaman ini sudah berabad-abad digunakan di Cina dan Vietnam sebagai sumber N bagi padi sawah. azolla merupakan paku air ukuran mini yang bersimbiosis dengan *Cyanobacteria* pemfiksasi N_2 (Gambar 4). Simbiosis ini menyebabkan azolla mempunyai kualitas nutrisi yang baik. Azolla mempunyai beberapa species, antara lain: *Azolla caroliniana, Azolla filiculoides, Azolla mexicana, Azolla microphylla, Azolla nilotica, Azolla pinnata var. Pinnata, Azolla pinnata var. Imbricata, Azolla rubra.* Salah satu species dari azolla yakni *Azolla pinata* bersimbiosis dengan ganggang biru *Anabaena*. Species ini relatif banyak terdapat pada areal pesawahan di Indonesia.

Gambar 4. *Azolla pinnata*
Foto: Edi Husen

Peneliti-peneliti di Filipina, Thailand, dan Cina telah mendapatkan jenis-jenis hibrida baru dan telah memahami mekanisme untuk menginduksi pembentukan spora. Inovasi baru diperlukan untuk mencari varietas-varietas baru yang bersifat toleran terhadap kondisi cekaman (Roger dan Ladha, 1992).

Dari beberapa penelitian diperoleh bahwa laju pertumbuhan *azolla* adalah 0,355-0,390 g hari^{-1} di laboratorium dan 0,144-0,860 g hari^{-1} di lapangan. Pada umumnya biomassa azolla maksimum tercapai setelah 14-28 hari setelah inokulasi. Dalam 20-30 hari selapis azolla yang menutupi 1 ha sawah mengandung kira-kira 15-25 t biomassa (Kannaiyan, 1986, 1992). Selanjutnya dari hasil penelitian Batan (2006) diketahui bahwa dengan menginokulasikan 200 g azolla segar m^{-2} maka setelah 3 minggu azolla tersebut akan menutupi seluruh permukaan lahan tempat azolla tersebut ditumbuhkan. Dalam keadaan ini dapat dihasilkan 30-45 kg N ha^{-1} berarti sama dengan 100 kg urea (Batan, 2006). Sementara itu hasil penelitian Prihatini *et al.* (1980) menunjukkan azolla segar sebanyak 20 t ha^{-1} yang dibenamkan dalam lahan sawah berkhasiat sama dengan pemberian 60 kg N dari urea. Kandungan hara dalam tanaman azolla disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Kandungan hara unsur hara dalam azolla

N	P	K	Ca	Mg
		%		
1,96-5,30	0,16-1,59	0,31-5,97	0,45-1,70	0,22-0,66

Sumber: Batan, 2006

Sesbania rostrata

Sesbania rostrata merupakan tanaman legum yang potensial sebagai sumber N pada lahan sawah. Tanaman ini dapat tumbuh pada keadaan tergenang, dan dapat membentuk bintil tidak hanya pada akar tetapi juga pada batang (lihat Bab VI pada buku ini). Oleh karena itu tanaman ini mempunyai kemampuan menambat N_2 yang relatif tinggi. Ladha *et al*. (1988) melaporkan bahwa *Sesbania rostrata* yang batangnya diinokulasi dengan *Azorhizobium* dapat menambat N_2 383 kg N ha^{-1} , sedangkan yang tidak diinokulasi batangnya 303 kg N ha^{-1}. Becker *et al*. (1990) mendapatkan 80% N pada *Sesbania rostrata* yang berumur 8 minggu berasal dari penambatan N_2. *S. rostrata* mampu menghasilkan biomassa kering 16,8 t ha^{-1} selama 13 minggu dan mengandung 426 kg N ha^{-1}; 75% N dan >60% P diakumulasi pada daun (Saraswati *et al*., 1994).

Penanaman dan pemeliharaan pupuk hijau

Tanaman pupuk hijau yang akan ditanam hendaknya dipilih tanaman yang sesuai (adapted) dengan kondisi lokal, mudah ditanam, tumbuh cepat, hasil tinggi, kaya kandungan unsur hara, dan tidak mempunyai pengaruh negatif terhadap tanaman pokok. Lebih disenangi jika tanaman pupuk hijau yang ditanam dapat menghasilkan biji dengan mudah sehingga petani dapat dengan mudah mengadakan benih sendiri. Petani juga lebih menyukai bila tanaman pupuk hijau yang ditanam dapat menghasilkan produk yang dapat dikosumsi. Misalnya petani di Jawa Tengah relatif menyukai tanaman mukuna (benguk), karena bijinya dapat diolah menjadi bahan makanan misalnya tempe.

Bila pupuk hijau yang ditanam merupakan tanaman tahunan misalnya dalam sistem pertanaman lorong, maka perlu dilakukan pemangkasan secara rutin (2-4 bulan sekali). Pada daerah yang curah hujannya tinggi pemangkasan harus relatif sering dilakukan. Pemangkasan selain ditujukan untuk mendapatkan pupuk hijau, juga merupakan tindakan pemeliharaan yang sangat penting, karena setelah dilakukan pemangkasan akan tumbuh tunas baru yang lebih produktif menghasilkan hijauan. Pemangkasan juga dilakukan untuk mengurangi gangguan (misalnya efek naungan) terhadap tanaman pokok.

Aplikasi pupuk hijau

Aplikasi pupuk hijau sangat ditentukan oleh tujuan utama dari pemberian pupuk hijau tersebut dan bahan atau sisa tanaman yang digunakan. Bila tujuan utama dari pemberian pupuk hijau adalah untuk penambahan dan penyediaan hara secara relatif cepat, maka lebih baik pemberian pupuk hijau dilakukan dengan cara dicampur atau dibenamkan. Pembenaman dari pupuk hijau bisa dilakukan dalam bentuk segar bila rasio C/N dari bahan tanaman yang digunakan relatif rendah), sedangkan bila rasio C/N terlalu tinggi lebih baik untuk dikomposkan terlebih dahulu. Sebagai contoh, bila *Azolla* akan digunakan sebagai pupuk hijau pada padi sawah, ada dua cara yang dapat dilakukan, yaitu: (a) *Azolla* ditanam sebagai monokultur dan setelah berumur 20-30 hari dibenamkan sebagai pupuk hijau sebelum bibit padi dipindahkan dari persemaian dan (b) azolla ditanam sebagai tanaman tumpang sari (intercrop), sesudah padi dipindah dari persemaian. Sebagai tanaman tumpang sari Azolla ditanam sampai kanopi padi menutup (biasanya setelah 20-40 hari dipindahkan dari persemaian), kemudian *Azolla* yang tumbuh di sekitar rumpun padi itu dibenamkan. Pembenaman ini sudah dapat dilakukan pada waktu

penyiangan pertama baik secara manual maupun dengan landak. Bahan kering *Azolla* biasanya mengandung 3-5% N.

Sesbania rostrata dapat dimanfaatkan sebagai pupuk hijau pada pertanaman padi sawah dengan cara menanam tanaman ini di sawah sampai berumur 45-52 hari, kira-kira sampai tanaman sudah berbunga. Setelah itu tanaman ditebas sampai pangkal batang dan dipotong-potong kira-kira sepanjang 10 cm lalu dibenamkan. Pembenaman dapat dilakukan dengan bantuan kerbau seperti ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5. Pembenaman pupuk hijau *Sesbania rostrata* pada lahan sawah dengan bantuan kerbau
Foto: RDM. Simanungkalit

Gambar 6. Aplikasi sisa tanaman sebagai mulsa
Foto: Ai Dariah

Takaran pemberian pupuk hijau perlu dipertimbangkan baik kandungan hara yang diharapkan tersedia bagi tanaman dan keperluan untuk mengurangi kehilangan unsur hara atau pengaruh-pengaruh yang merugikan. Hara yang terkandung dalam pupuk hijau tidak seluruhnya tersedia untuk tanaman secara sekaligus. Jumlah minimum yang diperlukan untuk mempertahankan aktivitas kehidupan dalam tanah adalah sekitar 3-5 t ha^{-1}. Pada lahan tanaman sereal yang berproduksi tinggi pelapukan jerami dalam jumlah banyak perlu dibantu dengan pemberian nitrogen sekitar 1 kg N ha $jerami^{-1}$.

Bahan tanaman yang mempunyai rasio C/N tinggi dapat diaplikasikan secara langsung (tanpa melalui pengomposan), jika diaplikasikan sebagai mulsa (Gambar 6). Sebelum lapuk bahan tanaman tersebut akan berperan sebagai penutup tanah yang sangat bermanfaat dari segi pencegahan erosi dan untuk menciptakan iklim mikro yang lebih baik untuk pertumbuhan tanaman.

Aplikasi mulsa dengan menggunakan bahan tanaman juga merupakan prasyarat utama dari penerapan sistem olah tanah konservasi. Mulsa yang menutupi permukaan tanah dapat mengurangi laju pemadatan tanah, sehingga intensitas pengolahan tanah dapat dikurangi. Hal ini akan sangat bermanfaat dari segi pemeliharaan sifat fisik tanah dan penghematan tenaga kerja.

Pupuk hijau yang diproses (diolah), terutama jika untuk diperdagangkan, umumnya memerlukan persiapan secara mekanis dan kimia, misalnya dengan cara menjemur, menggiling atau mencampur, menggranulasi, menetralkan, atau melengkapi dengan menambahkan unsur-unsur hara tertentu, dan membebaskannya dari patogen.

Aspek penelitian pupuk hijau yang diperlukan

Manfaat dari pupuk hijau baik sebagai sumber hara maupun pembenah tanah telah banyak diakui. Namun aplikasinya masih dinilai rendah dibanding aplikasi pupuk buatan. Kendala penggunaan pupuk hijau sering terbentur pada aspek pengadaan, terutama pada lahan-lahan yang telah terdegradasi sumber pupuk hijau yang berkualitas baik seringkali sulit didapat, karena daya tumbuh tanaman sumber pupuk hijau pada lahan-lahan yang telah terdegradasi seringkali sangat rendah. Padahal bahan organik merupakan salah satu obat mujarab dalam merehabilitasi lahan-lahan yang terdegradasi. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengembangkan tanaman-tanaman sumber pupuk hijau yang mempunyai kualitas baik namun mampu tumbuh baik pada lahan-lahan yang telah terdegradasi. Penelitian kemungkinan terjadinya efek allelopati dari berbagai jenis pupuk hijau juga perlu dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

Adiningsih, J.S. 2005. Peranan bahan organik tanah dalam meningkatkan kualitas dan produtivitas lahan Pertanian. *Dalam* Materi workshop dan Kongres Nasional II Maporina. Sekretariat Maporina, Jakarta (Tidak dipublikasikan).

Adiningsih, J.S. dan Mulyadi. 1993. Aternatif teknik rehabilitasi dan pemanfaatan lahan alang-alang, hlm. 29-50. *Dalam* Prosiding Pemanfaatan Lahan Alang-Alang untuk Usaha tani berkelanjutan. Bogor, 1 Desember 1992. Puslittanak. Bogor.

Agus, F. dan Widianto. 2004. Petunjuk Praktis Konservasi Tanah Pertanian Lahan Kering. World Agroforesttry Centre. ICRAF. Southeast Asia.

Batan, 2006. Pengelolaan Hara Tanaman. Kelompok Tanah dan Nutrisi Tanaman. www. batan. go. Id/petir/pertanian/tnh.htm.

Becker, M., J.K. Ladha, and J.C.G. Ottow 1990. Growth and N_2- fixation of two stem-nodulating legumes and their effect as green manure on lowland rice. Soil Biol. Biochem. 22: 1.109-1.119.

Cong, P.T. 2000. Improving Phosphorus Availability in Selected Soil from the Upland of South Vietnam by Residue Management A Case Study: *Tithonia diversifolia*. Dissertationes de Agricultura Katholicke Universitieit Lemen, Belgium.

Erfandi, D., H. Suwardjo, dan A. Rachman. 1988. Penelitian alley cropping di Kuamang Kuning, Jambi. hlm. 105-110. *Dalam* Hasil Penelitian Pola Usaha tani Terpadu di Daerah Transmigrasi Kuamang Kuning Jambi, Kerjasama Departemen Transmigrasi dengan Pusat Penelitian Tanah.

FFTC. 1995. Soil Conservation Handbook.English Edition.Prepared by the Food and Fertilizer Technology Center for the Asian and Pacific Region. Taipei, Taiwan. ROC.

Haryati, U., A. Rachman, dan A. Abdurachman. 1991. Aplikasi mulsa Flemingia pada pola tanam jagung-kedele-kacang tunggak pada tanah Usthortens Gondanglegi. hlm. 1-11.*Dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Lahan Kering dan Koservasi Tanah di Kabupaten Semarang dan Boyolali. P3HTA/UACP-FSR. Badan Litbang Pertanian.

Kannaiyan, S. 1986. Studies on *Azolla pinnata* for rice crop. Res. J. Pl. Environ 3(1): 1-16.

Kannaiyan, S.1992. *Azolla* Biofertilizer Technology for Rice Crop. Department of Agricultural Microbiology, Tamil Nadu Agricultural University. Tamil Nadu, India.

Kang, B.T.,G.F.Wilson, and T.L. Lawson. 1984. Alley Cropping: a Stable Alternative to Shifting Cultivation. International Institute Of Tropical Agriculture, Ibadan, Nigeria. 22 pp.

Kurnia, U., Sudirman, dan H. Kusnadi. 2005. Teknologi rehabilitasi dan reklamasi lahan terdegradasi. hlm. 141-167.*Dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian.

Ladha, J.K., S. Miyan, and and M. Garcia. 1988. *Sesbania rostrata* as green manure for lowland rice: Growth, N_2-fixation, *Azorhizobium* inoculation, and effects on sucseeding crop yields and nitrogen balance. Biol. Fert. Soils 7: 191-197.

Maswar, Sutono, dan S.H. Tala'ohu. 2005. Participatory trials for refinement of conservation practies. *In* Alternatives to Slash and Burn in Indonesia: Facilitating the Development of Agroforestry System. Phase 3 Synthesis and Summary Report. World Agroforestry Centre (ICRAF).

Nasution, U. 1984. Pengamatan terhadap berbagai jenis tanaman penutup tanah di perkebunan karet Medan. Makalah Lokakarya karet PN/PT Perkebunan Wilayah I, Medan. Pusat Penelitian Tanjung Morawa. Medan.

Palm, C.A., Gachengo C.N., Delve R.J., Candisch G. And Giller K.E. 2001. Organic input for soil fertility management and tropical agroecosystem: Aplication of an organic resource data base. Agriculture, Ecosystem and Environment 83: 27-42.

Panjaitan, M. 1988. Nutritive value of legumes introduced in Indonesia. IARD Journal 10: 73-80.

Pratikno, H., E. Arisoesilaningsih, dan E. Handayanto. 2004. Pemanfaatan Biomasa Tumbuhan Liar di Lahan Berkapur DAS Brantas untuk Meningkatkan Ketersediaan P Tanah. Fakultas Pertanian, Universitas Brawijaya. Malang.

Prihatini, T., S. Brotonegoro, S. Abdulkadir, dan Harmastini. 1980. Pengaruh pemberian *Azolla pinnata* terhadap produksi padi IR-36 pada tanah latosol Cibinong. hlm. 75-82.*Dalam* Prosiding Penelitian Tanah No. 1. Cipayung, 7-10 Oktober, 1980. Pusat Penelitian Tanah, Bogor.

Pujianto. 2004. Perbaikan Tanah Perkebunan Kakao dengan Penambahan Bahan Organik dan Penanaman Penutup Tanah. (Desertasi) Sekolah Pasca Sarjana. Institut Pertanian Bogor.

Purnomo, P., Mulyadi, I. Amien, dan H. Suwardjo. 1992. Penaruh berbagai bahan hijau tanaman kacang-kacangan terhadap produktivitas tanah rusak. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 10: 61-65.

Roger, P.A. and J.K. Ladha. 1992. Biological N2 fixation of *Sesbania rostrata*: contribution of stem nodule of Nitrogen acquisition. Soil Scence and Plant Nutrition 38 (4): 775-780. Japan.

Saraswati, R., M. Kobayashi, T. Matoh, and J. Sekiya. 1994. Characterization of *Rhizobium* and *Azorhizobium* a root- and stem-nodulating nitrogen-fixing bacterium isolated from *Sesbania* species. Contribution. Central Research Institute for Food Crops, Agency for Agricultural Research and Development, Bogor, Indonesia. 82: 1-11.

Sudharto, T., H. Suwardjo, D. Erfandi, dan T. Budhyastoro. 1993. Permasalahan dan penanggulangan alang-alang. hlm. 51-70 *Dalam* Prosiding Seminar Lahan Alang-alang: Pemanfaatan Lahan Alang-Alang untuk Usahatani Berkelanjutan. Bogor, 1 Desember 1992. Pusat Penelitian Tanah, Bogor.

Suganda, H., T. Sudharto, dan A. Abas. 1991. Pengaruh kombinasi pertanaman lorong dan cara pengolahan tanah terhadap sifat fisik dan hasil tanaman pada tanah Kambisol di Desa Karyamukti. hlm. 67-77 *dalam* Pertemuan Teknis Penelitian Tanah: Bidang Konservasi Tanah dan Air, dan Agroklimat. Bogor 3-5 Juni 1991. Puslittanak, Bogor.

Sukmana, S. 1995. Teknik konservasi tanah dalam penanggulangan degradasi tanah pertanian lahan kering. hlm. 23-42 *dalam* Prosiding Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Buku I. Makalah Kebijakan. Cisarua, Bogor, 26-28 September 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. B Badan Litbang Pertanian.

4. PUPUK KANDANG

Wiwik Hartatik dan L.R. Widowati

SUMMARY

Animal Manure. Animal manure is of animal wastes either in fresh forms or mixed with urine or decomposed in solid or liquid forms. It can originate from cattle, goat, horse, poultry, and pig dung. Its quality is variable depending on diet type, age, and body of the animal. Its utilization in agricultural farms needs to be promoted again. Its use as crop fertilizers has become a nutrient cycle and can reduce toxic nutrients for crops. Besides as a source of nutrients for plants, animal manures can also play important roles in improving soil chemical, physical, and biological as well. However, its utilization provides some constraints among others bulky characters so requiring storage and transportation, varying in nutrient contents and lower in comparison to anorganic fertilizers, normally containing weed seeds, pathogens and heavy metals. When applying animal manures it is necessary to pay attention to C/N ratio and requiring decomposition processes to reduce it when it is high. Integrated plant-livestock programs need to intensify in order to increase soil and crop productivity. It should be supplied from those particular areas so that transportation is not required. Empowering farmers in supplying animal manure composts can be attained by organizing animal manure compost-making trainings and pushing farmers for livestock-based farm diversification. Several research findings on its application in lowland and upland rice show successfully the improvement of soil fertility including chemical, physical and biological characteristics, although its effects on crop production remain inconsistent and sometimes its effects can not be seen immediately.

Pupuk kandang/kotoran hewan yang berasal dari usaha tani pertanian antara lain adalah kotoran ayam, sapi, kerbau, dan kambing. Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan berbeda tergantung pada jumlah dan jenis makanannya. Secara umum, kandungan hara dalam

kotoran hewan lebih rendah daripada pupuk kimia. Oleh karena itu biaya aplikasi pemberian pupuk kandang (pukan) ini lebih besar daripada pupuk anorganik.

Hara dalam pukan ini tidak mudah tersedia bagi tanaman. Ketersediaan hara sangat dipengaruhi oleh tingkat dekomposisi/ mineralisasi dari bahan-bahan tersebut. Rendahnya ketersediaan hara dari pukan antara lain disebabkan karena bentuk N, P serta unsur lain terdapat dalam bentuk senyawa kompleks organo protein atau senyawa asam humat atau lignin yang sulit terdekomposisi.

Selain mengandung hara bermanfaat, pukan juga mengandung biji-bijian gulma, bakteri saprolitik, pembawa penyakit, dan parasit mikroorganisme yang dapat membahayakan hewan atau manusia. Contohnya: kotoran ayam mengandung S*almonella* sp*.* Oleh karena itu pengelolaan dan pemanfaatan pukan harus hati-hati sesuai kebutuhan.

Pengertian pupuk kandang

Pupuk kandang (pukan) didefinisikan sebagai semua produk buangan dari binatang peliharaan yang dapat digunakan untuk menambah hara, memperbaiki sifat fisik, dan biologi tanah. Apabila dalam memelihara ternak tersebut diberi alas seperti sekam pada ayam, jerami pada sapi, kerbau dan kuda, maka alas tersebut akan dicampur menjadi satu kesatuan dan disebut sebagai pukan pula. Beberapa petani di beberapa daerah memisahkan antara pukan padat dan cair.

a. Pupuk kandang padat

Pupuk kandang (pukan) padat yaitu kotoran ternak yang berupa padatan baik belum dikomposkan maupun sudah dikomposkan sebagai sumber hara terutama N bagi tanaman dan dapat memperbaiki sifat kimia, biologi, dan fisik tanah.

Penanganan pukan padat akan sangat berbeda dengan pukan cair. Penanganan pukan padat oleh petani umumnya adalah sebagai berikut: kotoran ternak besar dikumpulkan 1-3 hari sekali pada saat pembersihan kandang dan dikumpulkan dengan cara ditumpuk di suatu tempat tertentu. Petani yang telah maju ada yang memberikan mikroba dekomposer dengan tujuan untuk mengurangi bau dan mempercepat pematangan, tetapi banyak pula yang hanya sekedar ditumpuk dan dibiarkan sampai pada waktunya digunakan ke lahan (Gambar 1)

Pukan sapi + jerami

Pukan ayam telah matang

Gambar 1. Cara pengolahan pukan yang sering dilalukan petani

Foto: L.R. Widowati

b. Pupuk kandang cair

Pupuk kandang (pukan) cair merupakan pukan berbentuk cair berasal dari kotoran hewan yang masih segar yang bercampur dengan urine hewan atau kotoran hewan yang dilarutkan dalam air dalam perbandingan tertentu. Umumnya urine hewan cukup banyak dan yang telah dimanfaatkan oleh petani adalah urine sapi, kerbau, kuda, babi, dan kambing.

Pupuk kandang cair dibuat dari kotoran ternak yang masih segar, bisa dari kotoran kambing, domba, sapi, dan ayam. Petani pertanian organik di Kenya membuat pukan cair dari 30-50 kg kotoran hewan yang masih segar dimasukkan dalam karung goni yang terbuat dari serat kasar rami diikat kuat, ujung karung diikatkan pada sebuah tongkat sepanjang 1 m untuk menggantung karung pada drum, kemudian karung tersebut direndam dalam drum berukuran 200 l yang berisi air. Secara, berkala 3 hari sekali kotoran dalam karung diaduk dengan mengangkat dan menurunkan tongkat beserta karung. Untuk melarutkan pukan dibutuhkan waktu sekitar 2 minggu. Pupuk kandang (pukan) yang melarut siap digunakan bila air sudah berwarna coklat gelap dan tidak berbau. Cara penggunaan pukan cair dengan disiramkan ke tanah bagian perakaran tanaman dengan takaran satu bagian pukan cair dicampur dengan satu atau dua bagian air. Ampas dari pukan cair dimanfaatkan sebagai mulsa (Matarirano, 1994).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pukan ayam yang dilarutkan dalam air mengandung kadar hara yang cukup tinggi. Kotoran ayam yang masih baru dimasukkan ke karung goni, dibenamkan dalam air dalam sebuah tong bervolume 130 l. Untuk kotoran ayam 10 kg, kadar nitrogen

yang terlarut mencapai maksimum dalam waktu 1 minggu, sedangkan bila berat kotoran ayam ditingkatkan menjadi 17,5 dan 25 kg proses pelarutan nitrogen memakan waktu 3 minggu dengan kadar nitrogen yang terlarut lebih rendah. Semakin tinggi konsentrasi kotoran ayam yang dilarutkan maka kadar N semakin rendah.

Kualitas pukan ayam diencerkan seperempat kali konsentrasi awalnya tersebut dibandingkan dengan larutan hara (hidroponik) cukup memadai. Perbandingan kadar hara dari pukan ayam yang terlarut adalah sebagai berikut: nitrogen total (219:75), nitrat (4:145), amonium (215:30), fosfor (54:65), kalium (295:400), kalsium (6:197),natrium (62:0), magnesium (0:2), besi (0:2), mangan (0:0,5), tembaga (0:0,03), dan seng (0,05:0,05). Unsur-unsur hara makro dan seng kadarnya mencukupi, hanya kalsium dan sejumlah kecil besi, mangan dan tembaga perlu diperoleh dari sumber lain. Kadar N-total pada larutan kotoran ayam sudah ideal, meskipun akan lebih baik bila terdapat dalam bentuk nitrat daripada dalam bentuk amonium (Price, 1984).

Kualitas pupuk kandang

Manfaat dari penggunaan pukan telah diketahui berabad-abad lampau bagi pertumbuhan tanaman, baik pangan, ornamental, maupun perkebunan. Yang harus mendapat perhatian khusus dalam penggunaan pukan adalah kadar haranya yang sangat bervariasi. Komposisi hara ini sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis dan umur hewan, jenis makanannya, alas kandang, dan penyimpanan/pengelolaan.

Kandungan hara dalam pukan sangat menentukan kualitas pukan (Tabel 1). Kandungan unsur-unsur hara di dalam pukan tidak hanya tergantung dari jenis ternak, tetapi juga tergantung dari makanan dan air yang diberikan, umur dan bentuk fisik dari ternak (Tabel 2).

Tabel 1. Kandungan hara beberapa pukan

Sumber pukan	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe
	ppm						
Sapi perah	0,53	0,35	0,41	0,28	0,11	0,05	0,004
Sapi daging	0,65	0,15	0,30	0,12	0,10	0,09	0,004
Kuda	0,70	0,10	0,58	0,79	0,14	0,07	0,010
Unggas	1,50	0,77	0,89	0,30	0,88	0,00	0,100
Domba	1,28	0,19	0,93	0,59	0,19	0,09	0,020

Sumber: Tan (1993)

Tabel 2. Kandungan hara dari pukan padat/segar

Sumber pukan	Kadar air	Bahan organik	N	P_2O_5	K_2O	CaO	Rasio C/N
				%			
Sapi	80	16	0,3	0,2	0,15	0,2	20-25
Kerbau	81	12,7	0,25	0,18	0,17	0,4	25-28
Kambing	64	31	0,7	0,4	0,25	0,4	20-25
Ayam	57	29	1,5	1,3	0,8	4,0	9-11
Babi	78	17	0,5	0,4	0,4	0,07	19-20
Kuda	73	22	0,5	0,25	0,3	0,2	24

Sumber: Pinus Lingga (1991)

Pupuk kandang ayam

Pemanfaatan pukan ayam termasuk luas. Umumnya diperguna-kan oleh petani sayuran dengan cara mengadakan dari luar wilayah tersebut, misalnya petani kentang di Dieng mendatangkan pukan ayam yang disebut dengan *chiken manure (*CM) atau kristal dari Malang, Jawa Timur.

Pupuk kandang ayam broiler mempunyai kadar hara P yang relatif lebih tinggi dari pukan lainnya. Kadar hara ini sangat dipengaruhi oleh jenis konsentrat yang diberikan. Selain itu pula dalam kotoran ayam tersebut tercampur sisa-sisa makanan ayam serta sekam sebagai alas kandang yang dapat menyumbangkan tambahan hara ke dalam pukan terhadap sayuran.

Beberapa hasil penelitian aplikasi pukan ayam selalu memberikan respon tanaman yang terbaik pada musim pertama. Hal ini terjadi karena pukan ayam relatif lebih cepat terdekomposisi serta mempunyai kadar hara yang cukup pula jika dibandingkan dengan jumlah unit yang sama dengan pukan lainnya (Widowati *et al*., 2005). Pemanfaatan pukan ayam ini bagi pertanian organik menemui kendala karena pukan ayam mengandung beberapa hormon yang dapat mempercepat pertumbuhan ayam.

Pupuk kandang sapi

Di antara jenis pukan, pukan sapilah yang mempunyai kadar serat yang tinggi seperti selulosa, hal ini terbukti dari hasil pengukuran parameter C/N rasio yang cukup tinggi >40. Tingginya kadar C dalam pukan sapi menghambat penggunaan langsung ke lahan pertanian karena akan menekan pertumbuhan tanaman utama. Penekanan pertumbuhan terjadi karena mikroba dekomposer akan menggunakan N yang tersedia untuk mendekomposisi bahan organik tersebut sehingga tanaman utama akan kekurangan N. Untuk memaksimalkan penggunaan pukan sapi harus

dilakukan pengomposan agar menjadi kompos pukan sapi dengan rasio C/N di bawah 20.

Selain masalah rasio C/N, pemanfaatan pukan sapi secara langsung juga berkaitan dengan kadar air yang tinggi. Petani umumnya menyebutnya sebagai pupuk dingin. Bila pukan dengan kadar air yang tinggi diaplikasikan secara langsung akan memerlukan tenaga yang lebih banyak serta proses pelepasan amoniak masih berlangsung.

Pupuk kandang kambing

Tekstur dari kotoran kambing adalah khas, karena berbentuk butiran-butiran yang agak sukar dipecah secara fisik sehingga sangat berpengaruh terhadap proses dekomposisi dan proses penyediaan haranya. Nilai rasio C/N pukan kambing umumnya masih di atas 30. Pupuk kandang yang baik harus mempunyai rasio C/N <20, sehingga pukan kambing akan lebih baik penggunaannya bila dikomposkan terlebih dahulu. Kalaupun akan digunakan secara langsung, pukan ini akan memberikan manfaat yang lebih baik pada musim kedua pertanaman. Kadar air pukan kambing relatif lebih rendah dari pukan sapi dan sedikit lebih tinggi dari pukan ayam.

Kadar hara pukan kambing mengandung kalium yang relatif lebih tinggi dari pukan lainnya. Sementara kadar hara N dan P hampir sama dengan pukan lainnya.

Pupuk kandang babi

Pemanfaatan pukan babi di Indonesia hanya terdapat di beberapa lokasi tertentu yang berdekatan dengan peternakan babi. Pupuk kandang (pukan) babi mempunyai tekstur yang lembek dan akan bertambah cair bila bercampur dengan urine. Peternak babi telah mengetahui bagaimana cara memisahkan urine ini dengan padatannya, lalu menumpukkannya di suatu tempat untuk didekomposisikan terlebih dahulu. Petani di sekitar peternakan babi menggunakan pukan ini dengan dicampur dengan pukan ayam atau kambing, karena dari pengalaman petani jika pukan babi ini diaplikasikan secara terpisah pertumbuhan tanaman sayuran kurang baik.

Komposisi hara kotoran babi sangat dipengaruhi oleh umur. Di negara-negara seperti Cina, Thailand, dan berbagai negara di Eropa telah dibedakan jenis pukan babi sesuai umur. Akan tetapi, secara umum pukan babi cukup mengandung hara P tetapi rendah Mg.

Pupuk kandang kuda

Jumlah populasi kuda lebih rendah dibanding ternak lainnya, sehingga jumlah kotoran kuda juga termasuk lebih sedikit volumenya. Pupuk kandang (pukan) kuda banyak dipergunakan oleh petani sekitar peternakan

kuda saja. Sebelum, digunakan kotoran kuda dimasukkan dalam lubang dan dibiarkan terdekomposisi secara alami kemudian baru digunakan untuk pertanian.

Apabila dibandingkan dengan kotoran sapi, kotoran kuda mempunyai rasio C/N lebih rendah. Rendahnya rasio C/N ini berkaitan dengan jenis pakan misalnya dedak. Hasil analisis pukan kuda ternyata banyak mengandung hara Mg.

Kompos pupuk kandang

Pengomposan diartikan sebagai proses dekomposisi secara biologi untuk mencapai bahan organik yang stabil. Proses pengomposan menghasilkan panas. Dengan dihasilkannya panas maka akan dihasilkan produk kompos akhir yang stabil, bebas dari patogen dan biji-biji gulma, berkurangnya bau, dan lebih mudah diaplikasikan ke lapangan. Selain itu perlakuan pengomposan dapat meningkatkan ketersediaan hara bagi tanaman karena perubahan bentuk dari tidak tersedia menjadi mudah tersedia. Pada Tabel 3 dan 4, di bawah adanya pengomposan meningkatkan kadar hara N, P, K, Ca, dan Mg; menurunkan rasio C/N dan kadar air per unit yang sama.

Tabel 3. Kadar hara beberapa bahan dasar pupuk organik sebelum dikomposkan

Jenis bahan asal	Kadar hara (g 100 g^{-1})				
	C	N	C/N	P	K
Bahan segar	%			%	
Kotoran sapi	63,44	1,53	41,46	0,67	0,70
Kotoran kambing	46,51	1,41	32,98	0,54	0,75
Kotoran ayam	42,18	1,50	28,12	1,97	0,68
Kompos		%		%	
Sapi		2,34	16,8	1,08	0,69
Kambing		1,85	11,3	1,14	2,49
Ayam		1,70	10,8	2,12	1,45

Sumber: Tim Balittanah

Beberapa keuntungan dan kelebihan pukan yang dikomposkan disajikan pada Tabel 5. Jika diperhatikan antara keuntungan dan kekurangannya, terlihat bahwa kompos pukan memberikan lebih banyak keuntungan. Aplikasi pukan yang telah dikomposkan berfungsi meningkatkan kesuburan kimia, fisik, dan biologi tanah.

Tabel 4. Kadar hara bahan segar dan hasil pengomposan (luar negeri)

	N	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	Bahan organik	Kadar air
Bahan segar					%		
Kot sapi	0,5	0,3	0,5	0,3	0,1	16,7	81,3
Kot kambing	0,9	0,5	0,8	0,2	0,3	30,7	64,8
Kot ayam	0,9	0,5	0,8	0,4	0,2	30,7	64,8
Kuda	0,5	0,3	0,6	0,3	0,12	7,0	68,8
Babi	0,6	0,5	0,4	0,2	0,03	15,5	77,6
Kompos					%		
Sapi	2,0	1,5	2,2	2,9	0,7	69,9	7,9
Kambing	1,9	1,4	2,9	3,3	0,8	53,9	11,4
Ayam	4,5	2,7	1,4	2,9	0,6	58,6	9,2

* dari berbagai sumber

Tabel 5. Keuntungan dan kekurangan dari kompos pukan

No.	Keuntungan	No.	Kekurangan
1.	Mengurangi masa dan volume (mengurangi biaya penyimpanan)	1.	Kehilangan NH_3 (N)
2.	Berkurangnya bau	2.	Diperlukan waktu dan tenaga
3.	Terbasminya patogen	3.	Pada awalnya memerlukan biaya investasi alat dan pengoperasiannya
4.	Biji-bijian gulma menjadi mati	4.	Dibutuhkan lahan untuk pengomposan
5.	Mempermudah transportasi	5.	Diperlukan pemasaran
6.	Memperbaiki kondisi tanah		
7.	Meningkatkan pelepasan hara-hara yang berkualitas lebih tinggi dari kompos (*release*) secara perlahan-lahan dalam waktu tertentu		
8.	Mengurangi sumber polusi – menstabilkan N yang mudah menguap menjadi bentuk lain seperti protein		
9.	Bernilai ekonomi		
10.	Meningkatkan daya memegang air tanah, sumber energi flora dan fauna tanah		

Hasil penelitian pembuatan kompos dari kotoran hewan menunjukkan bahwa 10-25% dari N dalam bahan asal kompos akan hilang sebagai gas NH_3 selama proses pengomposan. Selain itu dihasilkan pula 5% CH_4 dan sekitar 30% N_2O yang berpotensi untuk mencemari lingkungan sekitarnya (Stevenson, 1982).

Urine ternak

Urine ternak dapat dijumpai dalam jumlah besar selain kotoran dari ternak. Urine dihasilkan oleh ginjal yang merupakan sisa hasil perombakan nitrogen dan sisa-sisa bahan dari tubuh yaitu urea, asam uric dan creatinine hasil metabolisme protein. Urine juga berasal dari perombakan senyawa-senyawa sulfur dan fosfat dalam tubuh. Hasil analisis urine diperoleh kandungan bahan organik dan N urine cukup tinggi (Tabel 6).

Tabel 6. Kandungan hara urine ternak

Sumber pukan	Kadar air	Bahan organik	N	P_2O_5	K_2O	CaO
Sapi	92	4,8	1,21	0,01	1,35	1,35
Kerbau	81	-	0,6	sedikit	1,61	Sedikit
Kambing	86,3	9,3	1,47	0,05	1,96	0,16
Babi	96,6	1,5	0,38	0,10	0,99	0,02
Kuda	89,6	8,0	1,29	0,01	1,39	0,45

Sumber: Anonim (1993)

Urine ternak mengandung N ± 10 g l^{-1}, sebagian besar berbentuk urea. Urine juga mengandung sejumlah unsur-unsur mineral (S, P, K, Cl, dan Na) dalam jumlah bervariasi tergantung jenis dan makanan ternak, keadaan fisiologi dan iklim. Hara tersebut dibutuhkan oleh mikroba dan pertumbuhan tanaman. Urine terdiri atas 90–95% air. Urea dalam urine adalah bahan padat utama yang umumnya >70% nitrogen dalam urine (Anonim, 1993).

Dewasa ini urine ternak dimanfaatkan sebagai pupuk organik untuk tanaman bersamaan dengan kotoran ternak atau bahan lain seperti tembakau, nimba, teprosia dan bahan–bahan pestisida nabati lainnya. Cara pemberian pada sistem budi daya organik biasanya dikocorkan atau disiramkan ke tanaman. Penggunaan urine dengan pukan kambing sebagai pupuk telah dilakukan di lahan pertanian organik Kecamatan Koto, Kabupaten Tanah Datar Sumatera Barat (Yunaldi, 2006).

Pemanfaatan pupuk kandang dan pengaruhnya terhadap tanaman

Penggunaan bahan organik berupa pukan sudah dilakukan petani sejak lama, tapi penggunaannya dalam jumlah besar menimbulkan kesulitan dalam sumber penyediaan, pengangkutan dan aplikasinya. Bahan organik dari kotoran hewan dapat berupa pukan ayam, kambing, sapi, kerbau, baik digunakan secara langsung atau dikomposkan terlebih dahulu. Pupuk kandang dapat berasal dari peternakan sendiri, dari sekitar lokasi lahan pertanian atau didatangkan dari lokasi lain.

Pupuk kandang adalah sumber beberapa hara seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan lainnya. Bagaimanapun, nitrogen adalah salah satu hara utama bagi sebagian besar tanaman yang dapat diperoleh dari pukan. Kekurangan kalium pada sebagian lokasi tertentu tidak dapat dikoreksi dengan takaran umum pukan. Kebutuhan beberapa tanaman dapat diperoleh dengan aplikasi pukan >25 t ha^{-1}.

Nitrogen dari pukan umumnya dirubah menjadi bentuk nitrat tersedia. Nitrat adalah mudah larut dan bergerak ke daerah perakaran tanaman. Bentuk ini sama dengan bentuk yang bisa diambil oleh tanaman dari sumber pupuk anorganik dari pabrik.

Pupuk kandang mengandung unsur hara dengan konsentrasi yang bervariasi tergantung jenis ternak, makanan, umur, dan kesehatan ternak. Biasanya petani selain mengusahakan lahan juga mengusahakan ternak, sehingga pukan merupakan komponen pupuk pertanian. Akan tetapi pukan yang tersedia kurang mencukupi kebutuhan, sehingga penggunaannya kadang kurang memberikan peningkatan hasil yang berarti dan kontinu.

Penggunaan pukan sebagai pupuk tanaman merupakan suatu siklus unsur hara yang sangat bermanfaat dalam mengoptimalkan penggunaan sumber daya alam yang terbarukan, disisi lain penggunaan pukan dapat mengurangi unsur hara yang bersifat racun bagi tanaman.

Aplikasi pupuk kandang di lahan sawah

Pemanfaatan pukan untuk padi sawah jumlahnya jauh lebih sedikit daripada untuk lahan kering (pangan dan sayuran). Jumlah maksimum pukan yang umum dipergunakan petani padi sawah <2 t pukan ha^{-1}, sedangkan petani sayuran mencapai 25-75 t ha^{-1}. Hasil-hasil penelitian aplikasi pukan pada lahan sawah yang dikombinasikan dengan pupuk anorganik dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik dalam kisaran 2-20%. Pukan selain mengandung hara-hara yang dibutuhkan oleh tanaman juga mengandung asam-asam humat, fulvat, hormon tumbuh dan lain-lain yang bersifat memacu pertumbuhan tanaman sehingga serapan hara oleh tanaman meningkat (Tan, 1993).

Penelitian yang telah dilaksanakan di sembilan lokasi di Jepang dengan perlakuan pemberian pukan secara jangka panjang dapat meningkatkan kadar humus dalam kisaran 0,8-3,0%; meningkatkan N-total dan tersedia, P-tersedia, dan Si; meningkatkan kapasitas *buffer* tanah, KTK, dan basa-basa dapat tukar terutama Ca dan K; menurunkan Na-dd. Ketersediaan K dalam bentuk tidak tersedia hanya cenderung meningkat (Yamashita, 1967).

Kombinasi pemupukan SP-36 100 kg ha^{-1} dengan kompos jerami dan pukan kerbau masing-masing 5 t ha^{-1} meningkatkan pertumbuhan tanaman dan bobot kering gabah. Pemberian jerami dan pukan kerbau meningkatkan serapan hara K. Berdasarkan hal tersebut, pemupukan P yang dikombinasikan dengan pemberian jerami dan pukan disarankan pada lahan sawah yang berkadar bahan organik rendah dan kahat K (Suriadikarta *et al*., 2003).

Jolid dan Herwan (1987) melaporkan bahwa pemberian pukan 5 t ha^{-1} dan kapur 1 t ha^{-1} serta pemupukan 45 kg N, 45 kg P_2O_5 dan 60 kg K_2O ha^{-1} meningkatkan hasil padi 1-2 t ha^{-1} dibandingkan kontrol pada lahan sawah bukaan baru, Bangkinang, Riau.

Aplikasi pupuk kandang di lahan kering

Pada lahan kering, pukan dapat diaplikasikan dengan beberapa cara yaitu disebar di permukaan tanah kemudian dicampur pada saat pengolahan tanah, dalam larikan, dan dalam lubang-lubang tanam. Metode aplikasi berkaitan dengan jenis tanaman yang akan ditanam. Selain itu jumlah pukan yang diberikanpun jumlahnya sangat berbeda. Seperti pemberian pukan pada tanaman sayuran mencapai 20-30 t ha^{-1}, sedangkan tanaman pangan lahan kering seperti jagung, kedelai, padi gogo dan lain-lain sejumlah 1-2 t ha^{-1}.

Pemberian pukan ayam sebesar 2 t ha^{-1} dengan kadar N, P_2O_5 dan K sebesar berturut-turut 0,76%, 14,13%, dan 0,1% pada lahan kering di Pleihari-Kalimantan Selatan meningkatkan produksi biji kering pipilan sebesar 4% (Sudriatna *et al*., 2005). Pengaruh pemberian pukan tidak terlalu besar pada pertanaman pertama. Hasil penelitian Sutriadi *et al*. (2005), menunjukkan bahwa dengan aplikasi pukan ayam sebesar 2 t ha^{-1} meningkatkan produksi jagung sebanyak 6% pada musim pertama sedangkan pada musim kedua sebesar 40% pada perlakuan tanpa dan dengan bahan organik, peningkatan antar musim mencapai enam setengah kali. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh pemberian pukan umumnya terlihat terutama pada musim kedua (residu).

Kualitas pukan sangat berpengaruh terhadap respon tanaman. Pupuk kandang (pukan) ayam secara umum mempunyai kelebihan dalam kecepatan penyediaan hara, komposisi hara seperti kadar N, P, K, dan Ca dibanding

pukan sapi dan kambing. Pada pengujian Widowati *et al.* (2004), pemberian pukan ayam menghasilkan produksi tertinggi pada tanaman sayuran selada pada tanah Andisol Cisarua dengan takaran optimum ± 25 t ha^{-1}. Demikian pula hasil penelitian Suastika *et al*. (2005), diperoleh hasil yang sama dimana pemberian pukan ayam takaran 1 t ha^{-1} yang dikombinasikan dengan fosfat alam Tunisia sebesar 1 t ha^{-1} pada tanah Oxisol Pleihari menghasilkan 4,21 t ha^{-1} jagung sedangkan yang menggunakan pukan sapi dengan takaran dan fosfat alam Tunisia yang sama hanya diperoleh 2,96 t ha^{-1}. Namun demikian penggunaan pukan sapi juga telah dipergunakan secara meluas. Hasil penelitian Sunarti (2000), pada tanah Podzolik Merah Kuning Desa Batin Jambi yang menggunakan pukan sapi dengan diberi mulsa jerami diperoleh takaran maksimum sebesar 18,18 t ha^{-1} dengan tanaman indikator jagung diperoleh produksi sebesar 6,35 t ha^{-1}. Syukur *et al*. (2000), yang telah mengaplikasikan pukan sapi pada tanaman turus nilam pada tanah Regosol memperoleh takaran maksimum sebesar 20 t ha^{-1}, demikian juga dengan serapan hara N, P, dan K yang tertinggi pula.

Adimihardja *et al.* (2000) melaporkan pemberian beberapa jenis pukan sapi, kambing dan ayam dengan takaran 5 t ha^{-1} pada tanah Ultisol Jambi nyata meningkatkan kadar C-organik tanah, dan hasil jagung dan kedelai (Tabel 7 dan 8).

Tabel 7. Rata-rata kadar C-organik tanah, pada penelitian penggunaan berbagai jenis dan takaran pupuk kandang di Desa Batin, Jambi

Pelakuan	Kadar C-organik	
	1998	1999
	%	
Pukan sapi		
0	1,86	1,47
5	1,90	1,64
10	1,90	1,92
20	2,11	1,74
Pukan kambing		
0	1,84	1,63
5	1,58	1,72
10	1,25	1,77
20	1,63	1,74
Pukan ayam		
0	1,80	1,62
5	1,83	1,50
10	1,79	1,71
20	1,83	1,71

Sumber: Adimihardja *et a*l., 2000

Tabel 8. Rata-rata hasil pipilan kering jagung dan kedelai pada penelitian penggunaan pukan di Desa Batin, Jambi

Takaran pupuk	Hasil jagung dan keledai							
	Pukan sapi		Pukan kambing		Pukan ayam		Rata-rata	
	1997/98 (jagung)	1998/99 (kedelai)	1997/98 (jagung)	1998/99 (kedelai)	1997/98 (jagung)	1998/99 (kedelai)	1997/98 (jagung)	1998/99 (kedelai)
	t ha^{-1}							
0	1,37	0,87	1,48	0,93	1,52	0,86	1,46 a	0,89 a
5	2,98	1,31	2,04	1,26	2,38	1,26	2,47 b	1,26 b
10	3,05	1,37	3,14	1,23	2,74	1,32	2,98 b	1,35 b
20	3,45	1,43	2,89	1,47	3,63	1,47	3,32 c	1,45 c
Rata-rata	2,71 A*	1,24 A	2,38 A	1,24 A	3,16 B	1,23 A		

- Angka dalam kolom atau baris yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda pada taraf 5% uji Duncan.

Sumber: Adimihardja *et a*l., 2000

Menurut Darmijati (1987) pemberian pukan pada Ultisols Sitiung lebih baik pengaruhnya terhadap hasil kedelai dibandingkan sumber bahan organik lain yaitu jerami padi, brangkasan jagung dan daun lamtoro sebagai pupuk hijau pada takaran 6 t ha^{-1}. Pemberian bahan organik kotoran ayam 5 t ha^{-1} sedikit meningkatkan hasil kacang tanah dan peningkatan takaran pemberian sampai 20 t ha^{-1} tidak nyata meningkatkan hasil. Pengaruh bahan organik akan semakin nyata bila dikombinasikan dengan kapur. Burbey *et al.* (1998) menyatakan bahwa pemberian bahan organik 5 t ha^{-1} dan kapur 3 t ha^{-1} dapat meningkatkan hasil kedelai dua kali lipat dibandingkan kontrol.

Pemberian bahan organik berupa pukan 10 t ha^{-1} dan pupuk hijau *Setaria* sp. 5 t ha^{-1} meningkatkan kandungan C dan N-organik serta KTK tanah. Bahan organik yang diberikan ke dalam tanah akan terdekomposisi sehingga meningkatkan C dan N-organik tanah (Tabel 9) (Nursyamsi *et al.*, 1995).

Tabel 9. Sifat kimia tanah pada perlakuan bahan organik dan kombinasi pupuk P dan K setelah percobaan

Sifat tanah	Petak utama		
	Tanpa bahan organik	Pupuk kandang	Pupuk hijau
pH H_2O	4,67	4,47	4,75
C-org (%)	1,60	1,84	1,71
N-org (%)	0,14	0,17	0,16
P-Bray 1 (ppm P_2O_5)	91,58	103,74	101,91
KTK (me 100g^{-1})	11,51	12,92	12,49

Sumber: Nursyamsi *et al.*, 1995

Penelitian respon tanaman jagung terhadap bahan organik pada tanah Ultisol Rangkasbitung Jawa Barat menunjukkan bahwa pemupukan NPK disertai pemberian pukan 5 t ha^{-1} meningkatkan hasil jagung dari 1,5 menjadi 2,4 t ha^{-1} dibandingkan hanya menggunakan pupuk anorganik NPK (Tabel 10) (Suriadikarta dan Widjaja-Adhi, 1986). Agus (2000) mengemukakan penggunaan pukan 10–15 t ha^{-1} dapat menyumbangkan hara sebanyak 26 kg N, 60 kg P dan 10 kg K sehingga dapat menyediakan sebagian kebutuhan hara bagi tanaman.

Pemberian pukan 5 t ha^{-1} dikombinasikan dengan pemupukan NPK (90-45-80) pada tanaman jagung pada lahan kering masam dapat memberikan hasil biji pipilan 3,4 t ha^{-1}, yaitu 1,9 t ha^{-1} lebih tinggi dari pemupukan NPK saja. Sedangkan pemberian serasah sisa panen 5 t ha^{-1} (50-90-80) pada tanaman kedelai memberikan hasil 2,3 t biji kering ha^{-1}, terjadi peningkatan 0,9 t ha^{-1} dibandingkan pemupukan NPK saja, demikian juga terjadi peningkatan hasil ubi kayu sekitar 10 t ha^{-1} (Adiningsih *et al.*, 1995).

Tabel 10. Produksi jagung pada percobaan pemupukan, pengapuran, dan bahan organik di Rangkasbitung

Perlakuan	Hasil
	ku ha^{-1}
NPK	14,6
NPK + pukan	23,6
NPK + kapur	27,7
NPK + kapur + pukan	33,1

Takaran N, P, K masing-masing: 90 kg N ha^{-1} ; 2 0 kg P ha^{-1}; dan 78 kg K ha^{-1}
Pupuk kandang (kotoran sapi) 4,8 t ha^{-1}
Kapur: 1 x Al-dd
Sumber: Suriadikarta dan Widjaja-Adhi, 1986.

Purnomo *et al*. (2000) meneliti pengaruh bahan organik berupa pukan dan rumput *Stylosanthes guyanensis* sebagai mulsa serta pemupukan P pada Dystropepts Jambi meningkatkan hasil jagung (Tabel 11). Pada penelitian ini pukan diberikan 3 t ha^{-1} secara larikan pada baris tanaman. Rata-rata hara dalam pukan adalah C-organik, N, P, K, Ca dan Mg masing-masing adalah 25,4; 1,79; 0,45; 0,81; 0,57; dan 0,24%. Sedangkan rumput *Stylosanthes guyanensis* ditanam dalam barisan di antara tanaman jagung dengan jarak antar *stylo* 75 cm, rumput ini dipangkas pertama umur 2,5 bulan, diberikan sebagai mulsa. Biomassa dan kadar hara pangkasan *stylo* disajikan pada Tabel 12.

Tabel 11. Interaksi antara bahan organik dan pemupukan P terhadap hasil biji jagung pada pengelolaan P dan bahan organik MT I di Jambi

Sumber P	Hasil biji jagung		
	Tanpa bahan organik	Pukan	*Stylo*
	kg ha^{-1}		
Kontrol	293 a*	543 a	465 a
P-alam	517 a	1.611 bcd	857 ab
SP-36 (2)	1.514 bcd	2.265 de	1.729 cde

* Angka dalam kolam yang sama dan didampingi huruf sama tidak berbeda nyata pada uji Duncan's 5%.

Sumber:Purnomo *et al*., 2000

Tabel 12. Berat kering dan kadar hara pangkasan *stylo* I di Pauh Menang, MH 1997/1998

Perlakuan	Pangkasan	Kandungan hara					
		N	P	K	Ca	Mg	S
	kg ha^{-1}	%					
Stylo	1,68 a*	2,20 a	0,10 b	1,81 a	1,08 a	0,23 a	0,17 a
SP-36 + *stylo*	2,18 ab	2,17 a	0,14 a	1,87 a	0,84 a	0,26 a	0,16 a
P-alam + *stylo*	2,79 b	2,42 a	0,14 a	2,15 a	0.93 a	0,31 a	0,16 a

* Angka dalam kolom yang sama dan didampangi huruf sama tidak berbeda nyata pada uji Duncan's 5%.

Sumber: Purnomo *et al*., 2000

Park (1988) *dalam* Jo (1990) melaporkan bahwa tanggap tanaman terhadap kompos lebih besar di lahan kering daripada lahan sawah. Hasil padi sawah meningkat 2-4% dengan pemberian kompos sedangkan hasil palawija di lahan kering meningkat 9-48%. Selanjutnya Park (1990) mengemukakan pemberian kompos pada beberapa jenis tanaman pangan meningkatkan hasil tanaman (Tabel 13). Serta pemberian 20 t kompos ha^{-1} meningkatkan hasil sayur 11-24%, dan pemberian 15 t kompos ha^{-1} meningkatkan hasil kentang 7-15% pada tanah aluvial masam, serta petchai 6% pada tanah aluvial netral.

Menurut Dariah dan Rahman (1989). Penggunaan mulsa baik berupa hijauan *alley* maupun pukan dapat memperbaiki beberapa sifat fisik tanah, antara lain bobot isi semakin rendah, meningkatkan ruang pori total dan pori drainase cepat selanjutnya dapat meningkatkan aerasi tanah (Tabel 14).

Tabel 13. Pengaruh pemberian pupuk organik terhadap hasil beberapa tanaman

Tanaman	Rata-rata	
	NPK	NPK + kompos
	kg ha^{-1}	
Padi	4.780	4.970
Kedelai	1.530	1.930
Barley	1.800	2.270
Gandum	1.900	2.240

Sumber: Park, 1990

Tabel 14. Pengaruh macam dan takaran mulsa terhadap sifat fisik tanah Citayam Jawa Barat

Perlakuan	Takaran	Bobot isi	Ruang pori	Pori drainase		Pori air tersedia
				Cepat	lambat	
	t ha^{-1}	g cc^{-1}	%			
F. congesta	10	0,88	66,8	27,9	3,9	10,6
	20	0,85	67,9	30,2	3,9	13,6
Gliricidia sp.	10	0,89	66,4	26,3	4,8	10,3
	20	0,86	67,6	28,6	5,5	8,9
Pupuk kandang	10	0,89	66,4	27,2	4,7	9,0
	20	0,87	67,2	28,2	5,1	9,8
Kontrol		0,93	64,9	21,7	4,7	11,8

Sumber: Dariah dan Rahman, 1989

Penggunaan beberapa jenis pukan pada tanaman kubis nyata meningkatkan hasil panen dan memberikan pendapatan yang cukup tinggi (Tabel 15). Di antara empat jenis sumber pukan yang dicoba pukan ayam memberikan produksi dan pendapatan petani sedikit lebih tinggi dibandingkan pukan lainnya. Hal ini disebabkan pukan ayam umumnya mempunyai kadar hara relatif lebih tinggi dan rasio C/N yang lebih rendah sehingga lebih cepat tersedia untuk tanaman kubis (Warjito,1994).

Setyorini *et al*. (2004) melaporkan pemupukan pukan dalam budi daya sayuran organik menunjukkan bahwa kompos pukan sebanyak 20 t ha^{-1} dan kompos *Tithonia diversifolia* sebanyak 3 t ha^{-1} dan kombinasi keduanya dapat memenuhi kebutuhan hara sayuran tomat dan caisin, selada dan kangkung. Kompos pukan dari kotoran ayam 20 t ha^{-1} atau sapi 20 t ha^{-1} ditambah dengan kompos *Tithonia diversifolia* 3 t ha^{-1} memberikan hasil terbaik (Tabel 16 dan 17).

Tabel 15. Pengaruh beberapa jenis pukan terhadap produksi kubis pada tanah Andisol KP Lembang dan pendapatan yang diperoleh

Takaran pupuk kandang	Produksi kubis			
	Ayam	Kambing	Sapi	Kuda
	t ha^{-1}			
5	11,70	10,76	12,05	11,71
10	12,24	11,38	11,38	11,57
15	14,48	11,19	12,10	11,90
20	10,90	11,05	12,29	12,62
	Pendapatan*			
	Ayam	Kambing	Sapi	Kuda
	Rp			
5	4.680.000	4.304.000	4.820.000	4.916.000
10	4.896.000	4.552.000	4.552.000	4.684.000
15	5.392.000	4.476.000	4.840.000	4.760.000
20	4.360.000	4.420.000	4.916.000	5.048.000

Sumber: Warjito, 1994

*Dijual pada tingkat harga Rp 400,- kg^{-1}

Tabel 16. Produksi tomat dan caisim pada pertanaman I di Permata Hati Farm

Perlakuan	Produksi tomat*	Produksi caisim*
	t ha^{-1}	
1. Praktek petani	19,70 a*	13,6 a
2. Kompos tithonia	21,66 a	9,4 bc
3. Kompos kirinyu	18,56 a	8,8 bc
4. Kompos pukan sapi	14,79 a	8,9 bc
5. Kompos BPTP DKI	17,86 a	12,0 ab
6. Kompos sisa tanaman	19,27 a	9,6 bc
7. Kompos pukan sapi + tithonia	18,87 a	10,1 bc
8. Kompos pukan ayam + tithonia	24,45 a	13,4 a
9. Kompos BPTP DKI + tithonia	16,17 a	8,1 c
10.Kompos sisa tanaman + tithonia	14,74 a	8,3 c

Sumber: Setyorini *et al*. (2004)

* Angka dalam kolom atau baris yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji Duncan

Tabel 17. Produksi selada dan kangkung pada pertanaman II di Permata Hati Farm

Perlakuan	Produksi selada	Produksi kangkung
	t ha^{-1}	
1. Praktek petani	7,75 a *	4,02 a
2. Kompos tithonia	5,04 abc	1,64 b
3. Kompos kirinyu	4,17 bc	2,83 b
4. Kompos pukan sapi	4,02 c	2,24 b
5. Kompos BPTP DKI	4,81 bc	1,92 b
6. Kompos sisa tanaman	5,21 abc	2,05 b
7. Kompos pukan sapi + tithonia	5,76 abc	2,29 b
8. Kompos pukan ayam + tithonia	7,00 ab	2,39 b
9. Kompos BPTP DKI + tithonia	4,89 abc	1,83 b
10.Kompos sisa tanaman + tithonia	4,95 abc	1,63 b

Sumber: Setyorini *et al*. (2004)

* Angka dalam kolom atau baris yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji Duncan

Hartatik *et al*. (2005) melaporkan pemupukan pukan yang diperkaya fosfat alam, dolomit dan abu sekam pada sistem budi daya sayuran organik menunjukkan bahwa perlakuan pukan ayam 20 t ha^{-1} yang diperkaya abu sekam sebesar 0,25% dari pukan (50 kg ha^{-1}) yang dikombinasikan dengan kompos *Tithonia diversifolia* 3 t ha^{-1} meningkatkan produksi tomat pada percobaan rumah kaca.

Monitoring perubahan sifat-sifat kimia tanah menunjukkan bahwa nilai pH H_2O dan KCl setelah penanaman mukuna umumnya meningkat dari 4,5 menjadi 5,7. Kadar C-organik, N-total umumnya lebih rendah setelah penanaman tomat + selada berturut-turut dari 4,31% menjadi 3,51% untuk C-organik, dari 0,5% menjadi 0,42% untuk N-total. Kadar Ca dan Mg dapat ditukar meningkat dari 4,57 menjadi 8,17 me $100g^{-1}$ untuk kadar Ca-dd dan kadar Mg-dd dari 1,69 menjadi 1,54 me $100g^{-1}$. Kejenuhan basa umumnya meningkat dari 15 menjadi 54%, sedangkan KTK menurun dari 44,12 menjadi 9,24 me $100g^{-1}$ setelah penanaman tomat + selada.

Perubahan sifat fisika tanah berupa bobot isi dan ruang pori total umumnya tidak menunjukkan perubahan setelah penanaman tomat + selada. Terjadi penurunan pori drainase cepat, permeabilitas tanah, dan sebaliknya terjadi peningkatan ketersediaan air. Hal ini karena dengan semakin bertambahnya waktu maka dekomposisi pupuk organik semakin tinggi, sehingga pupuk organik menjadi semakin halus. Stabilitas agregat umumnya tidak banyak berubah setelah penanaman tomat + selada.

Perubahan sifat-sifat biologi tanah lebih nyata dibandingkan perubahan sifat kimia dan fisika tanah. Setelah penanaman tomat + selada terjadi peningkatan total mikroba, pelarut fosfat, selulolitik, rhizobia, dan C-mic.

Penambahan kompos pukan ayam atau kambing sebanyak 20 t ha^{-1} yang diperkaya dengan abu sekam 50 kg ha^{-1} dan kompos *Tithonia diversifolia* 3 t ha^{-1} mampu menyediakan hara yang cukup untuk tanaman tomat dan bit. Kompos pupuk kandang ayam 20 t ha^{-1} yang diperkaya dengan dolomit 20 kg ha^{-1} dan fosfat alam 50 kg ha^{-1} mampu meningkatkan produksi selada dan caisim (Tabel 18 dan 19).

Tabel 18. Rataan produksi tomat dan selada

No.	Perlakuan	Produksi tomat	Produksi selada
		t ha^{-1}	
1.	K. pukan kambing + abu sekam + k. tithonia	54,8 a*	3,3 bc
2.	K. pukan ayam + abu sekam + k. tithonia	35,3 a	3,1 c
3.	K. pukan kambing + dolomit + fosfat alam	32,5 a	4,5 ab
4.	K. pukan ayam + dolomit + fosfat alam	34,3 a	4,8 a
5.	K. pukan kambing + dolomit + fosfat alam + pupuk hijau tithonia	26,9 a	3,0 c
6.	Kontrol petani	39,3 a	4,3 abc

Sumber: Hartatik *et al*. (2005)

* Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata menurut uji DMR pada taraf 5%

Tabel 19. Rataan produksi bit dan caisim

No.	Perlakuan	Produksi bit	Produksi caisim
		t ha^{-1}	
1.	K. pukan kambing + abu sekam + k. tithonia	6,9 a*	7,1 b
2.	K. pukan ayam + abu sekam + k. tithonia	10,6 a	7,2 b
3.	K. pukan kambing + dolomit + fosfat alam	8,9 a	6,7 b
4.	K. pukan ayam + dolomit + fosfat alam	9,4 a	12,3 a
5.	K. pukan kambing + dolomit + fosfat alam + pupuk hijau tithonia	7,8 a	7,9 b
6.	Kontrol petani	7,9 a	8,3 b

Sumber: Hartatik *et al*. (2005)

* Angka dalam kolom atau baris yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% uji Duncan

Kebijakan pengelolaan pupuk kandang

Pupuk kandang merupakan pupuk yang berasal dari kotoran hewan baik dalam bentuk segar atau sudah dikomposkan berupa padat atau cair. Pupuk kandang bersifat *bulky* dengan kandungan hara makro dan mikro rendah sehingga sebagai pupuk diperlukan dalam jumlah banyak. Keuntungan utama penggunaan pukan selain sebagai sumber hara tanaman adalah dapat memperbaiki kesuburan tanah baik sifat kimia, fisik, dan biologi tanah. Selain mengandung hara bermanfaat, pukan juga mengandung bakteri saprolitik, pembawa penyakit, dan parasit mikroorganisme dan pembawa biji-biji gulma.

Penggunaan pukan sebagai pupuk bagi tanaman dapat bermanfaat dalam mengurangi pencemaran lingkungan karena pukan tersebut tidak dibuang disembarang tempat yang dapat mengotori lingkungan dan badan perairan umum. Selain itu penggunaan pukan bermanfaat dapat mengurangi logam-logam berat yang bersifat racun bagi tanaman dan juga dapat dipergunakan dalam mereklamasi lahan yang tercemar, seperti lahan-lahan bekas tambang.

Di Indonesia pukan yang umum digunakan berasal dari kotoran sapi, kerbau, kambing, kuda, ayam, dan daerah tertentu kotoran babi. Jika diasumsikan ternak sapi atau kerbau atau kuda dewasa, dapat memproduksi kotoran rata-rata seberat 3 kg hari^{-1}, dan kambing atau domba sekitar 1 kg hari^{-1}, serta ayam menyumbangkan kotoran sekitar 200 g hari^{-1}. Berdasarkan data populasi ternak di Indonesia maka dapat dihitung/diestimasi produksi kotorannya dalam waktu satu tahun sejumlah 114,45 juta t (Tabel 20).

Tabel 20. Populasi ternak dan unggas dan estimasi kotoran ternak basah yang dihasilkan tahun 2004

No.	Jenis ternak	Jumlah ternak*	Kotoran ternak basah
		ekor	juta t tahun^{-1}
1.	Sapi perah dan potong	11.107.800	12,16
2.	Kerbau	2.572.400	2,82
3.	Kuda	432.100	0,47
4.	Kambing	13.441.700	4,91
5.	Domba	8.245.800	3,01
6.	Ayam	1.247.636.000	91,08
	Jumlah		114,45

* Sumber: BPS (2004)

Apabila kotoran ternak tersebut dikomposkan, dengan asumsi terjadi penyusutan sekitar 30-40%, maka akan diperoleh kompos pukan sebesar 45,8 juta t tahun^{-1}. Bila dimanfaatkan sebagai pupuk untuk tanaman pangan, maka per musim tanam akan tersedia 23 juta ton pupuk kandang. Dengan rekomendasi umum pukan 2 t ha^{-1}, maka luas lahan sawah atau lahan kering yang dapat dipupuk sekitar 11,5 juta ha. Walaupun potensi pupuk kandang cukup besar namun pemanfaatannya menghadapi beberapa kendala diantaranya: (1) lokasi penghasil kotoran ternak terpisah-pisah; (2) karena pupuk kandang bersifat *bulky* diperlukan penyimpanan dan transportasi yang cukup mahal; (3) pukan segar sebaiknya dikomposkan terlebih dahulu, sehingga diperlukan teknologi pengomposan yang efektif dan efisien; (4) komposisi fisik, kimia dan biologi pupuk kandang bervariasi, sehingga kandungan hara dalam kompos rendah dan kurang seimbang; (5) pengaruhnya pukan terhadap tanaman bervariasi dan umumnya tidak bisa dilihat secara cepat; dan (6) pukan biasanya mengandung biji gulma dan patogen serta logam berat.

Berbagai hasil penelitian mengindikasikan bahwa sebagian besar lahan pertanian intensif telah mengalami degradasi dan penurunan produktivitas lahan, terutama di lahan sawah intensif di Jawa dimana kandungan C-organik dalam tanah <2%, disisi lain kita mempunyai potensi pukan yang cukup besar belum dimanfaatkan secara optimal.

Pemanfaatan pukan untuk meningkatkan produktivitas lahan dan produksi pertanian perlu dipromosikan dan digalakkan kembali. Oleh karena itu program-program pengembangan pertanian yang meng-integrasikan ternak dan tanaman (*crop live stock*) perlu diintensifkan. Pengadaan pukan hendaknya berasal dari lokasi tersebut sehingga tidak memerlukan transportasi dan dikelola dalam suatu kelompok tani. Pemberdayaan masyarakat dalam pengadaan kompos pukan dapat dilakukan melalui: (a) melatih petani dalam mengkomposkan pukan dan (b) mendorong petani melakukan diversifikasi usaha pertanian berbasis ternak. Untuk mendapatkan kompos pukan yang berkualitas baik diperlukan fasilitas/insentif dari pemerintah berupa mikroba dekomposer untuk mempercepat proses pengomposan. Pengadaan kompos pukan dalam skala besar perlu difasilitasi oleh pemerintah terutama dalam teknik produksi dan distribusinya.

DAFTAR PUSTAKA

Adimihardja, A., I. Juarsah, dan U. Kurnia. 2000. Pengaruh pengunaan berbagai jenis dan takaran pupuk kandang terhadap produktivitas tanah Ultisols terdegradasi di Desa Batin, Jambi. hlm. 303-319 *dalam* Pros. Seminar Nasional Sumber Daya Tanah, Iklim, dan Pupuk. Buku II. Lido-Bogor, 6-8 Des.1999. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Adiningsih, J.S., D. Setyorini dan Tini Prihatini. 1995. Pengelolaan hara terpadu untuk mencapai produksi pangan yang mantap dan akrab lingkungan. hlm. 55-69. *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat: Makalah Kebijakan. Bogor, 10-12 Januari 1995. Puslittanak, Bogor.

Agus, F. A. 2000. Konstribusi bahan organik untuk meningkatkan produksi pangan pada lahan kering bereaksi masam. hlm. 87-104. *Dalam* Pros. Seminar Nasional Sumber Daya Lahan. Buku III. Cisarua-Bogor, 9-11 Februari 1999. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Anonim, 1993. Urine-A Wasted, Renewable Natural Resource. Noragric. Norwegia.

BPS. 2004. Statistik Indonesia. Badan Pusat Statistik. Jakarta.

Burbey, D. Alamsyah, A. Sahar, dan Z. Zaini. 1998. Tanggap tanaman kedelai terhadap pemberian fosfor dan pupuk kandang pada berbagai takaran kapur. PP Sukarami 13: 30-35.

Dariah, A. dan A. Rahman. 1989. Pengaruh mulsa hijauan *Alley cropping* dan pupuk kandang terhadap pertumbuhan dan hasil jagung serta beberapa sifat fisik tanah. hlm. 99-106. *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Bidang Konservasi Tanah dan Air. Bogor, 22-24 Agustus 1989. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Darmijati, S. 1987. Tanggap empat varietas kacang tanah terhadap pemberian bahan organik. PP Sukarami 10: 17-21.

Hartatik, W., D. Setyorini, L.R. Widowati, dan S. Widati. 2005. Laporan Akhir Penelitian Teknologi Pengelolaan Hara pada Budidaya Pertanian Organik. Laporan Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Tanah dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif (Tidak dipublikasikan).

Jo, I.S. 1990. The use of organic fertilizer on soil physical properties and plant growth. Paper Presented at Seminar on the Use of Organic Fertilizers in Crop Production, at Suweon, South Korea, 18-24 June 1990 (Unpublished).

Jolid, N. dan Herwan. 1987. Pengaruh Pemupukan NPK, Kapur, Bahan Organik dan Hara Mikro terhadap Padi Sawah Bukaan Baru. Laporan Hasil Penelitian tahun 1987/1988.

Matarirano, L. 1994. Liquid manure is good fertilizer. Developing Countries Farm Radio Network. Oktober 1994, Paket 34, Naskah 3 (Unpublished).

Nuryamsi, D., O. Sopandi, D. Erfandi, Sholeh, dan I P.G. Widjaja-Adhi. 1995. Pengunaan bahan organik, pupuk P dan K untuk meningkatkan poduktivitas tanah podsolik (Typic Kandiudults).

Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat 2: 47-52. Pusat Penelitan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Park, Y.D. 1990. Utilization of organic wastes as fertilizers in Korea. Paper Presented at Seminar on the Use of Organic Fertilizers in Crop Production, at Suweon, South Korea, 18-24 June 1990 (Unpublished).

Pinus Lingga. 1991. Jenis dan Kandungan Hara pada Beberapa Kotoran Ternak. Pusat Pelatihan Pertanian dan Pedesaan Swadaya (P4S) ANTANAN. Bogor (Tidak dipublikasikan).

Price, M.L. 1984. How adequate is Chicken manure tea as a fertilizer. Echo Development Notes, Isu No. 9, September 1984. 6 p.

Purnomo, J., I G.P. Wigena, dan D. Santoso. 2000. Pengelolaan pupuk P dan bahan organik untuk meningkatkan produktivitas Dystropepts di Jambi, hlm. 235-251. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumber Daya Lahan. Buku III. Cisarua-Bogor, 9 – 11 Februari 1999. Pusat Penelitan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Setyorini, D., W. Hartatik, L.R. Widowati, dan S. Widati. 2004. Laporan Akhir Penelitian Teknologi Pengelolaan Hara pada Budidaya Pertanian Organik. Laporan Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Tanah dan Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipatif (Tidak dipublikasikan).

Stevenson. F.J. 1982. Humus Chemistry Genesis, Composition, Reaction. John Willey and Sons. New York.

Suastika, I.W., M.T. Sutriadi, dan A. Kasno. 2005. Pengaruh pupuk kandang dan fosfat alam terhadap produktivitas jagung di Typic Hapludox dan Plintic Kandiudults. Kalimantan Selatan. hlm. 191-201. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumber Daya Tanah dan Iklim. Buku II. Bogor, 14-15 September 2004. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Sudriatna, U., M.T. Sutriadi, R. Hidayat, dan J.S. Adiningsih. 2005. Tanggap pupuk kalium dan bahan organik terhadap pertumbuhan dan hasil jagung di tanah Oxisol Kalimantan Selatan. hlm. 123-141. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumber Daya Tanah dan Iklim. Buku II. Bogor, 14-15 September 2004. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Sunarti. 2000. Perbaikan beberapa sifat fisika Podzolik Merah Kuning serta hasil jagung (*Zea mays* L.) dengan menggunakan takaran pupuk kandang dan jenis mulsa yang berbeda. hlm. 419-428. *Dalam* Prosiding Kongres Nasional VIII HITI. Pemanfaatan Sumberdaya Tanah Sesuai dengan Potensinya Menuju Keseimbangan Lingkungan Hidup Dalam Rangka Meningkatkan Kesejahteraan Rakyat. Buku I. Bandung, 2-4 November 1999.

Suriadikarta, D.A. dan I P.G. Widjaja- Adhi. 1986. Pengaruh residu pupuk fosfat, kapur dan bahan organik terhadap kesuburan tanah dan hasil kedelai pada Ultisol Rangkasbitung. Pembrit. Penel. Tanah dan Pupuk 6: 15-19.

Suriadikarta, D.A., W. Hartatik, dan G. Syamsidi. 2003. Penerapan pengelolaan hara terpadu pada lahan sawah irigasi. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional PERHIMPI. Biotrop, 9-10 September 2003.

Sutriadi, M.T., R. Hidayat, S. Rochayati, dan D. Setyorini. 2005. Ameliorasi lahan dengan fosfat alam untuk perbaikan kesuburan tanah kering masam Typic Hapludox di Kalimantan Selatan. hlm. 143-155 *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Sumber Daya Tanah dan Iklim. Buku II. Bogor, 14-15 September 2004. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.

Syukur, A., Titi Wurdiayani, dan Udiono. 2000. Pengaruh dosis pupuk kandang terhadap pertumbuhan turus nilam di tanah Regosol pada berbagai tingkat kelengasan tanah. hlm. 465-476 *Dalam* Prosiding Kongres Nasional VIII HITI. Pemanfaatan Sumberdaya Tanah Sesuai dengan Potensinya Menuju Keseimbangan Lingkungan Hidup dalam rangka Meningkatkan Kesejahteraan Rakyat. Buku I. Bandung 2-4 November 1999.

Tan, K.H. 1993. Environmental Soil Science. Marcel Dekker. Inc. New York.

Warjito. 1994. Pengaruh pupuk kandang terhadap produksi kubis pada tanah Andosol di KP Lembang. Balai Penelitian Sayuran, Lembang.

Widowati, L.R., Sri Widati, dan D. Setyorini. 2004. Karakterisasi Pupuk Organik dan Pupuk Hayati yang Efektif untuk Budidaya Sayuran Organik. Laporan Proyek Penelitian Program Pengembangan Agribisnis, Balai Penelitian Tanah, TA 2004 (Tidak dipublikasikan)

Widowati, L.R., Sri Widati, U. Jaenudin, dan W. Hartatik. 2005. Pengaruh Kompos Pupuk Organik yang Diperkaya dengan Bahan Mineral dan Pupuk Hayati terhadap Sifat-sifat Tanah, Serapan Hara dan Produksi Sayuran Organik. Laporan Proyek Penelitian Program Pengembangan Agribisnis, Balai Penelitian Tanah, TA 2005 (Tidak dipublikasikan).

Yamashita, K. 1967. The effects of prolonged application of farmyard manure on the nature of soil organic matter and chemical and physical properties of paddy rice soils. Bull. Kyushu Agric. Exp. Stn. 23: 113-156.

Yurnaldi. 2006. Revolusi Pertanian Hijau di Sumbar. Kompas, 13 Februari 2006.

5. PUPUK LIMBAH INDUSTRI

Ea Kosman Anwar dan Husein Suganda

SUMMARY

Industrial wastes. Industrial wastes which do not contain hazardous and poisonous materials(HPM) can be applied as a fertilizer in crop cultivation. These wastes commmonly come from sugar industries such as bagasse, filter cake (mudpress), from palm oil factories and from the manufacture of monosodium glutamate (called sipramin) which are rich in organic material. Industrial wastes should be processed (before use as a fertilizer) to reduce pH or soil acidity, and temperature of waste. Processing the wastes can be done physically by constructing some deposition ponds, chemically by accelarating the solubility, and biologically by adding the microorganisms into liquid wastes, so that the wastes will be degradable faster. Application of industrial wastes originating from the above-mentioned sources does not disturb soil physical properties, but increase nutrient status of the soil. Moreover, applying agricultural wastes rich in organic material can increase populations of organism in the soil.

Limbah industri adalah bahan sisa yang dikeluarkan akibat proses industri. Dalam industri pengolahan hasil pertanian seperti pengolahan tebu dan kelapa sawit dihasilkan bahan berupa limbah padat atau cair. Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa limbah industri hasil pertanian dapat digunakan sebagai pupuk organik yang dapat memperbaiki kesuburan dan produktivitas tanah. Pupuk organik sangat berguna untuk memperbaiki sifat-sifat kimia, fisik, dan biologi tanah. Pemberian pupuk organik dapat meningkatkan kandungan unsur hara makro dan mikro di dalam tanah yang sangat diperlukan oleh tanaman. Pupuk organik juga dapat memperbaiki daerah perakaran sehingga memberikan media tumbuh yang lebih baik bagi tanaman. Selain itu pupuk organik dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah yang sangat bermanfaat dalam penyediaan hara tanaman. Pemanfaatan limbah industri sebagai pupuk dalam budi daya pertanian selain berguna dalam mensubsitusi kebutuhan pupuk anorganik yang semakin mahal, juga dapat menjadikan lingkungan lebih bersih dengan mengurangi tumpukan atau akumulasi limbah di suatu tempat.

Berbagai industri senantiasa menghasilkan limbah, seperti proses pembuatan gula di pabrik gula dari tanaman tebu dihasilkan berbagai limbah seperti ampas tebu, blotong, tetes, dan limbah cair. Limbah tebu tersebut tetes telah banyak dimanfaatkan untuk didaur ulang, sementara limbah cair ditampung dan diendapkan dalam beberapa buah kolam (biasanya sampai lima kolam), kolam pertama menampung limbah dari pabrik dan kolam terakhir merupakan penampungan limbah yang dianggap telah ”aman” bagi lingkungan, dan selanjutnya dibuang ke perairan umum. Limbah cair pabrik gula tebu merupakan hasil dari proses kristalisasi gula tebu yang diantaranya menggunakan belerang (S), melalui penguapan bertingkat, sehingga limbah yang dihasilkan mempunyai derajat kemasaman yang tinggi.

Industri minyak kelapa sawit (crude palm oil=CPO) menghasilkan limbah tandan buah kosong berasal dari sisa buah kelapa sawit dan limbah cair dari pabrik. Di luar negeri limbah CPO telah banyak digunakan untuk kepentingan pertanian sebagai sumber bahan amelioran (Gunadi, 2000). Amelioran selain menambah unsur-unsur hara yang diperlukan tanaman juga bersifat sebagai perekat (semen) bagi partikel-partikel tanah, sehingga partikel-partikel yang lebih kecil terikat menjadi partikel-partikel lebih besar membentuk agregat-agregat yang lebih besar. Agregat-agregat ini akan membentuk struktur yang lebih mantap dan tidak mudah tererosi (Arsyad, 1976).

Di lain pihak tanaman tebu (*Sacharum officinarum*) merupakan tanaman semusim yang berumur relatif panjang yaitu sekitar 8-12 bulan, sehingga selama pertumbuhannya diperlukan air yang cukup banyak. Sementara air irigasi di perkebunan tebu tidak selalu tersedia bagi pertanaman, sehingga diperlukan efisiensi dan penghematan air. Penghematan air biasa dilakukan diantaranya dengan cara menggunakan air limbah untuk menyiram pertanaman tebu. Penggunaan air limbah untuk menyiram tanaman tebu biasa diambil langsung dari kolam penampungan limbah, bahkan dari kolam penampungan limbah pertama yang menampung limbah langsung dari pabrik. Cara demikian dalam jangka panjang dikhawatirkan akan merusak lingkungan atau bahkan merugikan bagi pertumbuhan tebu itu sendiri. Sehingga perlu dicari cara untuk mengurangi risiko yang merugikan dan meningkatkan kualitas limbah terhadap kandungan hara yang bermanfaat bagi tanaman.

Pembahasan di bawah ini mencakup pengolahan limbah industri, pengaruh limbah industri gula tebu, kelapa sawit, dan penyedap masakan terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman serta dampaknya terhadap perubahan sifat-sifat tanah.

Pengelolaan limbah industri

Pengelolaan limbah cair pabrik gula tebu

Proses pengelolaan limbah cair pabrik gula tebu dilakukan dengan cara sebagai berikut: (1) inkubasi limbah dan (2) aerasi limbah.

1. Inkubasi limbah

Inkubasi limbah asli untuk menjadi amelioran dilakukan selama 2 minggu sebelum aplikasi ke dalam tanah dengan diperkaya untuk tiap 100 l limbah cair diberi 2 kg SP-36 dan 20 kg kapur dolomit [$CaMg(CO_3)_2$]. Pengayaan limbah asli dengan kapur pertanian dolomit dan fosfat, meningkatkan jumlah kation dari 26,75 me l^{-1} menjadi 45,55 me l^{-1} dan meningkatkan jumlah anion dari 2,42 me l^{-1} menjadi 102,75 me l^{-1} (Tabel 1). Peningkatan kandungan hara kation maupun anion, disebabkan penambahan unsur hara yang berasal dari kapur dolomit sebagai sumber unsur Ca, Mg dan lain-lain, maupun dari pupuk SP-36 sebagai sumber fosfat (Hardjowigeno, 1987).

Kepekatan limbah tidak sama antara limbah permulaan masa giling tebu (Mei) dengan limbah masa puncak giling tebu (Agustus). Hal ini terjadi karena volume air yang digunakan dalam proses pembuatan gula untuk menggelontorkan limbah pada masa puncak giling tebu lebih besar daripada permulaan masa giling tebu sehingga limbah pada masa puncak giling tebu lebih encer dibanding limbah yang keluar pada permulaan giling tebu. Pengayaan limbah berpengaruh terhadap penurunan pH (derajat kemasaman). Pengayaan limbah bulan Mei dengan aerasi dan penambahan dolomit dan TSP dapat meningkatkan pH limbah >0,5-1 poin, sedangkan pengayaan limbah yang di ambil bulan Agustus dengan dolomit dan TSP dapat meningkatkan pH >1,5 poin (Tabel 1). Dengan reaksi kimia sebagai berikut:

$$CaMg(CO_3)_2 \longrightarrow CaCO_3 + MgO + CO_2$$

$$CaCO_3 + H_2O + CO_2 \longrightarrow Ca(HCO_3)_2$$ merupakan Ca bikarbonat dengan pH tinggi meningkatkan pH limbah.

Pengendapan limbah dengan kolam di pabrik gula juga dapat menurunkan pH limbah. Limbah pada kolam 2 mempunyai pH limbah lebih tinggi dari pH limbah asli, demikian pula pH limbah kolam 3 mempunyai pH lebih tinggi dari pH limbah kolam 2 maupun pH limbah asli. Selisih derajat kemasaman (pH) dari limbah kolam asli dengan pH limbah kolam 3 mencapai satu poin, sedangkan dengan limbah yang telah diper-kaya dengan kapur dolomit dan fosfat mencapai 1-1,5 poin (Tabel 1).

Tabel 1. Kandungan kation pada limbah cair pabrik gula tebu 002)

Sumber	Kation								
	NH_4	K	Ca	Mg	Na	Fe	Al	Mn	Jumlah
	me l^{-1} bebas lumpur								
Limbah kolam 2	0,06	0,64	4,60	0,65	1,13	0,80	0,32	0,04	8,24
Limbah kolam 3	0,16	0,65	4,71	0,74	1,16	0,22	0,17	0,11	7,92
Limbah kolam 5	0,00	0,40	2,88	0,83	0,65	0,00	0,01	0,00	4,77
Limbah asli (Mei)	0,20	3,04	13,75	1,67	1,03	4,56	2,38	0,12	26,75
Limbah asli Mei diperkaya	0,55	5,26	10,88	24,17	4,26	0,40	0,03	0,00	45,55
Limbah asli (Agustus)	0,26	0,52	3,30	0,56	0,90	0,37	0,18	0,01	6,10
Limbah asli Agustus diperkaya	0,41	7,50	1,32	18,8	7,48	0,00	0,14	0,00	40,65

Sumber: Anwar *et al.* (2002)

Kandungan amoniak (NH_4^+) dalam limbah selain berasal dari asam amino sisa buangan bahan organik yang terkandung dalam limbah juga berasal dari bahan organik tanaman apung (eceng gondok dan sebagainya) yang mengalami dekomposisi (Gambar 1). Konsentrasi amoniak dalam limbah setara dengan pH limbah, semakin tinggi kandungan amoniak dalam limbah diikuti pH yang semakin meningkat, hal ini menunjukkan kesetimbangan reaksi dominan ke arah oksidasi akibat denitrifikasi.

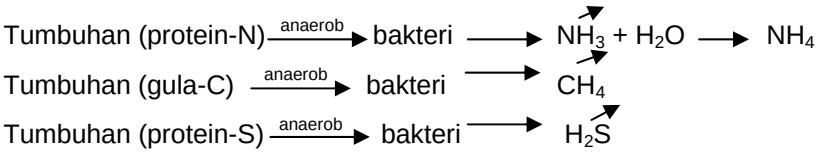
Gambar 1. Tumbuhan eceng gondok yang mati menambah hara dalam kolam limbah, nampak tanaman eceng gondok mati karena pengaruh pH limbah yang rendah

Foto: Ea Kosman Anwar

Denitrifikasi sering terjadi dimana tingkat difusi oksigen (dalam limbah) tidak mencukupi untuk mensuplay kebutuhan pernafasan mikroorganisme. Situasi ini umumnya terjadi pada kondisi becek atau tergenang. Denitrifikasi menyebabkan meningkatkan pH (tanah/limbah). Kehilangan N juga bisa terjadi melalui volatilisasi. Volatilisasi sangat dipengaruhi oleh keadaan tanah yang kering, suhu yang tinggi dan perubahan udara (angin) dipermukaan tanah (Killham and Foster, 1994).

2. Aerasi limbah

Aerasi limbah, limbah kolam asli (Gambar 2) dicampur udara semaksimal mungkin dengan aerator. Pengayaan limbah asli dengan udara (O_2) untuk meningkatkan aktivitas mikroorganisme, dengan tersedianya oksigen sebagai sumber energi dan pernafasan di dalam limbah, memacu terjadi proses biodegradasi. Proses biodegradasi secara anaerob akan dihasilkan gas NH_3, CH_4 dan H_2S. Model reaksi sebagai berikut (Fessenden and Fessenden, 1999):



Gambar 2. Kolam limbah pengolahan tebu yang langsung dari pabrik, nampak tidak ada vegetasi air yang dapat tumbuh karena derajat kemasaman limbah yang sangat tinggi

Foto: Ea Kosman Anwar

Hasil biodegradasi bereaksi dengan air dalam limbah dengan model reaksi sebagai berikut:

$SO_4^{2-} + H_2O \xleftrightarrow{\text{m.o anaerob}} H_2S + 2O_2$. Hasil reaksi berupa gas, sehingga SO_4^{2-} menurun. Sementara itu gas NH_3 akan mengalami kesetimbangan dengan H_2O membentuk NH_4^+, mengakibatkan NH_4^+ dalam limbah meningkat. Ion Al^{3+} (Tabel 1) menjadi turun disebabkan OH^- hasil kesetimbangan antara NH_3 dengan H_2O bereaksi dengan Al^{3+} dan mengendap membentuk $Al(OH)_3$. Konsentrasi kalium pada dasarnya tidak mengalami perubahan yang signifikan. Perubahan yang terjadi disebabkan adanya reaksi dengan NO_3 dan dengan Cl^-. Proses biodegradasi secara aerob akan menghasilkan CO_2, NO_2, H_2O dan SO_2, hasil penguraian inipun akan mengalami kesetimbangan dengan H_2O reaksinya adalah sebagai berikut:

$NO_2 + H_2O \rightleftharpoons NO_3^- + H^+$, dihasilkan NO_3^- yang menyebabkan NO_3^- dalam limbah meningkat (Tabel 2). Sementara itu ion Cl^- lebih stabil terhadap perubahan biodegradasi, umumnya bakteri aerob maupun anaerob phobi terhadap ion Cl^-, sehingga tidak akan terjadi reaksi biodegradasi pada ion ini. Terjadinya peningkatan konsentrasi ion Cl^- lebih disebabkan terjadinya biodegradasi ion dan kation lain, sementara Cl^- stabil.

Tabel 2. Kandungan anion pada limbah cair pabrik gula tebu

Sumber	Anion						
	NO_3	PO_4	SO_4	Cl	HCO_3	Jumlah	pH
	me l^{-1} bebas lumpur						
Limbah kolam 2	0,08	0,05	0,57	0,55	3,44	4,69	5,6
Limbah kolam 3	0,03	0,09	1,87	0,65	5,92	8,56	6,5
Limbah kolam 5	0,04	0,02	0,02	0,64	3,25	3,97	6,8
Limbah asli (Mei)	0,12	0,30	3,38	2,00	-	5,80	4,4
Limbah asli Mei diperkaya	0,10	0,32	19,93	4,00	18,40	102,75	5,5
Limbah asli (Agustus)	0,04	0,24	1,83	0,56	3,20	5,87	5,4
Limbah asli Agustus diperkaya	0,14	0,86	13,68	4,65	19,00	38,33	7,3

Sumber: Anwar *et al*. (2002)

Pengelolaan limbah kelapa sawit

Limbah kelapa sawit berupa tandan buah kosong umumnya sebagian telah dimanfaatkan untuk keperluan khusus seperti untuk membuat jok mobil, keset, dan lain-lain. Namun sebagian besar masih belum dapat dimanfaatkan secara langsung. Untuk keperluan pertanian limbah tandan buah kosong perlu dikomposkan terlebih dahulu. Proses

pengomposan bisa dipercepat dengan menambahkan dan mencampur tandan buah kosong dengan mikroorganisme perombak (pupuk hayati) yang dapat mempercepat dekomposisi bahan organik. kemudian dibenam ke dalam tanah. Kedalaman pembenaman di dalam tanah disesuaikan dengan jenis tanah. Pada tanah–tanah yang mengandung liat tinggi seperti Ultisols pembenaman cukup sekitar 10 cm, sedangkan pada tanah-tanah yang mengandung pasir tinggi pembenaman perlu dilakukan lebih dalam sampai 20 cm di bawah permukaan tanah, agar proses dekomposisi bisa berlangsung relatif lebih cepat.

Limbah cair pabrik CPO berasal dari sisa proses pembuatan CPO dengan uap panas untuk mengeluarkan minyak dalam buah kelapa sawit melalui kondensasi dan penyaringan, dan sisanya disalurkan dan ditampung dalam beberapa buah kolam. Kandungan kation dan anion pada limbah cair CPO disajikan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Kandungan kation pada limbah cair CPO

Sumber	Kation								
	NH_4^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^+	Na^+	Fe^{3+}	Al^{3+}	Mn^{2+}	Jumlah
	me l^{-1} bebas lumpur								
Limbah asli	5,10	26,19	8,93	21,76	0,48	0,55	2,95	0,04	66,00
Limbah kolam	0,27	16,30	2,47	10,42	0,64	0,01	0,00	0,01	30,12

Sumber: Anwar *et al* .(2002)

Tabel 4. Kandungan anion pada limbah cair CPO

Sumber	Anion						
	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Jumlah	pH	Lumpur mg.l^{-1}
	me l^{-1} bebas lumpur						
Limbah asli	0,35	4,14	16,50	18,80	39,79	4,5	1233
Limbah kolam	3,11	1,79	0,50	10,70	16,10	6,7	22

Sumber: Anwar *et al.* (2002)

Pengelolaan limbah pabrik penyedap masakan

Limbah pembuatan penyedap masakan dapat diolah menjadi pupuk bagi tanaman, yang disebut sebagai sipramin (sisa proses asam amino). Penelitian empat macam sipramin dari: (1) Bagitani, produksi PT Cheil Samsung Indonesia, Pasuruan; (2) Amina, produksi PT Ajinomoto Indonesia, Mojokerto; (3) Saritana, produksi PT Sasa Inti, Probolinggo; dan (4) Orgami, produksi PT Miwon Indonesia, Gresik telah dilakukan oleh Premono *et al.*

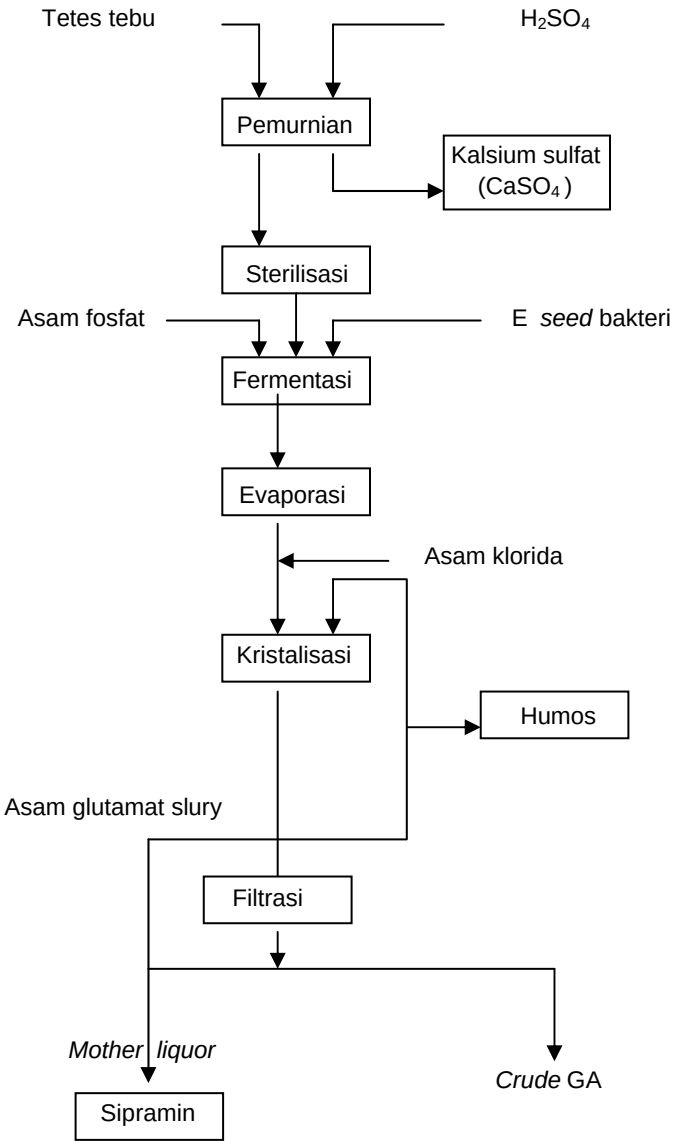
(2001). Pada empat jenis limbah penyedap masakan terdapat adanya variasi proses pembuatan sipramin dari keempat pabrik tersebut. Hal ini diperkirakan akan menyebabkan komposisi sipramin yang dihasilkan akan berbeda pula. Pada Gambar 3, 4 dan 5 disajikan bagan proses produksi dari masing-masing pabrik sehingga menghasilkan sipramin. Proses kristalisasi/pemurnian MSG pada sipramin Orgami (Gambar 3) dan Saritana (Gambar 4) menggunakan asam klorida (HCl) sedangkan sipramin Bagitani (Gambar 5) dan Amina selain menggunakan HCl juga menggunakan asam sulfat (H_2SO_4) dan karbon aktif. Pada bulan Oktober 1996 PT Miwon Indonesia meningkatkan produksi Orgami menjadi 11.250 kl bulan^{-1}. Proses asidifikasipun diubah yaitu menggunakan 50% HCl dan 50% H_2SO_4. Perbedaan dalam penggunaan bahan kimia selama proses fermentasi dan kristalisasi/pemurnian mempengaruhi kandungan bahan kimia sipramin yang dihasilkan terutama unsur Cl dan SO_4. Pada Tabel 5 terlihat bahwa kandungan SO_4 pada sipramin Bagitani dan Amina relatif lebih tinggi dibanding Orgami dan Saritana. Kandungan Cl pada sipramin Orgami dan Saritana lebih tinggi dibanding kedua sipramin lainnya. Kemasaman (pH) sipramin yang sebelumnya sangat rendah (4,5), setelah melalui proses standarisasi (penambahan amoniak) dapat ditingkatkan menjadi 5,5 (Tabel 5 dan Tabel 6).

Sipramin sebagai pupuk

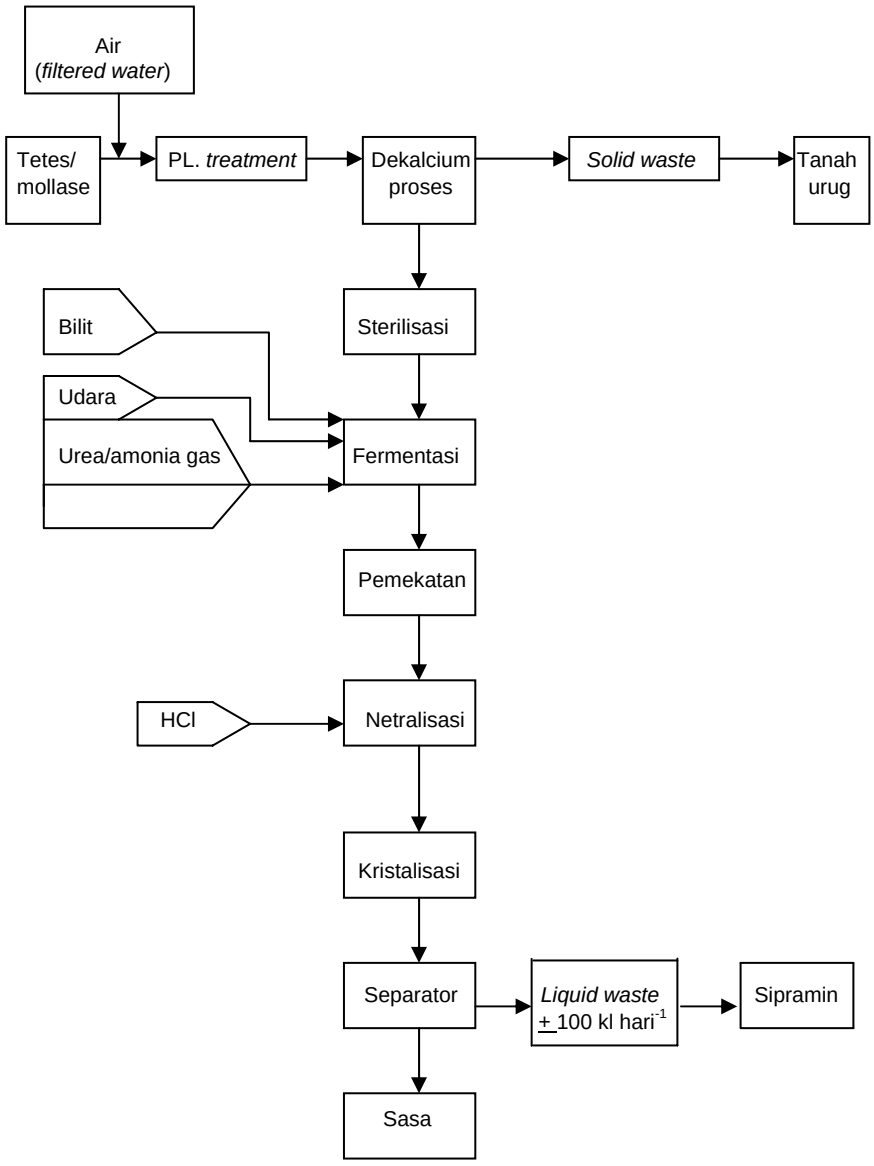
Sipramin singkatan dari sisa proses asam amino. Sipramin adalah sisa fermentasi asam amino (glutamate dan L-lysine) merupakan bahan organik cair yang berasal dari hasil samping pembuatan penyedap masakan (monosodium glutamate atau MSG), dari bahan baku tetes tebu. Sipramin dapat digunakan sebagai salah satu pupuk karena mengandung unsur hara makro N, P, K, Ca, Mg, dan beberapa unsur mikro seperti Cu, dan Zn selain unsur lainnya (Mulyadi dan Lestari, 1993; Tim Ahli Bimas Jawa Timur, 1995). Selain itu sipramin mengandung bahan organik cukup tinggi (8,1–12,7%) sehingga dapat dimanfaatkan untuk menambah bahan organik tanah (Sofyan *et al*., 1997).

Unsur hara dalam sipramin yang paling penting adalah nitrogen karena unsur ini sangat diperlukan tanaman. Sipramin mengandung nitrogen cukup tinggi yaitu berkisar antara 4,92–6,12% (Soeparmono *et al*., 1998) sampai 5,04–6,92 (Arifin *et al*., 1998). Dalam proses pembuatan sipramin, sisa pengolahan proses fermentasi dinetralkan sampai pH 6-7, diperkaya dengan unsur nitrogen (N), dan dipasarkan sebagai pupuk cair.

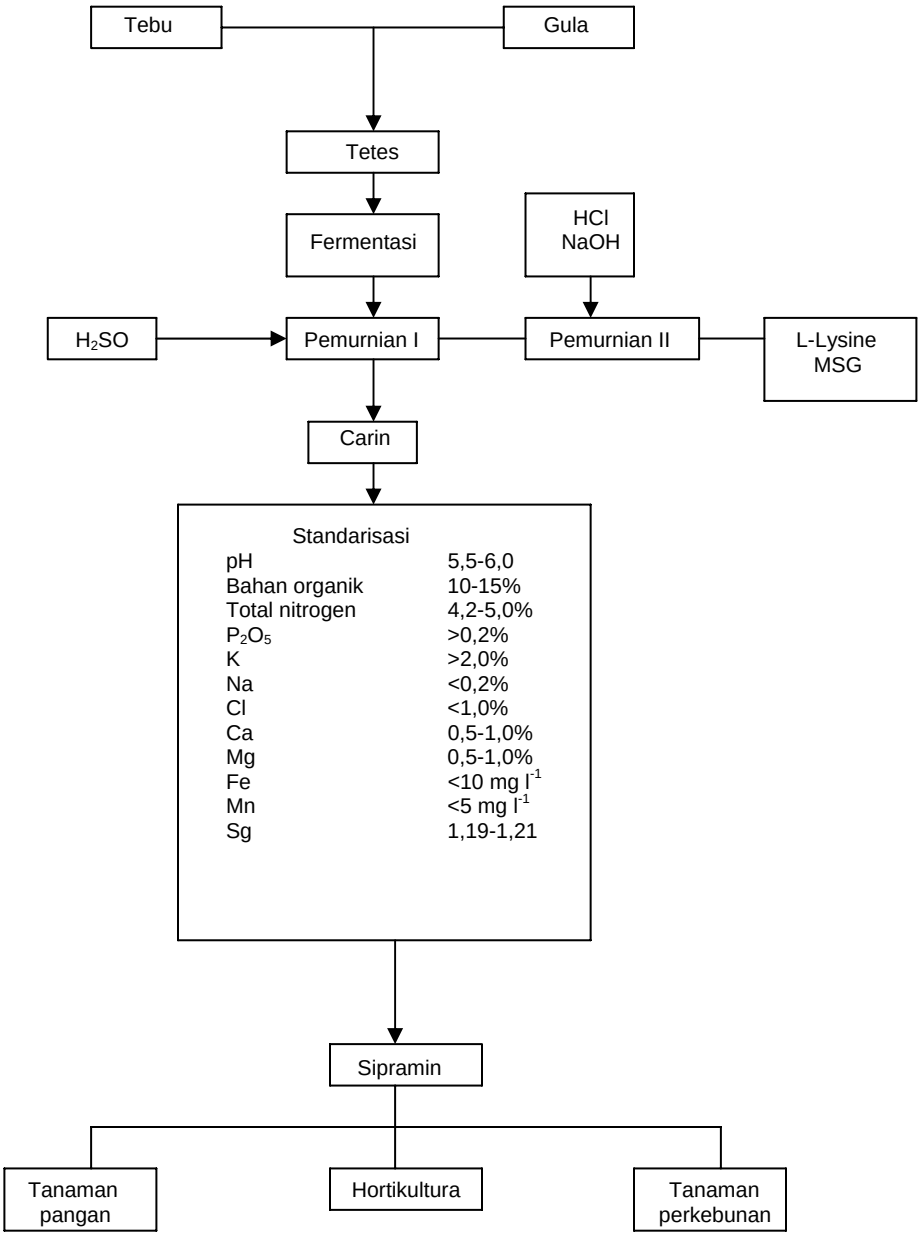
Kandungan unsur hara dalam sipramin berdasar hasil penelitian Sofyan *et al*. (2001) dan Premono *et al*., 2001 disajikan pada Tabel 5 dan 6.



Gambar 3. Proses pembuatan sipramin Orgami



Gambar 4. Proses pembuatan sipramin Saritana



Gambar 5. Proses pembuatan sipramin Bagitani

Tabel 5. Hasil analisis sipramin kisaran terendah-tertinggi yang digunakan untuk penelitian

Jenis analisis		Sipramin			
		Amina	Orgami	Bagitani	Saritana
pH (H_2O)		4,66-6,31	4,74-4,83	4,40-4,80	7,86-8,21
C-organik	(%)	5,51-11,97	6,70-13,89	8,30-13,10	6,30-8,95
N-total	(%)	3,58-4,45	3,74-4,19	3,50-5,58	4,06-4,45
P	(%)	0,05-0,32	0,02-0,07	0,05-0,08	0,01-0,05
K	(%)	0,99-1,39	0,99-1,29	0,46-0,64	0,62-0,86
Na	(%)	0,41-0,65	0,22-0,49	0,04-0,27	0,78-1,54
Ca	(%)	0,03-0,08	0,23-0,44	0,04-0,06	0,02-0,06
Mg	(%)	0,07-0,13	0,19-0,17	0,07-0,09	0,05-0,08
S	(%)	2,85-3,54	0,63-1.01	2,90-4,32	1,46-2,46
Cl	(%)	0,08-0,84	6,50-8,90	0,09-3,08	3,37-4,07
Fe	(ppm)	154-175	179-185	111-118	152-170
Mn	(ppm)	7-8	7-8	7-8	6-8
Cu	(ppm)	3-5	3-4	4-5	3-4
Zn	(ppm)	4-6	6-8	7-8	4-6

Sumber: Sofyan *et al*. (2001)

Pada Tabel 5 menunjukkan kandungan unsur-unsur hara pada sipramin yang digunakan pada percobaan di Gurah (Kediri) dan Saradan (Madiun). Sedangkan Tabel 6 adalah yang digunakan pada percobaan di Jengkol (Kediri), Jember, dan Pasuruan.

Tabel 6. Hasil analisis sipramin kisaran terendah-tertinggi yang digunakan untuk penelitian

Jenis analisis		Sipramin			
		Amina	Bagitani	Organi	Saritana
pH (H_2O)		4,65-5,45	4,15-5,89	4,30-5,15	5,53-8,50
Bahan organik	(%)	8,13-12,02	7,52-12,83	12,34-16,10	9,82-12,83
Nitrogen (N-total)	(%)	4,92-5,62	4,71-7,01	4,63-5,94	4,31-6,12
Fosfat (P_2O_5)	(%)	0,20-0,99	0,14-0,26	0,14-0,36	0,10-0,24
Kalium (K_2O)	(%)	1,24-2,70	1,09-1,59	1,08-2,70	1,08-1,40
Natrium (Na_2O)	(%)	0,81-1,07	0,12-1,07	0,41-2,53	0,94-5,06
Sulfat (SO_4)	(%)	12,32-23,43	10,71-22,00	2,50-5,38	8,57-11,25
Khlor (Cl)	(%)	0,37-3,72	0,62-2,48	1,55-8,07	0,62-3,23
Kalsium (CaO)	(%)	0,16-1,52	0,18-1,57	0,58-1,87	0,19-1,41
Magnesium (MgO)	(%)	0,16-0,23	0,16-0,24	0,19-0,27	0,14-0,21
Besi (Fe)	(ppm)	101-196	75-148	103-184	90-129
Mangan (Mn)	(ppm)	6-14	4-10	7-14	3-10
Tembaga (Cu)	(ppm)	0-3	0-2	0-3	0-2
Seng (Zn)	(ppm)	5-17	4-10	5-18	2-7

Sumber: Premono *et al*. (2001)

Pada Tabel 5 dan 6. nampak bahwa kandungan hara sipramin yang menonjol adalah N bervariasi dari 3,50–7,01%. Selain itu kadar bahan organik dapat mencapai 16,1%. Sementara itu natrium (Na), belerang (S), dan khlor (Cl) merupakan unsur yang sering ditemukan agak tinggi dalam cairan sipramin. Saritana memiliki variasi kadar Na lebih tinggi dibanding ketiga sipramin lainnya.

Penggunaan limbah industri untuk pertanian

Limbah cair pabrik gula

Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap sifat fisik tanah

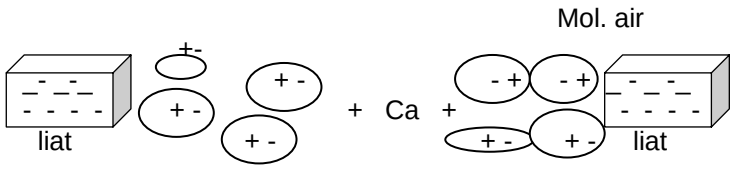
Limbah cair pabrik gula tebu merupakan hasil dari proses kristalisasi gula tebu yang diantaranya menggunakan belerang, melalui penguapan bertingkat, sehingga limbah yang dihasilkan mempunyai derajat kemasaman yang tinggi.

Hasil analisis tanah pada tanaman tebu dalam pot yang disiram secara terus-menerus sampai umur 4 bulan atau setara pemberian air 4.666,7 m^3 ha^{-1} tercantum pada Tabel 7. Hasil analisis menunjukkan pemberian limbah berpengaruh terhadap *bulk density*, ruang pori total, pori drainase, air tersedia, permeabilitas, stabilitas agregat, dan indeks stabilitas agregat. *Bulk density*, pori drainase lambat, stabilitas agregat dan indeks stabilitas agregat pada tanah yang disiram limbah dari kolam 2, kolam 3 maupun limbah asli yang diperkaya meningkat, sedangkan ruang pori total, pori drainase cepat dan permeabilitas menurun dibanding kontrol. Hal ini diperkirakan karena ada asupan mineral (Ca, Mg dan sebagainya) dari limbah ke dalam pori-pori koloid tanah melalui proses pengikatan secara kimia, sehingga terjadi perubahan sifat-sifat fisika tanah tersebut. Menurut Russell dan Russell (1950) pada proses ini molekul air yang bersifat bipolar memegang peranan. Ketika air menguap maka butir-butir liat tertarik lebih dekat (rapat) satu sama lain. Kation-kation seperti Ca, Mg dan hidroksida besi terlibat erat dalam peristiwa ini. Secara skematis mekanismenya sebagai berikut (Gambar 6):

Tabel 7. Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap sifat fisik tanah

Perlakuan	BD	Ruang pori total	Pori drainase		Air tersedia	Permea-bilitas	Stabilitas agregat	Indeks stabilitas agregat
			Cepat	Lambat				
	g cc^{-1}	%vol	%		% vol	cm jam^{-1}	%	
Kontrol (air ledeng)	0,92	65,13	27,40	4,47	8,93	3,28	52,4	55,0
LK2	0,96	63,90	24,80	4,67	10,00	2,39	53,3	58,0
LK3	0,96	63,90	24,80	4,60	9,87	2,22	53,7	60,0
Limbah asli (Agustus) diperkaya	0,94	64,40	24,40	4,70	10,33	1,15	55,7	66,0

Sumber: Anwar *et al*. (2002)



Gambar 6. Proses asupan mineral ke dalam pori-pori koloid tanah melalui pengikatan secara kimia.

Sumber : Arsyad (1976)

Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap sifat kimia tanah

Pengaruh pemberian limbah tidak nampak terhadap peningkatan pH (derajat kemasaman) tanah, perubahan pH hanya terjadi pada pemberian limbah asli diperkaya, peningkatan pH 4,2 menjadi 6,2 disebabkan ada asupan kapur dolomit yang terdapat dalam limbah yang diperkaya. Pemberian limbah meningkatkan P-total maupun P-tersedia yang berasal dari P yang terlarut dalam limbah sebagai sumber asupan P ke dalam tanah. Sedangkan peningkatan P-tersedia selain disebabkan oleh asupan dari limbah, juga berasal dari P residu yang terfiksasi oleh Al menjadi terurai oleh asam yang terkandung dalam limbah sehingga menjadi tersedia bagi tanaman dan retensi P juga menurun (Tabel 8). Pemberian limbah tidak berpengaruh terhadap C, N dan C/N tanah, namun meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) tanah. Limbah cair pabrik gula tebu mengandung bahan organik relatif kecil, sehingga pengaruh terhadap penambahan C tanah juga

kecil demikian juga NH_4 yang terkandung dalam limbah tidak cukup tinggi untuk meningkatkan kandungan N dalam tanah, selain NH_4 juga merupakan senyawa yang mudah sekali menguap, sehingga penambahan N dari limbah ke dalam tanah akan mengalami hambatan (Tabel 8).

Tabel 8. Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap sifat kimia tanah

Perlakuan	pH	P-total	P-tersedia	Retensi P	C	N	C/N	KTK
		mg.100g^{-1}	ppm	%				Cmol.kg^{-1}
Kontrol (air ledeng)	4.2	148	159.5	50.1	1.38	0.16	9	16.4
LK2	4.2	193	215.4	50.4	1.37	0.16	9	18.0
LK3	4.3	194	224.5	49.0	1.34	0.15	9	16.7
Limbah asli (Agustus) diperkaya	6.2	170	195.9	49.1	1.34	0.15	9	18.3

Sumber: Anwar *et al.,* 2002

Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap mikroorganisme tanah

Kelimpahan mikroorganisme tanah sangat dipengaruhi oleh lingkungan berupa ketersediaan sumber energi seperti bahan organik dan hara tanah, suhu, udara, dan kelembapan. Limbah yang diperkaya, limbah asli maupun limbah dari kolam 5 menurunkan kelimpahan jamur *Penicillium* sp*., Aspergillus* sp*., dan Actinomyces* sp*.* Kepekatan limbah berpengaruh negative terhadap kelimpahan mikroorganisme Tanah, semakin pekat limbah diberikan ke dalam Tanah, populasi mikroorganisme Tanah semakin berkurang terutama dari jenis fungi. Pada tanah kontrol (tidak diberi limbah) mengandung 50.000 spk g^{-1} jenis *Penicillium* sp*.* sedangkan pada tanah yang diberi limbah yang paling pekat (limbah asli) mengandung 1.000 spk g^{-1}.

Fenomena tersebut perlu dipertimbangkan untuk mengurangi upaya mengairi tanaman dengan memberikan limbah cair pabrik gula tebu secara langsung ke dalam tanah, karena jamur selain sebagai dekomposer juga merupakan salah satu komponen pengikat partikel tanah menjadi agregat-agregat yang lebih besar selain bahan organik dan kapur sehingga tanah mempunyai kemantapan agregat dan ketahanan terhadap erosi. Di lain pihak pemberian limbah yang telah diperkaya dengan dolomit dan fosfat meningkatkan populasi *Azotobacter* sp., *Bacillus* sp. dan bakteri pelarut P (Anwar *et al*., 2002).

Tabel 9. Kelimpahan mikroorganisme dekomposer dalam tanah

Perlakuan	*Penicillium* sp.	*Aspergilus* sp.	*Actinomyces* sp.	*Rhizopus* sp.	*Azotobacter* x 10^3	Pelarut P x10^3	Bacillus x 10^2
	x 10^3 spk g tanah^{-1}				Sel g tanah^{-1}		
Kontrol	50	9	30	7	6	27	20
Limbah asli diperkaya	19	3	5	30	19	32	170
LK5	2	9	6	35	3	16	8
Limbah asli	1	4	3	-	5	18	30
Endapan	19	45	1	-	58	19	66
Air limbah asli	-	-	1	-	-	-	2

Sumber: Anwar *et al*.(2002)

Pemberian kapur (dolomit) dan fosfat (SP-36) terhadap limbah asli memacu pertumbuhan populasi mikroorganisme *Penicillium* sp. dari tidak terdeteksi menjadi 19.000 spk g^{-1}, *Aspergillus* sp. dari tidak terdeteksi menjadi 45.000 spk g^{-1}, bakteri *Azotobacter* sp. dari tidak terdeteksi menjadi 58.000 spk g^{-1} dan *Bacillus* dari dua sel menjadi 6.600 sel g^{-1} (Tabel 9).

Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap tanaman jagung

Tanaman jagung yang diuji diberi pupuk sesuai anjuran yaitu 1 ku ha^{-1} urea dan 1 ku ha^{-1} KCl sebagai pupuk dasar dan pemupukan susulan 1 ku ha^{-1} urea diberikan pada tanaman umur 1 bulan. Pemupukan P disubstitusi dari limbah yang diberikan. Pengaruh pemberian limbah cair asli (sebelum diendapkan) terhadap tanaman jagung muda umur 2 minggu menyebabkan tanaman mati setelah limbah diberikan 10 cc kg^{-1} tanah sekaligus atau setara 20.000 l ha^{-1}, sedangkan limbah asli yang telah diperkaya dan diinkubasi dengan kapur dan fosfat pemberian sampai 15 cc kg^{-1} tanah sekaligus atau setara 30.000 l ha^{-1}, tanaman jagung muda tumbuh lebih subur dibanding dengan tanaman yang disiram dengan limbah dari kolam 5 (kolam terakhir) dengan jumlah limbah dan asupan hara yang sama. Hal ini menunjukkan penggunaan limbah asli sebaiknya dihindari dan digunakan setelah diperkaya dan diinkubasi dengan fosfat dan kapur selain menambah asupan hara juga sekaligus penyiraman dalam upaya penghematan air. Pemberian limbah asli yang telah diperkaya dapat meningkatkan hasil dan biomassa jagung (Tabel 10), hal ini terjadi selain asupan hara dari pengayaan juga hara dari limbah itu sendiri.

Tabel 10. Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap hasil dan biomassa jagung

Perlakuan	Hasil	Biomassa
	g pot^{-1} (2 tanaman)	
Kontrol	34,4 b*	60,7 b
200 kg ha^{-1} SP-36 + 2.000 kg ha^{-1}	33,7 b	64,2 b
Dolomit 10.000 l.ha^{-1} limbah asli diperkaya	42,1 a	83,2 a

* Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% Uji BNT

Sumber: Anwar *et al*.(2002)

Pengaruh limbah cair pabrik gula tebu terhadap tanaman tebu

Kepekatan limbah yang digunakan sebagai sumber air pengairan nampak berpengaruh terhadap pertumbuhan (tinggi) tanaman tebu. Limbah cair dari kolam 2 yang relatif lebih pekat dari limbah kolam 3 dan seterusnya sampai umur 2 bulan dimana total kumulatif penyiraman 8,5 l pot^{-1} atau setara 1.619 m^3 ha^{-1} memberikan peningkatan pertumbuhan tinggi tanaman lebih cepat dibanding dengan tanaman yang diairi lainnya (Tabel 11). Namun setelah mencapai total kumulatif penyiraman mencapai 11,5 l pot^{-1} atau setara 2.190 m^3 ha^{-1} pertumbuhan tanaman menurun dibanding tanaman yang diari lainnya, berlanjut sampai umur tanaman 3 bulan setara kumulatif penyiraman 2.857 m^3 ha^{-1} dan umur tanaman 4 bulan setara kumulatif penyiraman 4.667 m^3 ha^{-1}. Hal ini terjadi karena tanaman mengalami keracunan Fe dan Al, yang menyebabkan pertumbuhan tanaman stagnan. terbukti dari kandungan Fe pada batang tebu umur 3 bulan mencapai 408 ppm dan Al 336 ppm (Tabel 12). Sebagai perbandingan kandungan Al dan Fe di atas merupakan batas kritis 300 ppm untuk tanaman padi sawah (Yoshida, 1976).

Tabel 11. Pengaruh limbah cair pabrik gula terhadap tinggi tanaman tebu

Perlakuan	Umur tanaman		
	2 bulan	3 bulan	4 bulan
	Tinggi tanaman		
	cm		
Kontrol (air ledeng)	169,8 c*	187,3 a	191,7 ab
Limbah kolam 2	184,0 a	189,0 a	189,7 b
Limbah kolam 3	170,6 c	190,7 a	194,0 a
Limbah asli diperkaya	178,6 b	189,3 a	194,7 a

* Angka yang diikuti huruf yang sama pada kolom yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% Uji BNT

Sumber: Anwar *et al*. (2002)

Tabel 12. Kandungan hara dalam batang tanaman tebu umur 3 bulan

Perlakuan	Unsur makro					Unsur mikro	
	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Al
	%					ppm	
Kontrol (air ledeng)	1,76	0,20	16,39	0,27	0,18	266	235
Limbah kolam 2	1,31	0,14	14,38	0,28	0,16	408	368
Limbah kolam 3	1,65	0,14	13,74	0,21	0,14	290	182
Limbah asli diperkaya	1,96	0,18	18,21	0,27	0,19	158	107

Sumber: Anwar *et al*. (2002)

Limbah cair pabrik CPO

Pengaruh limbah cair pabrik CPO terhadap sifat fisik tanah

Limbah yang dihasilkan secara terus-menerus dalam jangka panjang akan menimbulkan masalah karena sifatnya yang akumulatif. Akumulasi limbah berkaitan dengan daya sangga tanah terhadap limbah, semakin tinggi daya sangga tanah semakin tinggi pula kemampuan tanah menampung limbah (cair). Beberapa faktor yang mempengaruhi daya sangga tanah diantaranya kapasitas jerapan, perkolasi (meloloskan), dan lama infiltrasi.

Tiap jenis tanah mempunyai daya sangga yang berbeda terhadap limbah cair yang menggenanginya, tanah Inceptisol maupun Ultisols mempunyai jerapan terhadap limbah asli (limbah yang diambil langsung dari saluran pembuangan sebelum masuk kolam pengendapan) yang relatif lebih tinggi daripada jerapan terhadap limbah kolam (limbah yang keluar dari kolam pengendapan menuju perairan umum).

Ultisols mempunyai jerapan terhadap limbah kolam maupun limbah asli lebih tinggi daripada Inceptisols. Ultisols mempunyai tekstur dengan kandungan liat yang lebih tinggi daripada Inceptisols, sehingga kapasitas jerapan (holding capacity) lebih tinggi dari Inceptisols yang mempunyai tekstur dengan liat lebih rendah dan kandungan pasir lebih tinggi dari Ultisols. Inceptisols mempunyai kapasitas jerapan 70,3% terhadap limbah asli dan 41,4% terhadap limbah kolam, sedangkan Ultisols mempunyai jerapan 72,7% terhadap limbah asli dan 62,0% terhadap limbah kolam. Hal ini berarti sebanyak 70,3% volume limbah asli yang dihasilkan pabrik *crude palm oil* (CPO) dalam satu satuan waktu terjerap oleh tanah Inceptisol dan 72,7% oleh Ultisols dan sisanya lolos.

Limbah kolam yang terjerap oleh Inceptisols lebih rendah daripada yang lolos, sementara pada Ultisols limbah kolam yang terjerap lebih tinggi daripada yang lolos. Hal ini kemungkinan senyawa (larutan) yang lebih

encer seperti limbah kolam, lebih mudah lolos pada tekstur sarang (mengandung pasir tinggi). Kapasitas meloloskan (% vol. menit^{-1}) berpengaruh terhadap daya sangga tanah, semakin tinggi kapasitas meloloskan daya sangga semakin rendah, semakin mudah mencemari lingkungan. Pada Tabel 13, Inceptisols mempunyai kapasitas meloloskan air lebih tinggi dibanding Ultisols, sehingga akan mudah tercemar sementara Ultisols relatif lebih lama tercemar oleh limbah cair CPO.

Pengaruh limbah cair pabrik CPO terhadap sifat kimia tanah

Pengaruh pemberian limbah kolam terhadap kimia tanah Inceptisol dan Ultisol terlihat pada Tabel 14. Hasil analisis menunjukkan setelah masa inkubasi selama 1-3 bulan terjadi beberapa perubahan. Pada tanah Inceptisols maupun Ultisols pemberian limbah meningkatkan KTK tanah, pada tanah Inceptisol sebelum diberi limbah mempunyai KTK 20,9 me 100g^{-1} dan pada umur 2 bulan setelah pemberian limbah mempunyai KTK 33,6 me 100g^{-1}. Peningkatan KTK disebabkan adanya asupan kation dari limbah cair CPO dengan jumlah kation mencapai jumlah 30,12 me l^{-1}. (Tabel 13)

Tabel 13. Daya sangga Inceptisols dan Ultisols terhadap limbah pabrik CPO

Pengamatan	Inceptisols		Ultisols	
	Limbah kolam	Limbah asli	Limbah kolam	Limbah asli
Terjerap (% volume)	41,4	70,3	62,0	72,7
Lolos (% volume)	58,6	29,7	38,0	27,3
Kapasitas meloloskan (% vol. menit^{-1})	3,8	0,45	0,18	0,25

Sumber: Anwar *et al*. (2000)

Tabel 14. Hasil analisis tanah pada penelitian pengaruh limbah cair CPO kolam terhadap perubahan sifat kimia tanah

Perlakuan	C	N	C/N	P $_{tersedia}$	P $_{total}$	K_2O	pH	KTK
	____ % ____			ppm	g 100 g^{-1}			me 100g^{-1}
Inceptisols Kontrol	3,31	0,28	12	39,8	115	108	6,9	20,9
Inceptisols 1 bln	3,06	0,30	10	14,7	121	175	6,4	30,9
Inceptisols 2 bln	3,08	0,26	12	11,0	104	259	6,2	33,6
Inceptisols 3 bln	3,25	0,28	12	00,0	-	-	5,4	-
Ultisols kontrol	1,52	0,18	8	13,7	72	75	5,8	17,4
Ultisols 1 bln	1,26	0,19	7	18,9	82	96	5,8	29,7
Ultisols 2 bln	1,24	0,18	7	26,7	96	193	6,0	33,4
Ultisols 3 bln	1,50	0,20	8	50,4	-	-	6,2	-

Sumber: Anwar *et al*. (2000)

Penurunan derajat kemasaman terjadi pada tanah Inceptisol dari pH 6,9 menurun menjadi pH 5,4 setelah pemberian limbah 3 bulan dan pada tanah Ultisols terjadi peningkatan dari pH 5,8 menjadi pH 6,2, hal tersebut menunjukkan terjadi proses kesetimbangan mendekati pH limbah (pH 6,7). Pada tanah Inceptisol diduga pengaruh pemberian limbah meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, dimana dalam proses menghasilkan metabolit sekunder melepas asam-asam ke dalam tanah, sehingga pH tanah turun lebih rendah dari pH limbah itu sendiri (Tabel 13 dan 14).

Penambahan K-total terjadi pada tanah Inceptisol maupun Ultisols setelah pemberian limbah 2 bulan. Pada tanah Inceptisol penambahan K-total dari 108 g $100g^{-1}$ menjadi 259 g $100g^{-1}$ sedangkan pada Ultisols dari 75 g $100g^{-1}$ menjadi 193 g $100g^{-1}$. Hal ini terjadi karena limbah mengandung kation K^{+} cukup tinggi yaitu 16,3 me l^{-1} (Tabel 13) Kandungan P-tersedia tanah pada tanah Inceptisol menurun dari 39,8 ppm menjadi tidak terdeteksi setelah diberi limbah selama 3 bulan, sedangkan pada tanah Ultisol P-tersedia meningkat dari 13,7 menjadi 50,4 ppm (Tabel 14). Ketersediaan P dalam tanah nampak sangat dipengaruhi oleh pH tanah.

Pada tanah dengan derajat kemasaman netral seperti Inceptisols derajat kemasaman menurun menyebabkan P tanah tersedia diikat kation Al^{++} sedangkan pada tanah (relatif) masam seperti Ultisols pemberian limbah yang mempunyai derajat kemasaman netral meningkatkan pH tanah, menyebabkan P-tersedia tanah meningkat karena P yang semula terikat Al^{++} menjadi P-tersedia (P-terlarut). Kadar C, N dan C/N pada tanah Inceptisol lebih tinggi dibanding Ultisols. Penambahan limbah relatif tidak berpengaruh terhadap kandungan C dan N maupun C/N.(Tabel 14).

Pengaruh limbah cair pabrik CPO terhadap tanaman jagung

Pemberian limbah cair CPO pada tanaman kontrol, menyebabkan kecambah mati (Anwar *et al.*, 2000). Pada tanaman umur 3 minggu yang ditanam pada tanah Inceptisol menyebabkan tanaman mengalami klorosis dimulai dari pangkal batang menjalar ke bagian atas tanaman kemudian mati setelah 3 hari pemberian limbah (Gambar 6), namun yang ditanam pada tanah Ultisol tanaman mengalami stagnasi, stunting kemudian pulih kembali bahkan tampak subur setelah umur 4 minggu. Kecambah dan tanaman muda yang mati disebabkan limbah mengandung asam organik yang bersifat racun bagi tanaman, namun pada tanah Ultisol yang mempunyai liat (relatif dominan mengandung kation) dan kejenuhan basa tinggi (>100) dapat menetralisir asam tersebut. Limbah cair CPO terhadap tinggi tanaman, berat batang dan jumlah daun tidak berpengaruh secara nyata, bahkan ada kecenderungan pada tanah Inceptisol menurunkan tinggi

tanaman dan pada tanah Ultisol menurunkan bobot biji pipilan. Hal ini menunjukkan pengaruh limbah cair CPO memberikan pengaruh berbeda terhadap pertumbuhan jagung yang ditanam pada jenis tanah yang berbeda.

Gambar 6. Pengaruh limbah cair pabrik CPO terhadap tanaman jagung umur 3 hari pada tanah Inceptisol (kiri) dan Ultisol (kanan)

Foto: Ea Kosman Anwar

Limbah pembuatan penyedap masakan

Penelitian penggunaan sipramin untuk pertanian

Sejak tahun 1970-an, sipramin telah diteliti kegunaannya pada tanaman tebu. Namun selama ini penggunaan sipramin di lapangan telah menimbulkan perdebatan karena pengaruh negatif atau positif dari bahan tersebut. Tim Ahli Bimas Propinsi Jawa Timur (1995) dan Tim Pencari Fakta (1994) telah mencatat laporan-laporan yang bersifat negatif dari sipramin, diantaranya adalah memiliki kualitas yang bervariasi, menyebabkan tanah menjadi keras, dan menurunkan kualitas nira tebu.

Manfaat sipramin sebagai pupuk sumber N pada tanaman telah banyak diteliti oleh berbagai pihak. Hasil penelitian Sudaryono dan Taufik (1994) pada tanah Alfisol Probolinggo dan Vertisol Ngawi menunjukkan pemberian pupuk cair sipramin (Saritana) sebanyak 2.000-5.000 l ha^{-1} dapat meningkatkan hasil padi dan jagung. Hasil penelitian Balittan (1991) juga memperlihatkan bahwa pemupukan sipramin (Bagitani) atau Bagitani yang dikombinasikan dengan urea sangat nyata menaikkan hasil padi dan jagung. Produksi jagung tertinggi dicapai pada takaran Bagitani 3.300 l ha^{-1} atau setara dengan $\pm$ 180 N kg ha^{-1}. Peningkatan takaran >4.000 l ha^{-1} cenderung menurunkan hasil jagung.

Dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa pemberian Bagitani tidak berdampak negatif terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman serta pengaruhnya sama dengan urea. Namun demikian ada informasi yang menyatakan sebaliknya yaitu bahwa sipramin tetap berdampak negatif terhadap tanah dan tanaman. Hal itu bisa saja terjadi karena tanaman dan jenis tanah cukup beragam, selain itu waktu, cara dan takaran sipramin berbeda-beda pula.

Pengaruh sipramin terhadap pertumbuhan dan hasil padi dan jagung

Hasil percobaan pengaruh sipramin yang dibandingkan dengan Urea di Gurah, Kediri yang memiliki tanah berpasir berlangsung selama 10 musim tanam (MT) sejak tahun 1997-2000 berturut-turut: (MT)-1 jagung, MT-2 padi, MT-3 padi, MT-4 jagung, MT-5 padi, MT-6 padi, MT-7 jagung, MT-8 padi, MT-9 padi, dan MT-10 jagung (Sofyan *et al*., 2001) tertera pada Tabel 15.

Tabel 15. Hasil jagung pipilan kering dan berat gabah kering bersih tiap musim tanam berdasar dua sumber pupuk nitrogen di Gurah, Kediri

Musim tanam	Sumber pupuk	Hasil	Takaran pupuk		Rata-rata
			250/2.500	500/5.000[1)]	
1	Urea	Jagung pipilan kering (t ha^{-1})	7,771	8,384	8,077 a
	sipramin		7,655	8,459	8,057 a
2	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,320	5,693	5,507 a
	sipramin		4,699	4,829	4,764 a
3	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,139	4,776	4,957 a
	sipramin		5,307	5,007	5,157 a
4	Urea	Jagung pipilan kering (t ha^{-1})	6,202	6,480	6,341 a
	sipramin		6,305	6,998	6,652 a
5	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,483	4,895	5,189 a
	sipramin		5,510	4,888	5,199 a
6	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	4,396	4,970	4,683 a
	sipramin		4,171	4,254	4,213 a
7	Urea	Jagung pipilan kering (t ha^{-1})	6,850	7,427	7,138 a
	sipramin		6,987	7,380	7,183 a
8	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,743	5,142	5,443 a
	sipramin		5,557	5,913	5,735 a
9	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,080	4,821	4,950 a
	sipramin		5,360	5,770	5,565 a
10	Urea	Jagung pipilan kering (t ha^{-1})	8,620	8,830	8,720 a
	sipramin		8,260	8,200	8,230 a

Dari tabel tersebut terlihat bahwa pemberian urea dan sipramin sampai 10 kali musim tanam menghasilkan gabah kering bersih maupun jagung pipilan kering tidak berbeda nyata sampai pada dua kali takaran baku. Demikian juga pada Tabel 16 hasil yang diperoleh di Madiun sejalan seperti yang dicapai pada lokasi di Kediri. Kedua tabel tersebut memperlihatkan bahwa pupuk urea dapat digantikan oleh sipramin, jika dilihat dari hasil tanamannya yang tidak berbeda.

Tabel 16. Hasil jagung pipilan kering dan berat gabah kering bersih tiap musim tanam berdasar dua sumber pupuk nitrogen di Saradan, Madiun

Musim tanam	Sumber pupuk	Hasil	Takaran pupuk		Rata-rata
			250/2.500	500/5.000[1)]	
1	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	3,717	3,543	3,630 a
	sipramin		3,171	3,338	3,279 a
2	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	3,776	4,670	4,218 a
	sipramin		3,540	4,225	3,883 a
3	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	4,092	3,547	3,819 a
	sipramin		4,186	3,803	3,995 a
4	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	4,222	5,250	4,736 a
	sipramin		4,049	4,802	4,425 a
5	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	5,314	5,569	5,487 a
	sipramin		5,339	5,611	5,475 a
6	Urea	Gabah kering bersih (t ha^{-1})	3,471	4,180	3,825 a
	sipramin		3,730	3,674	3,702 a
7	Urea	Jagung pipilan kering (t ha^{-1})	3,420	4,524	3,972 a
	sipramin		4,447	51,02	4,775 b

1) Menyatakan takaran urea atau sipramin (kg ha^{-1} atau l ha^{-1})
2) Nilai yang diikuti oleh huruf yang sama di dalam kolom yang sama dan musim tanam sama (MT) tidak berbeda nyata pada taraf 5% dengan *duncan multiple range test* (DMRT)

Sumber: Sofyan *et al*. (2001)

Pengaruh sipramin terhadap hasil tebu

Penelitian pemupukan sipramin dalam budi daya tebu telah dilakukan di Pasuruan, Kediri, dan Jember (Premono *et al*., 2001). Pada penelitian tersebut telah dicoba pengaruh takaran empat macam sipramin dari baku (3.500 l ha^{-1}) sampai berlebihan (32.000 l ha^{-1}) terhadap bobot tebu dan potensi rendemen pada *plant cane* (PC), keprasan 1 (R1), keprasan 2 (R2) dan keprasan 3 (R3) pada percobaan di Pasuruan (Inceptisols), Kediri (Entisols) dan Jember (Inceptisols) menemukan bahwa di Pasuruan, pada perlakuan 28.000-32.000 l ha^{-1} terjadi penurunan bobot tebu keprasan 2 dan keprasan 3. Kenaikan bobot tebu karena takaran sipramin berlebihan, pada tanah berpasir (Kediri) lebih tinggi. Nampaknya lahan dengan tekstur berpasir sangat respon terhadap takaran sipramin yang berlebihan. Namun peningkatan tebu akibat takaran sipramin diikuti pula dengan persen kerobohan yang tinggi, yang pada akhirnya memacu pertumbuhan *sogolan*.

Potensi rendemen gula tebu

Upaya menghitung potensi rendemen dihitung dengan cara perkalian nilai nira NPP (nilai perahan pertama) dengan faktor rendemen. Pada Tabel 17 disajikan potensi rendemen dari pengamatan pada tebu hasil tebangan percobaan di Pasuruan (Premono *et al*., 2001).

Tabel 17. Potensi rendemen gula tebu pada *plant cane* (PC), keprasan 1 (R1), keprasan 2 (R2) dan keprasan 3 (R3) pada percobaan di Pasuruan

Pupuk	Potensi rendemen				Rendemen nyata	
	PC	R1	R2	R3	R2	R3
	%					
ZA 0,7 t ha^{-1}	10,75	8,15	7,18	7,84	6,48	6,99
Sipramin 3.500 l ha^{-1}	10,44	6,90	7,32	6,87	6,07	6,57
Sipramin 7.000 l ha^{-1}	8,48	6,28	8,04	7,49	6,08	5,07
Sipramin 14.000 l ha^{-1}	7,07	5,68	6,48	7,86	4,19	5,17
Sipramin 28.000 l ha^{-1}	7,00	5,55	6,98	6,78	4,05	4,29

Pada perlakuan sipramin berlebihan, potensi kehilangan rendemen mencapai 24-42%. Perbedaan yang cukup besar dari nilai potensi rendemen terhadap rendemen nyata pada perlakuan sipramin berlebihan dapat disebabkan oleh kualitas nira yang kurang baik, yakni dengan adanya unsur-unsur bukan sukrosa seperti gula reduksi dan amilum, yang akan mempengaruhi dalam pengolahan di pabrik.

Pengaruh sipramin terhadap sifat-sifat tanah

1. Kimia tanah

Sampai batas 1-2 kali takaran baku, penurunan pH tidak nyata, tetapi secara umum dapat dikemukakan bahwa nilai pH tanah menurun dengan meningkatnya takaran sipramin (Premono *et al*., 2001). Pada Tabel 18 disajikan perubahan pH tanah selama 4 tahun dengan peningkatan takaran sipramin di Kediri. Hal tersebut sejalan dengan apa yang dikemukakan oleh Sofyan *et al*. (2001) bahwa pemberian sipramin secara terus-menerus (enam kali pertanaman) pada takaran 2.500–5.000 l ha^{-1} dapat menurunkan pH tanah antara 0,2-0,4 poin dibanding dengan kontrol.

Tabel 18. Perubahan pH tanah selama 4 tahun diberi pupuk sipramin

Sipramin	Kediri			
	1997	1998	1999	2000
l ha^{-1}				
0	5,86	5,6	5,1	5,2
3.500-4.000	5,71	5,2	4,9	5,0
7.000-8.000	4,95	5,1	4,3	4,8
14.000-16.000	4,91	4,8	4,2	4,8
28.000-32.000	4,41	4,7	3,9	4,4
BNT 5 %	0,90	0,20	0,49	0,50

Sumber: Premono *et al.* (2001)

Pemberian sipramin secara berlebihan juga menyebabkan berkurangnya Ca^{2+} dan Mg^{2+} tanah. Penurunan ini sejalan dengan penurunan pH tanah, terutama terjadi pada pemberian sipramin 2-8 kali takaran baku. Penurunan pH tanah dapat melemahkan ikatan koloid-Ca atau koloid-Mg karena berkurangnya muatan negatif dari koloid tanah. Berkurangnya kalsium dan magnesium akibat sipramin berlebihan akan semakin terasa pada tanah-tanah bertekstur pasir (Premono *et al*., 2001).

Hasil pengamatan pemberian berlebihan sipramin selama 4 tahun terhadap natrium (Na) tanah dari tiga lokasi Kediri, Jember dan Pasuruan disajikan pada Tabel 19. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa kadar natrium tanah (Na^{+}) sangat bervariasi, tidak menunjukkan pola yang jelas. Meskipun sipramin mengandung Na_2O cukup tinggi (0,4-2,0), ternyata pemberian sipramin secara terus-menerus selama 4 tahun tidak menyebabkan akumulasi Na^{+} dalam tanah. Hal tersebut diduga sebagian natrium diserap oleh tanaman karena merupakan unsur hara mikro, selain itu pengaruh natrium yang terdispersi dalam koloid bergabung dengan organik tanah membuat agregat tanah menjadi stabil dan tanah menjadi lebih gembur (Jury *et al*., 1991).

Tabel 19. Kandungan natrium setelah 4 tahun pemberian sipramin dalam tanah

Sipramin	Natrium		
	Kediri	Jember	Psuruan
l ha^{-1}	me 100 g^{-1}		
0	0,052	0,047	0,910
3.500-4.000	0,053	0,058	1,218
7.000-8.000	0,048	0,052	1,022
14.000-16.000	0,057	0,058	0,592
28.000-32.000	0,047	0,045	0,595
BNT 5 %	0,01	0,01	0,17

Sumber: Premono *et al.* (2001

2. Fisika tanah

Pada penelitian Premono *et al.* (2001) Pemberian sipramin terhadap tanah di tiga lokasi Kediri, Jember dan Pasuruan selama 4 tahun berturut-turut tidak menyebabkan berat volume (BD), dan kemampuan tanah dalam menahan air tidak menunjukkan perbedaan yang nyata akibat perlakuan sipramin berlebihan. Sedang nilai permeabilitas tanah berpasir di Kediri menurun dengan pemberian sipramin takaran 4-8 kali baku. Permeabilitas tanah bertekstur sedang di Jember meningkat dengan pemberian sipramin

pada kisaran takaran 4-8 kali baku (Tabel 20). Kekerasan tanah (ketahanan penetrasi tanah) pada ke dalaman tanah 0, 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 cm tidak berbeda antara plot-plot tanpa sipramin dan plot-plot dengan perlakuan sipramin pada takaran baku maupun takaran sipramin berlebihan. Tanah yang ditanami tebu, lebih gembur daripada tanah yang diberakan. Nilai kekerasan tanah pada kedalaman olah tanah-tanah di tiga lokasi penelitian masih tergolong normal, yakni 0-25 kg cm^{-2}.

Tabel 20. BD tanah, kapasitas menahan air, dan permeabilitas setelah 4 tahun berturut-turut diberi pupuk sipramin di Kediri, Pasuruan, dan Jember

Sipramin	Kediri	Pasuruan	Jember
l ha^{-1}		BD (g cm^{-3})	
0	1,12	0,92	1,22
3.500-4.000	1,30	0,91	1,21
7.000-8.000	1,29	0,89	1,21
14.000-16.000	1,29	0,81	1,21
28.000-32.000	1,27	0,79	1,17
LSD 5 %	1,117	0,179	0,170
		kapasitas menahan air (%)	
0	9,91	29,91	16,26
3.500-4.000	9,91	29,91	16,86
7.000-8.000	10,22	28,40	16,99
14.000-16.000	10,22	28,11	19,41
28.000-32.000	10,92	29,00	18,22
LSD 5 %	2,15	3,40	2,92
		permeabilitas (mm jam^{-1})	
0	23,00	2,11	8,99
3.500-4.000	21,22	3,99	9,21
7.000-8.000	22,40	2,91	8,51
14.000-16.000	22,91	3,14	12,22
28.000-32.000	20,00	3,62	11,11
LSD 5 %	2,117	2,011	4,660

Sumber: Sofyan *et al.* (2001)

Sedangkan pada penelitian Sofyan *et al.* (2001) hasil analisis beberapa sifat fisik tanah (BD, ruang pori total, pori drainase cepat, dan pori drainase lambat) pada tekstur tanah kasar dari lokasi penelitian di Gurah, Kediri dan Saradan, Madiun yang selama 10 tahun berturut-turut dipupuk sipramin menunjukkan hasil tidak berbeda dengan dari perlakuan tanpa

sipramin. Dengan demikian, artinya bahwa penggunaan sipramin tidak menyebabkan tanah menjadi keras.

3. Biologi tanah

Premono *et al* (2001) pada penelitian pengaruh Sipramin tahun pertama setelah percobaan terhadap biologi di ketiga lokasi (Kediri, Jember, dan Pasuruan) secara umum mendapatkan populasi mikroba (Tabel 21) di dalam tanah cenderung lebih baik pada perlakuan-perlakuan pemberian sipramin takaran berlebihan daripada takaran baku, terutama pada tanah-tanah yang memiliki tekstur kasar seperti Kediri. Tetapi ada kekecualian pada pemberian sipramin (Orgami) 4-8 kali takaran baku khususnya di Pasuruan populasi mikroba mengalami penurunan, hal ini diduga awalnya terjadi peledakan populasi mikroba dalam tanah yang menyebabkan kompetesi ruang dan nutrisi sehingga pada akhirnya menurunkan populasi mikroba. Selain fenomena kompetisi, penurunan populasi ini dapat disebabkan oleh terjadi akumulasi cairan yang bisa menimbulkan plasmolisis dan munculnya senyawa organik karena dekomposisi secara anaerobik terutama pada tanah bertekstur halus.

Tabel 21. Pengaruh pemberian sipramin terhadap populasi mikroba tanah pada tahun pertama setelah percobaan

Sipramin	Kediri		Jember		Pasuruan	
	Amina	Orgami	Amina	Orgami	Amina	Orgami
l ha^{-1}	x 10^5 cfu g $tanah^{-1}$					
0	36,6	86,5	42,6	48,1	0,6	49,9
3.500-4.000	49,3	94,0	42,0	39,2	5,6	84,0
7.000-8.000	52,3	55,8	58,9	60,4	51,7	48,8
14.000-16.000	94,8	98,3	69,7	52,2	66,8	0,6
28.000-32.000	94,5	113,3	60,5	62,5	51,7	6,3

Sumber: Premono *et al* (2001)

PENUTUP

Pupuk limbah industri sebelum dimanfaatkan harus melalui proses pengolahan limbah dengan maksud menurunkan suhu limbah, pH maupun pengaruh negatif bahan beracun berbahaya (B3), seperti logam berat.

Perlu penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh penggunaan pupuk limbah industri secara terus-menerus terhadap berbagai sifat tanah dan tanaman dalam jangka lebih panjang.

Limbah industri pengolahan hasil pertanian lainnya seperti nanas dan tapioka serta hasil pertanian lainnya belum banyak dimanfaatkan sebagai pupuk dalam budi daya pertanian, oleh karena itu masih ada peluang penelitian dan pengembangannya.

Penggunaan pupuk dari bahan limbah industri memiliki prospek untuk mensubstitusi kebutuhan pupuk anorganik yang semakin langka dan semakin mahal harganya bagi petani.

DAFTAR PUSTAKA

Anwar, E.K, Agusman, dan Fahmudin Agus. 2000. Pengaruh Limbah Crude Palm Oil (CPO) Terhadap Struktur Tanah. Bagian Proyek Penelitian Sumberdaya Lahan dan Agroklimat Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Proyek Pengkajian Teknologi Pertanian Partisipasif. The Participatory Development of Agricultural Technology Project (PAATP). Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian Departemen Pertanian. Laporan Akhir. No. 64-c/Puslittanak/2000 (Tidak dipublikasikan).

Anwar, E.K, Kuswanda, Tris Eryando, dan Dewi Susana. 2002. Pemanfaatan Limbah Cair Pabrik Gula Tebu Bagi Upaya Meningkatkan Kesuburan Lahan. Laporan Akhir Kerjasama BAPEDAL & Lembaga Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Indonesia dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. 2002 (Tidak dipublikasikan).

Arifin, S., Sumaryono, dan A. Bachtiar. 1998. Pengujian Amonium Sulfat oleh Sipramin terhadap Produksi Tebu Tanaman Pertama di Lahan Sawah Bertekstur Halus Pasuruan. hlm. 22-32 *dalam* Prosiding Seminar Pengujian Sipramin terhadap Produksi. Hasil Pengolahan Tebu, dan Sifat-sifat Tanah. P3GI.

Arsyad, S. 1976. Pengawetan Tanah dan Air. Departemen Ilmu-ilmu Tanah. Fakultas Pertanian. IPB. Bogor.

Balittan, 1991. Laporan Penelitian Penggunaan Pupuk Organik Cair Samsung pada Padi Sawah dan Jagung MT. 1990/1991. Kerjasama PT Cheil Samsung Astra dengan Balai Penelitian Tanaman Pangan, Bogor (Tidak dipublikasikan).

Fessenden, R.J., and J.S Fessenden. 1999. Kimia Organik. Jilid ketiga. University of Montana. Alih Bahasa: Aloysius Hadyana Pudjaatmaka Ph.D. Penerbit Erlangga. Jakarta.

Gunadi, D.H. 2000. Balai Bioteknologi Perkebunan Bogor (Komunikasi pribadi).

Hardjowigeno, S. 1987. Ilmu Tanah. Penerbit PT. MEDIYATAMA SARANA PERKASA, Jakarta.

Jury, W.A., W.R. Gardner, and W.H. Gardner.1991. Soil Physics. John Wiley and Sons, Inc., New York.

Killham, K., and R. Foster. 1994. Soil ecology. Cambrige University Press.

Mulyadi, M. Dan H. Lestari.1993. Komposisi kimia pupuk cair dari limbah MSG di Lampung. Berita No. 10. Pusat Penelitian Perkebunan Gula Indonesia, Pasuruan.

Premono, M.E., S.Simoen, E. Purnomo, S. Purnomo, S.Arifin, Sumoyo, Soeparmono, A. Bachtiar, S. Effendi, N. Andriani, dan Chujaeni. 2001. Pengaruh sipramin terhadap tebu, sifat nira, kualitas gula dan sifat-sifat tanah. *Dalam* Prosiding Seminar Pengaruh Sipramin terhadap Tanaman Pangan dan Tebu serta Dampaknya terhadap Tanah. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Deptan.

Russell, E.J. and E.W. Russell. 1950. Soil Condition and Plant Growth. London. Longmans Green.

Soeparmono, O. Soedjarwo, dan Suud Effendy. 1998. Pengujian Substitusi Amonium Sulfat oleh Sipramin terhadap Produksi Tebu Tanaman Pertama di Lahan Kering Bertekstur Kasar, Kediri. *Dalam* Prosiding Seminar Pengujian Sipramin terhadap Produksi. Hasil Pengolahan Tebu, dan Sifat-sifat Tanah. Malang, 25-26 Nopember 1997.

Sofyan, A., D. Setyorini, dan J. Sri Adiningsih. 1997. Dampak penggunaan pupuk cair sipramin terhadap sifat kimia tanah. hlm. 23-53 *dalam* Prosiding Seminar Dampak Penggunaan Pupuk Cair Sipramin terhadap Sifat Kimia, Fisika dan Mikroorganisme Tanah. Malang, 10 April 1997.

Sofyan, A., A. Abdurachman, J. Sri Adiningsih, T. Prihatini, dan L.Y. Krisnadi. 2001. Pengaruh sipramin terhadap hasil dan mutu tanaman pangan serta dampaknya terhadap tanah. *Dalam* Prosiding Seminar Pengaruh Sipramin terhadap Tanaman Pangan dan Tebu serta Dampaknya terhadap Tanah. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian. Deptan.

Sudaryono dan A. Taufik. 1994. Tanggap tanaman padi dan jagung terhadap pupuk cair Saritana pada tanah Vertisol di Ngawi. hlm. 134-155 *dalam* Perakitan Teknologi Budi daya Tanaman Pangan untuk Tanah Vertisol. Kasus Kabupaten Ngawi. Balittan. Malang.

Tim Ahli Bimas Propinsi Jatim. 1995. Upaya Pemecahan Masalah Sisa Proses Asam Amino sebagai pupuk Cair di Jawa Timur (Tidak dipublikasikan).

Tim Pencari Fakta P3GI. 1994. Laporan untuk Eksekutif: Aplikasi Amina, Orgami, dan Bagitami pada Tanaman Tebu di Wilayah Kerja PTP XXI-XXII (Persero). Tinjauan Sosial Ekonomi, Dampaknya pada Mutu Tebu, Nira dan Sifat Kimia Tanah. P3GI, Pasuruan (Tidak dipublikasikan).

Yoshida S., D. Forno, J. Cock, and K. Gomez. 1976. Laboratory Manual for Physiological Studies Rice. IRRI. Philippines. Third edition.

6. BAKTERI PENAMBAT NITROGEN

R.D.M. Simanungkalit, Rasti Saraswati, Ratih Dewi Hastuti, dan Edi Husen

Summary

Nitrogen-fixing bacteria. The chapter deals with taxonomy, distribution, mechanism of nitrogen fixation, inoculant technology and utilization of inoculant**.** There are two groups of nitrogen-fixing bacteria, e.i free-living nitrogen-fixing bacteria and symbiotic nitrogen-fixing bacteria. Though of the latest development in the taxonomy of symbiotic nitrogen fixing bacteria in the world, very little progress made in identifying indigenous bacteria, so it is very difficult to know how rich is the diversity of rhizobia in Indonesia. Rhizobial inoculant has been produced commercially in the 1980's in order to support the national intensification program of soybean. Methods of inoculant production has followed the existing standards of production technology. Successful inoculation has been shown in some soybean growing areas. Currently, rhizobial inoculant in the form of compound biofertilizer, in which soybean–infecting rhizobia are mixed with other functional group microbes such as phosphate-solubilizing microbes and free-living nitrogen-fixing bacteria. However, production technology of compound biofertilizer has not developed yet.

Kebutuhan bakteri akan unsur N dapat dipenuhi dari sumber N yang terdapat dalam berbagai senyawa organik maupun dari N_2 udara. Beragam jenis bakteri bertanggung jawab pada penambatan N_2 secara hayati, mulai dari Sianobakter (ganggang hijau biru) dan bakteri fotosintetik pada air tergenang dan permukaan tanah sampai pada bakteri heterotrofik dalam tanah dan zona akar (Ladha and Reddy, 1995; Boddey *et al*., 1995; Kyuma, 2004). Bakteri mampu melakukan penambatan nitrogen udara, baik melalui nonsimbiosis (*free-living nitrogen-fixing bacteria*) maupun simbiosis (*root-nodulating bacteria*).

Bakteri penambat N_2 hidup bebas (nonsimbiosis)

Berbagai jenis bakteri penambat N_2 yang hidup-bebas (non-simbiotik) di tanah sawah tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Berbagai jenis bakteri penambat N_2 yang hidup-bebas (non-simbiotik) pada tanah sawah

Bakteri	
1. Bakteri fotosintetik	
Rhodospirillaceae	*Rhodospirillum, Rhodopseudomonas, Rhodomicrobium*
Chromatiaceae	*Chromatium, Ectothiorhodospira, Triospirillum*
Chlorobiaceae	*Chlorobium, Chloropseudomonas*
2. Bakteri aerobik gram-negatif	
Azotobacteriaceae	*Azotobacter, Azotomonas, Beijerinckia, Derxia*
Pseudomonadeceae	*Pseudomonas (P. azotogensis)*
3. Bakteri anaerobik fakultatif gram-negatif	
Enterobacteriaceae	*Klebsiella (K. pneumoniae), Enterobacter (E. cloecae), Escherichia (E. intermedia), Flavobacterium sp.*
4. Bakteri anaerobik gram-negatif	*Desulfovibrio (D. vulgaris, D.desulfuricans)*
5. Bakteri pembentuk metan	
Methanobacteriaceae	*Methanobacterium, Methanobacillus*
6. Bakteri pembentuk spora	
Bacillaceae	*Bacillus (B. polymycxa, B. macerans, B. circulans), Clostridium (C. pasteurianum, C. butyricum), Desulfotomaculum sp.*
7. Bakteri analog Actinomycetes	
Mycobacteriaceae	*Mycobacterium (M. flavum)*
Ganggang hijau biru	
1. Alga hijau- biru pembentuk heterosista	
Nostocaceae	*Anabaena, Anabaenopsis, Aphnizomenon, Aulosira, Chlorogloepsis, Cylindrospermum, Nostoc*
Stigonemataceae	*Hapalosiphon, Mustigocladus, Stigonema*
Scytonemataceae	*Microchaete, Scytonema, Tolypotrix*
Rivulariaceae	*Calothrix*
2. Alga hijau-biru yang tidak membentuk heterosista	
Chloococcaceae	*Anacystis, Aphanothece, Gloecapsa, Gloeothece, Microcystis*
Eentophysalidaceae	*Chlorogloea*
Oscillatoriaceae	*Lyngbya, Oscillatoria, Phormidium, Trichodesmium*
ScytonemataceAe	*Plectonema*

Sumber: Kyuma (2004)

Selama ribuan tahun sawah-sawah di Asia dapat mempertahankan kesuburannya karena masih adanya ganggang hijau-biru yang dapat menambat nitrogen di sawah tersebut. Baru setelah padi varietas unggul yang sangat responsif terhadap pupuk anorganik (seperti urea) banyak digunakan petani, ganggang biru-hijau mulai menghilang dari sawah-sawah.

Ganggang hijau biru ini dapat dilihat di sawah dalam bentuk gumpalan seperti lendir di sela-sela rumpun padi (Gambar 1).

Gambar 1. Ganggang hijau-biru yang hidup di sawah
Foto: R.D.M. Simanungkalit

Penelitian untuk mengevaluasi peranan alga hijau biru pada tanah sawah di daerah Yogjakarta pernah dilakukan oleh Jutono (1973). Ia mendapatkan kelimpahan anggota-anggota dari famili Nostocaceae (7 genus dan 12 spesies) dan Oscillatoriaceae (8 genus dan 18 spesies) umumnya lebih tinggi daripada famili-famili lain. Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa pupuk N dan P mempengaruhi komposisi (penurunan jumlah alga hijau biru penambat nitrogen) dan ukuran besarnya populasi(kenaikan biomassa alga).

Ditinjau dari aspek ekologi, bakteri penambat N_2 yang mengkolonisasi tanaman gramineae (rumput-rumputan) dapat dikelompokkan menjadi tiga golongan yaitu: (a) bakteri rizosfer penambat N_2 (diazotrof) (heterotrofik dan fototrofik); (b) bakteri diazotrof endofitik fakultatif; dan (c) bakteri diazotrof endofitik obligat.

Bakteri penambat N_2 di daerah perakaran dan bagian dalam jaringan tanaman padi, yaitu *Pseudomonas* spp., *Enterobacteriaceae*, *Bacillus*, *Azotobacter, Azospirillum* dan *Herbaspirillum* telah terbukti mampu meningkatkan secara nyata penambatan N_2 (James dan Olivares, 1997). Bakteri penambat N_2 pada rizosfer tanaman gramineae, seperti *Azotobacter paspali* dan *Beijerinckia* spp. termasuk salah satu dari kelompok bakteri aerobik yang mengkolonisasi permukaan akar (Baldani *et al*., 1997). *Azotobacter* merupakan bakteri penambat N_2 yang mampu menghasilkan substansi zat pemacu tumbuh giberelin, sitokinin, dan asam indol asetat, sehingga pemanfaatannya dapat memacu pertumbuhan akar (Alexander, 1977). Populasi *Azotobacter* dalam tanah dipengaruhi oleh pemupukan dan jenis tanaman.

Kelompok prokariotik fotosintetik terbesar dan menyebar secara luas yaitu Sianobakteri (Albrecht,1998). Kemampuannya menambat N_2 mempunyai implikasi untuk mempertahankan kesuburan ekosistem pada kondisi alami lahan pertanian. Sianobakteri dan bakteri fotosintetik hidup dominan pada air mengalir di permukaan tanah. Sianobakteri yang membentu spora dapat bertahan hidup lama pada keadaan kering sehingga populasi pada akhir musim kering menjadi melimpah. Pertumbuhan Sianobakteri dalam tanah meningkatkan pembentukan agregat sehingga mempengaruhi infiltrasi, aerasi, dan suhu tanah. Belum ada informasi mengenai eksudat N yang dihasilkan oleh Sianobakteri. Kehadiran Sianobakteri sangat tergantung pada pH dan ketersediaan P tanah. Suhu perairan yang optimum bagi pertumbuhan Sianobakteri yaitu sekitar 30-35^{o}C. Pada musim hujan, kurangnya sinar dan air hujan akan membatasi pertumbuhan Sianobakteri. Sianobakteri mengasimilasi P lebih banyak daripada yang diperlukan untuk hidupnya, dan menyimpannya dalam bentuk polyphosphat yang akan digunakan pada waktu kondisi kekurangan P (Roger and Kulasooriya, 1980). Fotosintesis dapat meningkatkan pH air sawah maka selama masa pertumbuhan, kebanyakan dari N yang dilepas akan dimobilisasi kembali atau akan hilang melalui penguapan dalam bentuk NH_3, sehingga N yang berasal dari Sianobakteri akan menjadi bentuk tersedia bagi tanaman melalui proses mineralisasi setelah ganggang mati. Besarnya sumbangan Sianobakteri terhadap kebutuhan N tanaman ditentukan oleh besarnya biomassa, masa antara dua musim tanam, laju penambatan N_2, dan besarnya N tanah yang tersedia bagi tanaman. Potensi N yang disumbangkan oleh bakteri penambat nitrogen yang hidup-bebas tidak terlalu tinggi, karena N yang berhasil ditambat berada di luar jaringan tanaman, sehingga sebagian hilang sebelum diserap oleh tanaman (Ladha *et al*., 1997).

Potensi N yang disumbangkan oleh bakteri diazotrof endofitik lebih besar dari diazotrof nonendofitik, karena N yang berhasil ditambat tidak ada yang hilang. Kolonisasi bakteri diazotrof endofitik dalam jaringan tanaman dapat mengeksploitasi substrat karbon yang disuplai oleh tanaman tanpa berkompetisi dengan mikroba lain. Bakteri ini seringkali berlokasi dalam akar di bawah tanah atau berada pada jaringan yang kompak, seperti buku batang dan pembuluh xilem, sehingga bakteri ini mampu tumbuh pada lingkungan dengan tekanan O_2 yang rendah yang sangat penting bagi aktivitas enzim nitrogenase (James dan Olivares, 1997). Beberapa bakteri diazotrof endofitik selain mampu menambat N_2 juga mampu mensekresikan asam indol-3-asetat (Ladha *et al*., 1997). Pada umumnya bakteri diazotrof endofitik tidak menyebabkan penyakit, berproliferasi di dalam jaringan, tetapi tidak membentuk endosimbion di dalam sel tanaman yang hidup. Bakteri diazotrof endofitik biasanya hidup di dalam ruang interseluler atau pembuluh xilem akar, batang, daun, dan permukaan biji (James *et al*., 2000).

Bakteri diazotrof endofitik fakultatif yang merupakan simbion pada tanaman *Azolla* yaitu *Anabaena azollae*. Bakteri ini tidak pernah dijumpai, hidup bebas, tetapi selalu dijumpai sebagai endofit yang terdapat di dalam rongga atau celah daun *Azolla*. Penambatan nitrogen terjadi pada sel *heterocysts Azolla*, yaitu sel yang berasal dari sel vegetatif yang berubah bentuk menjadi sel yang berdinding tebal, yang tersebar secara teratur di sepanjang filamen.

Bakteri diazotrof endofitik obligat hanya mengkolonisasi bagian dalam akar dan bagian luar (aerial part) tanaman, dan hanya dapat diisolasi dari tanaman inang. Bakteri yang tergolong kelompok ini ialah *Herbaspirillum seropedicae*, *Acetobacter diazotrophicus*, *Azoarcus* sp, *Burkholderia* sp. (Baldani *et al*., 1997). Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Herbaspirillum* yang diinokulasikan pada benih padi dalam larutan Hoagland yang mengandung ^{15}N-label dapat meningkatkan 40% total nitrogen tanaman. Infeksi *Herbaspirillum* spp. pada biji tanaman padi terjadi melalui akar dan stomata kemudian ditranslokasikan melalui xilem ke seluruh bagian tanaman (Olivares *et al*., 1996).

Bakteri bintil akar

Bakteri bintil akar kacang-kacangan yang biasa dikenal dengan nama kolektif rhizobia merupakan bakteri tanah yang mampu melakukan penambatan nitrogen udara melalui simbiosis dengan tanaman kacang-kacangan. Penggunaan *Rhizobium* untuk semua jenis rhizobia masih banyak digunakan pada publikasi (makalah, skripsi, thesis, dan disertasi) di Indonesia, pada hal taksonomi rhizobia sudah banyak berubah. Pada mulanya semua bakteri bintil akar termasuk *Rhizobium leguminosarum.* Bagaimana perkembangan taksonomi itu dapat dilihat pada Tabel 2.

Pemanfaatan rhizobia sebagai inokulan pupuk hayati sangat mendukung upaya peningkatan produktivitas tanaman kacang-kacangan, khususnya kedelai di Indonesia. Kesuksesan inokulasi rhizobia sangat dipengaruhi oleh kesesuaian inokulan rhizobia dengan jenis tanah yang diinokulasi dan faktor kompetisi.

Berdasarkan sequen 16S ribosomal RNA, rhizobia dikelompokkan ke dalam tiga genus, yaitu *Rhizobium*, *Bradyrhizobium* dan *Azorhizobium* (Young *et al*., 1991; Willems and Collins, 1993; Yanagi and Yamasato, 1993). Selanjutnya Young dan Haukka (1996) mengelompokkan rhizobia menjadi lima genus yaitu *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, *Sinorhizobium*, *Mesorhizobium* dan satu genus yang belum diidentifikasi. De Lajudie *et al*. (1998) menambahkan lagi satu spesies baru yaitu *Allorhizobium undicola,* bakteri penambat nitrogen yang menodulasi *Neptunia natans* di Senegal.

Klasifikasi terbaru rhizobia menjadi enam genus dan satu genus yang belum teridentifikasi dengan spesies-spesies masing-masing genus yang dikenal hingga saat ini seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Perkembangan taksonomi rhizobia

Perkembangan	Sumber
Penamaan *Rhizobium leguminosarum* untuk semua bakteri bintil akar pada legum	Frank, 1889
Enam spesies bakteri bintil akar pada legum, yaitu: *Rhizobium leguminosarum* (membentuk bintil pada *Lathyrus, Pisum, Vicia and Lens*), *R. trifolii* (membentuk bintil pada *Trifolium), R.* phaseoli (membentuk bintil pada *Phaseolus*), *R. meliloti* (membentuk bintil pada *Melilotus, Medicago, Trigonella*), *R. japonicum* (membentuk bintil pada kedelai), *R. lupin* (membentuk bintil pada *Lupinus*)	Fred *et al*., 1932
Bakteri tumbuh cepat dimasukkan pada genus *Rhizobium* dan bakteri tumbuh lambat dimasukkan pada genus *Bradyrhizobium*	Jordan, 1982
Penggunaan teknik molekuler untuk mengidentifikasi rhizobia; klasifikasi rhizobia menjadi lima genus, yaitu *Rhizobium, Sinorhizobium*, *Mesorhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Azorhizobium*, dan satu genus belum teridentifikasi	Young and Haukka, 1996
Tambahan satu genus baru pada klasifikasi yang ada, yaitu *Allorhizobium*	De Lajudie *et al*., 1998

Tabel 3. Klasifikasi terbaru rhizobia

No	Genus	Spesies
1.	*Rhizobium*	*Rhizobium leguminosarum*
		Rhizobium tropici
		Rhizobium etli
2.	*Sinorhizobium*	*Sinorhizobium meliloti*
		Sinorhizobium fredii
		Sinorhizobium saheli
		Sinorhizobium teranga
3.	*Mesorhizobium*	*Rhizobium loti*
		Rhizobium huakuii
		Rhizobium ciceri
		Rhizobium tianshanense
		Rhizobium mediterraneum
4.	*Bradyrhizobium*	*Bradyrhizobium japonicum*
		Bradyrhizobium elkanii
		Bradyrhizobium liaoningense
5.	*Azorhizobium*	*Azorhizobium caulinodans*
6	*Allorizobium*	*Allorhizobium undicola*
7	Belum teridentifikasi	*Rhizobium galegae*

Genus-genus rhizobia dapat dibedakan melalui bentuk dan warna koloni, banyaknya produksi polisakarida ekstraseluler, laju pertumbuhan (waktu yang diperlukan untuk terbentuknya koloni), perubahan pH karena pertumbuhan rhizobia dengan menggunakan indikator bromthimol blue (BTB) (Swift and Bignell, 2001) Perbedaan antara genus-genus ini dapat dilihat seperti di bawah ini:

1). *Allorhizobium*, *Rhizobium*, dan *Sinorhizobium* memiliki bentuk koloni bulat, cembung (*convex*), diameternya 2-4 mm, produksi polisakarida ekstrseluler biasanya banyak sekali, semi-*translusen*, *raised*, bergetah (mucilaginous), kebanyakan bagian tengahnya berwarna kekuning-kuningan (karena perubahan pH), tergolong tumbuh cepat, kurang dari 3 hari.

2). *Mesorhizobium*, sama dengan *Rhizobium*, hanya laju tumbuhnya tergolong sedang (intermediate) 4-5 hari.

3). *Bradyrhizobium* memiliki bentuk koloni bulat, diameternya tidak melebihi 1 mm, produksi polisakarida ekstraseluler dari banyak sekali sampai sedikit (produksi sedikit ini umumnya pada strain yang laju tumbuhnya lebih dari 10 hari), tidak tembus cahaya (opaque), jarang yang tembus cahaya (translusen), berwarna putih, cembung, teksturnya granuler, bersifat alkalis (menaikkan pH), tergolong tumbuh lambat atau sangat lambat, laju tumbuhnya 6 hari atau lebih.

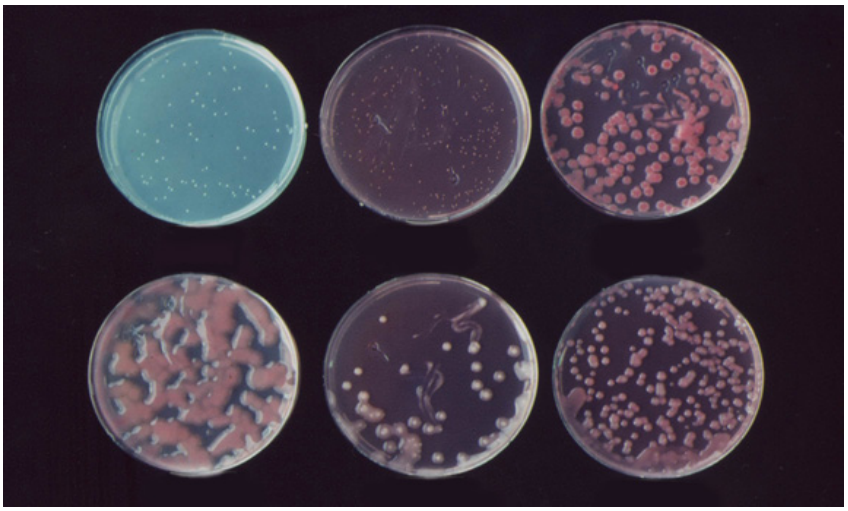
4). *Azorhizobium* memiliki bentuk koloni bulat, diameternya 0,5 mm, berwarna krem, produksi polisakarida ekstraseluler sangat sedikit (lebih sedikit dari *Bradyrhizobium*), reaksinya bersifat alkalis, tergolong tumbuh cepat sampai sedang dengan laju tumbuh 3-4 hari.

Gambar 2 menunjukkan berbagai bentuk koloni rhizobia pada media YMA + merah Kongo. Informasi tentang identifikasi rhizobia asli Indonesia menurut klasifikasi terbaru sangat terbatas. Waluyo (2005) meneliti 21 isolat rhizobia dari Jawa dan Sumatera dengan menggunakan teknik molekuler Ia mendapatkan tiga spesies rhizobia yang menodulasi kedelai, yaitu *Bradyrhizobium japonicum*, *Bradyrhizobium elkanii,* dan *Sinorhizobium fredii*. Penelitian populasi rhizobia asli Indonesia lebih jauh dengan menggunakan teknik molekuler ini diperlukan untuk dapat mengidentifikasi spesies-spesies lain yang mungkin ada.

Bradyrhizobium

Taksonomi genus *Bradyrhizobium* sampai saat ini masih membingungkan. *Rhizobium* yang dapat menodulasi tanaman kedelai secara efektif dikenal sebagai *Bradyrhizobium japonicum* (Jordan, 1982), meskipun pada kenyataannya *Bradyrhizobium japonicum* bukan merupakan mikrosimbion tunggal untuk inang ini. *Strain* lain yang mampu menodulasi tanaman kedelai berupa *Bradyrhizobium elkanii* (Kuykendall *et al.*, 1992)

dan *Bradyrhizobium liaoningense* (Xu *et al.,* 1995). Kemampuan menodulasi tanaman kedelai dari *Bradyrhizobium japonicum* ternyata lebih tinggi daripada *Bradyrhizobium elkanii*.



Gambar 2. Berbagai bentuk koloni rhizobia
Foto: R.D.M. Simanungkalit

Bradyrhizobium sebagai mikroba kemoorganotrof, pada dasarnya dapat menggunakan berbagai karbohidrat, garam-garam mineral dan asam-asam organik (Allen and Allen, 1981). Di bawah ini dibahas perbedaan antara *Bradyrhizobium* dan *Sinorhizobium*. Medium yang cocok untuk pertumbuhan *Bradyrhizobium japonicum* ialah sari kamir manitol (SKM= YEMA) agar. Pada media karbohidrat, pertumbuhan *Bradyrhizobium* biasanya disertai pembentukan lendir polisakharida ekstraseluler dalam jumlah yang cukup banyak. *Bradyrhizobium japonicum* merupakan rhizobia tumbuh lambat (5-7 hari) pada medium SKM, bereaksi basa pada medium manitol-garam mineral, memiliki koloni berbentuk bundar, berwarna putih, berelevasi cembung, cenderung bertekstur granular, berdiameter tidak lebih dari 1 mm dalam masa inkubasi 5-7 hari pada medium SKM pada suhu 28^{o}C, dan umumnya resisten terhadap streptomisin, penisilin G, tetrasiklin, viomisin, vancomisin (Jordan, 1984). Koloni *Bradyrhizobium* yang ditumbuhkan pada medium SKM dan 0,0025% merah kongo, setelah inkubasi 7-10 hari pada suhu 28^{o}C dibedakan menjadi tiga tipe, yaitu LM (large mucoid), LW (large watery) dan SD (small dry). Koloni tipe LM berdiameter >1 mm, berlendir, cembung, *translucens* hingga *opaque*; tipe LW berdiameter >1 mm, berair, datar, *translucens*, cenderung granular

dengan tepian tidak teratur; tipe SD berdiameter <1 mm, cembung, *translucens* hingga hampir *opag*. Kebanyakan *Bradyrhizobium* indigenous memiliki tipe LM (Fuhrmann, 1990).

Asanuma dan Saraswati (1988) menemukan strain dari *Bradyrhizobium japonicum* toleran masam asal Indonesia (pH 4,5; 5uM P; 100 uM Al) yang dapat bertahan hidup di tanah masam di daerah Lampung dengan takaran pengapuran rendah 0,5 x Al-dd (pH 5,1; Al-dd 2,6 me 100 g^{-1}; Mn 216,2 ppm). Keefektifan simbiotik strain toleran masam ini rata-rata di atas 100%. Menurut Simanungkalit *et al*. (1995b) strain dari *B. japonicum* terpilih memiliki kemampuan untuk bertahan hidup dan memperbanyak diri dalam keadaan tergenang pada rizosfir tanaman padi. Hal ini diamati pada penelitian dinamika populasi bakteri bintil akar kedelai pada tanah latosol yang ditanami dengan sistem pola tanam padi/kedelai pada lahan kering dan lahan sawah di Citayam, Jawa Barat.

Gen-gen untuk fungsi simbiotik, nodulasi dan penambatan nitrogen pada *Bradyrhizobium japonicum* berada pada kromosom (Barbour *et al*., 1992). Selain itu, *Bradyrhizobium japonicum* juga memiliki plasmid berukuran besar yang dikenal sebagai *megaplasmid* (Masterson *et al*., 1982). *Bradyrhizobium japonicum* memiliki satu kromosom besar dan sirkular berukuran 8.7 Mpb dengan gen-gen simbiotik yang ter-*cluster* pada daerah 380 kpb (Kundig *et al*., 1993).

Sinorhizobium

Rhizobia tumbuh cepat dan secara *in vitro* bereaksi asam berhasil diisolasi pada tahun 1982 dari bintil akar kedelai yang dikoleksi di Republik Rakyat Cina (RRC). Strain-strain rhizobia tumbuh cepat tersebut infektif dan efektif terhadap varietas kedelai primitif Peking (P117852.B), *Glycine soja* Sieb. dan Zucc., namun sedikit atau tidak efektif terhadap varietas kedelai komersial yang tumbuh di USA. Berdasarkan studi perbandingan dalam hal keperluan nutrien, resistensi terhadap antibiotik, toleransi terhadap NaCl, profil plasmid, lokalisasi gen-gen untuk aktivitas nodulasi, hibridisasi DNA, dan karakter-karakter lainnya, maka diusulkan strain-strain tersebut ke dalam spesies baru *Rhizobium fredii*, dengan dua kemovar fredii dan siensis (Keyser *et al*., 1982; Scholla and Elkan, 1984). Chen *et al*. (1988) mengadakan studi lebih lanjut sehingga dikenal dua spesies *Sinorhizobium fredii* dan *S. xinjiangensis*.

Genus *Sinorhizobium* pertama kali diusulkan karena adanya beberapa perbedaan antara *R. fredii* dengan rhizobia lain (termasuk *R. meliloti*) (Chen *et al*., 1988). Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jarvis *et al*. (1992) antara *R. fredii* dan *R. meliloti* memiliki kemiripan, sehingga digolongkan ke dalam genus *Sinorhizobium*.

Sinorhizobium fredii merupakan rhizobia tumbuh cepat yang dapat menodulasi tanaman kedelai. Bakteri ini tumbuh 3-5 hari pada medium SKM, bereaksi asam pada medium manitol-garam mineral, dan koloninya berbentuk bundar, berelevasi cembung, agak tembus cahaya, lengket, berdiameter 2-4 mm selama masa inkubasi 3-5 hari pada medium SKM suhu 28^{o}C, berwarna putih *opaque* seperti susu dan umumnya sensitif terhadap streptomisin, penisilin G, tetrasiklin, viomisin, vancomisin (Jordan, 1984; Somasegaran and Hoben, 1994).

Jika pada *Bradyrhizobium* gen-gen utamanya terdapat pada kromosom, maka pada *Sinorhizobium* gen-gen tersebut terdapat pada plasmid. Gen-gen penyandi nitrogenase (gen *nif*) biasanya terkait dengan gen-gen lain untuk fungsi simbiotik. Pada *Sinorhizobium* juga didapatkan replikon ekstrakromosomal berukuran besar (megaplasmid) (Burkhardt *et al*., 1987).

Bradyrhizobium dan *Sinorhizobium* memegang peran penting dalam penghematan penggunaan pupuk nitrogen melalui simbiosisnya dengan tanaman kedelai. Pada beberapa daerah pertanaman kedelai di Indonesia kemampuan membentuk bintil akar sangat rendah walaupun telah diinokulasi oleh inokulan rhizobia yang efektif. Ketidakmampuan rhizobia bertahan hidup dalam kondisi tercekam, seperti kondisi masam-Al atau kekeringan, dan kemampuannya bersaing dengan rhizobia pribumi yang telah beradaptasi baik dalam lingkungannya menyebabkan rhizobia tidak dapat berkembang dengan baik. Untuk mengatasi masalah tersebut telah dilakukan koleksi *Bradyrhizobium* dan *Sinorhizobium* dari beberapa daerah sentra produksi kedelai di Indonesia, identifikasi dan seleksi strain yang mempunyai kemampuan menambat N tinggi berdaya kompetisi tinggi terhadap rhizobia pribumi dan tahan hidup dalam kondisi tercekam (tahan masam-Al dan tahan kekekeringan). Strain-strain yang unggul yang diperoleh selanjutnya dimanfaatkan untuk penelitian selanjutnya, dalam hal ini untuk pengembangan pupuk mikroba multiguna untuk meningkatkan efisiensi pemupukan menunjang swasembada kedelai.

Berdasarkan klasifikasi baru, terjadi perubahan nama genus/spesies yang menodulasi kacang-kacangan (beberapa contoh ditunjukkan pada Tabel 4). Tanaman kedelai dinodulasi oleh empat spesies (*Bradyrhizobium japonicum*, *B. elkanii*,. *B. liaoningense,* dan *Sinorhizobium fredii*). Akar *Sesbania rostrata* dinodulasi *Sinorhizobium indiaense*, sedangkan batangnya oleh *Azorhizobium caulinodans*. *Phaseolus vulgaris* dinodulasi oleh empat spesies genus *Rhizobium*.

Pembentukan bintil merupakan ciri dari bakteri penambat N_2 simbiotik. Semua bintil dibentuk pada akar, kecuali pada *Sesbania rostrata* bintil tidak hanya terbentuk pada akar tetapi juga pada batang seperti terlihat pada Gambar 3.

Tabel 4. Genus dan spesies rhizobia berbagai legum

Legum	Genus/spesies rhizobia	Keterangan
Kedelai (*Glycine max*)	*Bradyrhizobium japonicum*	Jordan (1982)
	B. elkanii	Kuykendall *et al.* (1992)
	B. liaoningense	Xu *et al*. (1995)
	Sinorhizobium fredii	Scholla *et al*. (1984)
Sesbania (*Sesbania rostrata)*	*Sinorhizobium indiaense* (bintil akar)	Ogasawara *et al.* (2003)
	Azorhizobium caulinodans (bintil batang)	Dreyfus *et al.* (1988)
Phaseolus vulgaris	*Rhizobium etli*	Segovia *et aL* (1993)
	R. gallicum	Amarger *et al.* (1997)
	R. giardini	Amarger *et al* (1997)
	R.tropici	Martinez-Romero *et al*., 1991

Mekanisme penambatan nitrogen

Konversi N_2 dari udara menjadi amonia dimediasi (dibantu) oleh enzim nitrogenase. Banyaknya N_2 yang dikonversi menjadi amonia sangat tergantung pada kondisi fisik, kimia, dan biologi tanah. Ketersediaan sumber energi (C-organik) di lingkungan rizosfir merupakan faktor utama yang menentukan banyaknya nitrogen yang dihasilkan (Alexander, 1977; Zuberer, 1998). Penambahan sisa-sisa tanaman (biomassa) sebagai sumber C ke dalam tanah memacu perkembangan populasi bakteri penambat N. Ini menjelaskan mengapa jumlah nitrogen yang ditambat oleh bakteri bervariasi di tiap tempat tergantung pada ketersediaan energi dan kemampuan bakteri penambat N bersaing dengan mikroba lain yang hidup dan perkembang-biakannya juga bergantung kepada sumber energi yang sama.

Gambar 3. Akar kedelai berbintil (Gambar atas) dan batang *Sesbania rostrata* berbintil (Gambar bawah)
Foto: R.D.M. Simanungkalit

Mekanisme penambatan nitrogen secara biologis dapat digambarkan melalui persamaan di bawah ini. Dua molekul amonia dihasilkan dari satu molekul gas nitrogen dengan menggunakan 16 molekul ATP dan pasokan elektron dan proton (ion hidrogen).

$$N_2 + 8\ H^+ + 8\ e^- + 16\ ATP = 2\ NH_3 + H_2 + 16\ ADP + 16\ P_i$$

Reaksi ini hanya dilakukan oleh bakteri prokariot, menggunakan suatu kompleks enzim nitrogenase. Enzim ini mengandung dua molekul protein yaitu satu molekul protein besi dan satu molekul protein molibden-besi. Reaksi ini berlangsung ketika molekul N_2 terikat pada kompleks enzim nitrogenase. Protein Fe mula-mula direduksi oleh elektron yang diberikan oleh ferredoksin. Kemudian protein Fe reduksi mengikat ATP dan mereduksi protein molibden-besi, yang memberikan elektron kepada N_2, sehingga menghasilkan NH=NH. Pada dua daur berikutnya proses ini (masing-masing membutuhkan elektron yang disumbangkan oleh ferredoksin) NH=NH direduksi menjadi $H_2N\text{-}NH_2$, dan selanjutnya direduksi menjadi NH_3. Tergantung pada jenis mikrobanya, ferredoksin reduksi yang memasok elektron untuk proses ini diperoleh melalui fotosintesis, respirasi atau fermentasi.

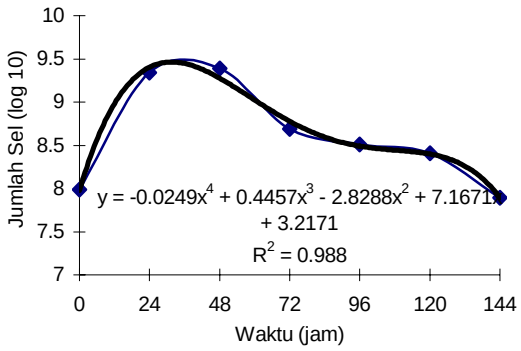
Teknologi produksi inokulan

Sistem teknik produksi yang unggul dan ekonomis dapat diperoleh dengan menggunakan strain mikroba yang efektif dengan formula bahan pembawa yang sesuai melalui proses produksi yang sederhana. Teknik produksi yang selama ini dilakukan lebih banyak bersifat skala kecil yang dibesarkan, bukan skala besar yang sebenarnya. Pengalaman di India menunjukkan bahwa di awal 1980-an, inokulan rhizobia dihasilkan dari dalam labu kocok, sehingga jumlah dan mutu hasilnya sangat buruk. Di tahun 1990-an, produksi rhizobia dilakukan dalam skala besar yang berorientasi pada pemilihan strain yang sesuai. Di Kanada (Stephens, 1996; komunikasi pribadi) pada tahun 1994 dengan fermentor ukuran 400 l. Namun, karena mutu produknya masih tetap bervariasi dan sulit menurunkan tingkat kontaminasi maka produksinya diubah dengan menggunakan fermentor yang lebih kecil (20 l). Hal penting lainnya yang perlu diperhatikan adalah mutu bahan pembawa, teknik inokulasi, dan mutu air.

Produksi pupuk mikroba multiguna (PMMG) skala besar dilakukan melalui teknologi bioproses untuk mendapatkan teknik produksi inokulan yang efisien dengan produktivitas yang tinggi (Saraswati, 2005). Pada

penggandaan skala *(*scaling up*)* teknologi produksi PMMG dikembangkan metode yang lebih praktis untuk menjamin kesinambungan proses, dengan kultivasi sistem *batch* melalui pembiakan tahap ganda.

Produksi inokulan dimulai dengan penyiapan biakan pemula pada agar-agar miring hingga inokulasi ke dalam media perbanyakan sari khamir manitol (SKM) cair (Somasegaran and Hoben 1994). Hasil perbanyakan ini digunakan sebagai biakan pemula untuk volume yang lebih besar di dalam fermentor, umumnya volume yang digunakan ialah 5-10% dari volume media cair dalam fermentor. Jenis fermentor yang digunakan biasanya fermentor *airlift* dengan sistem tumpah (batch). Fermentor *airlift* tidak menggunakan pengaduk mekanis, tetapi menggunakan penyembur udara sebagai alat pencampur. Fermentor ini lebih ekonomis dibandingkan dengan fermentor berpengaduk karena konstruksinya sederhana. Selama proses produksi, kondisi aseptik sangat diperlukan. Kontaminan biasanya mempunyai laju pertumbuhan yang cepat, berbau busuk, dan menimbulkan busa yang banyak. Media tumbuh harus mampu menyediakan sumber energi berupa C dan garam mineral, disamping aerasi menggunakan *rotary shaker*. Pertumbuhan optimum rhizobia terjadi pada selang suhu 25-30 ^{0}C dan pH 6,8-7. Penerapan bioproses dalam perbanyakan massal inokulan rhizobia telah dipelajari dalam skala laboratorium dan pabrik pilot oleh Saraswati *et al.* (1994). Gambar 4 menunjukkan kurva pertumbuhan rhizobia pada sistem tumpah. Jumlah sel tertinggi dicapai setelah 24-48 jam.



Gambar 4. Pertumbuhan rhizobia pada perbanyakan sistem tumpah (batch)

Bahan pembawa yang umum dipakai untuk rhizobia adalah gambut. Di negara-negara dimana gambut tidak tersedia, dapat digunakan bahan pembawa lain misalnya arang, sabut kelapa, vermikulit, dan tanah mineral. Gambut dikemas dalam kantong polietilen, lalu disterilisasi dengan sinar

gamma (5 Mrad) atau autoklaf. Berbagai uji untuk pengawasan mutu dilakukan terhadap kultur starter dan kultur massa rhizobia. Uji ini meliputi antara lain penetapan pH, pewarnaan gram, uji glukosa pepton, dan jumlah populasi.

Gambar 5. Gambaran pabrik inokulan rhizobia komersial (Pabrik Rhizo-plus)
Foto: Rasti Saraswati

Produksi komersial inokulan rhizobia dibuat dalam fermentor yang berukuran mulai dari beberapa liter sampai beberapa ribu liter. Produksi mulai dengan kultur agar miring murni yang digunakan untuk menginokulasi larutan (broth) SKM dalam suatu bejana. Kultur *broth* ini selanjutnya dipakai sebagai kultur starter untuk memproduksi rhizobia dalam jumlah besar di dalam sebuah fermentor logam. Kultur starter 1 l diperlukan untuk menginokulasi 100 l media di dalam fermentor (Somasegaran and Hoben, 1994).

Pemanfaatan bakteri penambat N_2 untuk efisiensi pemupukan N

Salah satu pendekatan untuk melakukan penghematan dalam pemakaian pupuk anorganik, yakni meningkatkan efisiensi penggunaan N-tersedia dalam tanah melalui penambatan N_2, baik secara langsung atau interaksi dengan bakteri penambat N_2. Pemanfaatan bakteri penambat N_2, baik yang diaplikasikan melalui tanah ataupun benih (seed coating) mampu meningkatkan efisiensi pemupukan N. Dalam upaya mencapai tujuan akhir strategi jangka panjang, penggunaan bakteri penambat N_2 adalah untuk meningkatkan produksi dan pendapatan usaha tani.

Bakteri penambat N_2 hidup bebas

Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi tanah atau benih dengan *Azotobacter* efektif dapat meningkatkan hasil tanaman. Di daerah-daerah empat musim (temperate regions) jumlah nitrogen yang ditambat oleh *Azotobacter* berkisar antara 10-15 kg ha^{-1} $tahun^{-1}$ (Subba-Rao, 1999). Secara umum, jumlah N yang dihasilkan oleh kelompok bakteri ini adalah 10 kg N ha^{-1} (Tenuta, 2006). Penambatan N_2 lebih besar, yakni sekitar 46 kg N ha^{-1} (30% dari kebutuhan total N) dilaporkan oleh Malik *et al.* (1997) pada tanaman padi yang diinokulasi dengan inokulan campuran dari beberapa jenis bakteri penambat N_2 hidup bebas dan pemacu tumbuh tanaman, *Azospirillum lipoferum* N-4, *Azospirillum brasilense* Wb-3, *Azoarcus* K-1, *Pseudomonas* 96-51, dan *Zoogloea* Ky-1 (Tabel 5). Kelima jenis bakteri tersebut, selain mampu menambat N_2 dari udara (kecuali *Pseudomonas*), juga mampu memproduksi AIA, sehingga memiliki peran ganda: penyedia N dan pemacu perkembangan tanaman.

Tabel 5. Pengaruh inokulasi bakteri penambat N_2 hidup bebas* terhadap biomassa padi dan penambatan N_2 pada percobaan plot mini

Perlakuan	Jerami + padi	N-total	N_2 ditambat dari udara	
	kg ha^{-1}		%	kg ha^{-1}
30 kg ^{15}N/ha tanpa inokulasi	15.541	151	2,3	3,5
30 kg ^{15}N/ha diinokulasi	16.202	157	28,9	45,5
LSD $_{0,05}$	775	12	20,0	4,0

- Campuran inokulum *Azospirillum lipoferum* N-4, *Azospirillum brasilense* Wb-3, *Azoarcus* K-1, *Pseudomonas* 96-51, dan *Zoogloea* Ky-1

Sumber: Malik *et al.* (1997)

Penambatan N_2 pada lahan sawah seperti dipublikasikan sebelum tahun 1980, rata-rata 27 kg ha^{-1}. Menurut Ito (1977), berdasarkan studi neraca N selama >70 tahun diperoleh rata-rata pengkayaan N pada permukaan tanah 38,5 kg N ha^{-1} $tahun^{-1}$ pada plot tanpa pemupukan, dan 39,6 kg N ha^{-1} $tahun^{-1}$ pada plot yang dikapur. Roger dan Ladha (1992) mengemukakan bahwa kandungan N pada lahan sawah irigasi, 80-110 kg N ha^{-1} diperoleh dari penambatan N_2, air irigasi dan presipitasi, sedangkan 10-20 kg N ha^{-1} tertinggal di akar pada biji dan jerami.

Keberhasilan sianobakteri tergantung pada kemampuan *strain* yang diintroduksi untuk bertahan hidup, dan berkembang biak pada tanah secara cepat, sehingga sangat diperlukan strain yang cepat tumbuh sebagai bahan inokulum. Di India, Birma, Mesir, dan Cina, inokulum sianobakteri diperbanyak dalam kolam terbuka dan dangkal dengan menginokulasikan biakan pemula (starter) yang merupakan strain majemuk berupa mikroplot berukuran 5-15 cm

yang mengandung 4 kg tanah, 100 g superfosfat, dan insektidida. Bila diperlukan ditambah kapur untuk mencapai pH tanah 7,0-7,5. Dalam 1-3 minggu, pertumbuhan sianobakteri akan menutupi permukaan kolam, lalu dibiarkan kering, dan kemudian serpihannya digunakan pada pertanaman padi sawah dengan takaran 10 kg ha^{-1} (Venkataraman, 1979). Dalam kondisi yang baik, sianobakteri dapat menambat N_2 sekitar 20-40 kg N ha^{-1} musim $tanam^{-1}$ (Roger and Watanabe, 1986). Berdasarkan data yang diperoleh dari neraca N menunjukkan bahwa sianobakteri asli menyumbangkan rata-rata 30 kg N ha^{-1} musim $tanam^{-1}$ dan bila diinokulasi pada rizosfir akan menghasilkan rata-rata 337 kg N ha^{-1} (Roger and Ladha, 1992).

Pemanfaatan penambat N_2 simbiosis

Kandungan N tanah pertanian di Indonesia umumnya rendah dan pada lahan masam juga terjadi penghambatan simbiosis antara rhizobia dengan tanaman kacang-kacangan. Fenomena ini terutama berkaitan dengan pH yang rendah, keracunan Al, dan Mn, serta rendahnya kandungan Ca dan P di dalam tanah (Alva *et al*., 1987). Namun, pada lahan agak masam yang baru pertama kali ditanami kedelai, inokulasi rhizobia seringkali memberikan respon hasil yang positif (Pasaribu dan McIntosh, 1985). Sunarlim *et al*. (1986) mengemukakan bahwa penanaman kedelai pada lahan bukaan baru, baik berupa lahan kering maupun lahan sawah memerlukan inokulasi rhizobia, demikian juga di daerah-daerah yang tingkat pembintilan dan fiksasi N-nya kurang efektif. Pada tanah Podsolik Merah Kuning (PMK) yang dikapur 2 t ha^{-1} dan dipupuk 69 kg P_2O_5 dan 50 kg K_2O ha^{-1} di Lampung, N yang difiksasi sebesar 63,2 kg ha^{-1} atau 45,4% dari keseluruhan N yang dibutuhkan tanaman. Apabila brangkasan kedelai dikembalikan ke dalam tanah dan kemudian ditanami jagung, maka hasil panen jagung akan sama dengan pemberian pupuk N sebesar 45 kg ha^{-1} (Sunarlim *et al*., 1992).

Banyak pertanaman kedelai di Indonesia ditanam pada lahan masam. Kondisi masam merupakan salah satu faktor stres yang dapat menekan pertumbuhan dan simbiosis kebanyakan rhizobia. Akan tetapi sejumlah strain rhizobia menunjukkan ketahanan terhadap stres masam. Penggunaan strain rhizobia tahan masam telah dicoba di tanah Podsolik Merah Kuning oleh Saraswati *et al.* (1989), Brotonegoro *et al.* (1993) dan Simanungkalit *et al*. (1996). Rhizobia tahan masam dapat bertahan hidup di tanah masam Lampung dengan takaran pengapuran rendah 0,5 x Al-dd (pH 5,1; Al-dd 2,6 me 100 g^{-1}; Mn 216,2 ppm) dan keefektifan simbiotik masih di atas 100% (Saraswati *et al.,* 1989). Penggunaan galur yang tidak tahan masam (N 20C) dan tahan masam (TKG 4B) dengan pengapuran 1,5 x Al-dd menghasilkan pertumbuhan, serapan N dan hasil biji kering tertinggi dibandingkan dengan perlakuan pengapuran lainnya (Brotonegoro *et al.,* 1993). Hal ini menunjukkan

bahwa penggunaan galur rhizobia tahan masam tidak mutlak diperlukan apabila kedelai ditumbuhkan di lahan masam yang dikapur. Inokulasi galur *Bradyrhizobium* tahan masam pada lahan masam (pH 4,6) di Taman Bogo (Lampung) yang sebelumnya ditanami padi sawah terus-menerus meningkatkan hasil kedelai sampai 63% pada tanaman yang diinokulasi (Simanungkalit *et al*., 1996). Inokulasi dengan strain *Bradyrhizobium* tahan masam pada pemberian 50 kg N ha^{-1} tidak memberikan pengaruh lagi terhadap hasil kedelai, karena proses penambatan N_2 menurun, yang diindikasikan dengan penurunan BK bintil (Tabel 6).

Tabel 6. Pengaruh taraf N dan *strain B. japonicum* terhadap BK bintil dan BK tajuk

Perlakuan	BK bintil [8]	BK tajuk [*]
Strain *B. japonicum*	mg $tanaman^{-1}$	
CB 1809	160 ab	2.990 a
USDA 110	150 b	2.824 ab
FCB 26	170 a	2.715 b
Nitrogen (kg ha^{-1})		
0	170 a	2.621 c
25	164 a	2.761 bc
50	159 a	2.876 b
100	141 b	3.114 a
Varietas		
Wilis	170 a	2.772 a
Sekayu	146 b	2.913 a

* Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama pada setiap kolom dan setiap perlakuan tidak berbeda nyata menurut DMRT pada taraf 5%

Sumber: Simanungkalit *et al*. (1995a)

Pada lahan sawah di Yogyakarta dengan pola tanam padi-padi-kedelai, kombinasi pemberian pupuk N dan inokulasi rhizobia memberikan hasil tertinggi dibandingkan dengan perlakuan kontrol (Sunarlim *et al.,* 1986). Di Indramayu inokulasi rhizobia pada kedelai hanya meningkatkan banyaknya polong isi dan bobot biji. Takaran inokulan yang tinggi (15 g kg^{-1} benih) dapat meningkatkan banyaknya polong isi sebesar 9,4%, bobot biji tiap tanaman 9,0%, sedangkan bobot bintil akar tidak dipengaruhi oleh pupuk N. Pada percobaan rumah kaca, diperoleh hasil bahwa setiap penambahan pupuk N 10 kg ha^{-1} mengurangi bobot bintil akar 4,86 mg $tanaman^{-1}$. Jadi bobot bintil akar menurun secara nyata dengan penambahan pupuk N (Sunarlim dan Achlan, 1994). Penghambatan inokulasi oleh pupuk N terutama disebabkan oleh adanya NO_3 yang berpengaruh secara lokal pada perakaran bukan disebabkan penyerapan N ke dalam tajuk yang sudah cukup. Oleh karena meskipun N tanah yang

didapat dari pupuk cukup, jika inokulan Rhizobium tidak efektif, kekurangan N pada tanaman merupakan suatu hal yang mungkin terjadi.

Pada percobaan inokulasi kedelai dengan tiga strain toleran masam *Bradyrhizobium japonicum* pada tanah masam dari Taman Bogo di kamar kaca menunjukkan bahwa pemupukan N yang meningkat cenderung menurunkan bobot kering (BK) bintil (Tabel 6); pada takaran 100 kg N ha^{-1} bobot kering nodul berkurang 29 mg $tanaman^{-1}$ (17%), sedangkan bobot kering tajuk meningkat dengan bertambahnya takaran N. Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan N yang meningkat mengurangi peranan penambatan N_2 secara hayati.

Pada percobaan lapang di Taman Bogo untuk melihat pengaruh tiga taraf pupuk N dan dua strain dari *Bradyrhizobium* tahan masam terhadap hasil dan pertumbuhan kedelai. Terdapat pengaruh interaksi strain X takaran N terhadap bobot kering (BK) brangkasan dan BK biji. Pada setiap perlakuan inokulasi, BK jerami dan BK biji memberikan respon nyata terhadap takaran N, kecuali pada takaran 50 kg N ha^{-1} yang diinokulasi dengan FCB 152 dibandingkan dengan takaran yang sama tanpa inokulasi terjadi penurunan BK brangkasan (Tabel 7).

Strain-strain inokulan yang diberikan ke tanah/tanaman akan bersaing dengan strain-strain asli di dalam tanah untuk dapat menginfeksi akar. Proporsi bintil yang dibentuk(diokupasi) oleh strain inokulan merupakan indeks kemampuan bersaing terhadap bakteri bintil akar alami (asli). Berdasarkan hasil penelitian Simanungkalit *et al*. (1996), kemampuan bersaing ini sangat dipengaruhi oleh lokasi (site-dependent). Mereka mendapatkan adanya perbedaan okupasi bintil oleh tiga strain *i*nokulan yang berbeda (CB 1809 dan USDA 110, yang digunakan dalam inokulan komersial di Australia, dan FCB 26, yang merupakan strain hasil isolasi dari Rawa Jitu Lampung) pada tiga lokasi tanah masam yang berbeda, masing-masing Muara Bogor (pH 5,8) Taman Bogo di Lampung (pH 4,6). Strain USDA 110 merupakan strain yang paling kurang kompetitif pada ketiga lokasi, sedangkan CB 1809 paling kompetitif di Taman Bogo, dan sama baiknya dengan di Pasar Miring. Strain FCB 26 sama kompetitifnya di Muara dan di Pasar Miring (Tabel 8). Persentase rata-rata okupasi bintil oleh strain-strain FCB 26 sebanyak 76%, strain CB 1809 sebanyak 74%, dan USDA 110 sebanyak 41%. Hasil penelitian ini juga menunjukkan tidak ada kenaikan hasil di Muara meskipun 53% dan 75% dari bintil dibentuk masing-masing oleh CB 1809 dan FCB 26. Di Taman Bogo dengan kedua strain ini masing-masing menaikkan hasil 70% dan 75%, dan pembentukan bintil masing-masing 85% dan 68% oleh kedua strain tersebut. Di Pasar Miring CB 1809 membentuk 85% dari bintil tetapi hanya menaikkan hasil 10% (Simanungkalit *et al*., 1996). Hasil percobaan ini membantu menjelaskan respon terhadap inokulasi yang berbeda. Dilihat dari aspek

mikrobiologi inokulasi di ketiga lokasi itu berhasil, karena ketiga strain berhasil membentuk bintil, sedangkan dari aspek agronomi inokulasi hanya berhasil di dua lokasi, karena hanya di kedua lokasi ini inokulasi dapat menaikkan hasil.

Tabel 7. Pengaruh taraf N terhadap BK brangkasan dan BK biji pada tanah masam di Taman Bogo

Perlakuan inokulasi	Takaran N	BK brangkasan*	BK biji*
		kg ha^{-1}	
Kontrol	0	1.920 f	1.287 f
	25	2.542 cd	1.664 cd
	50	2.917a	2.134a
FCB 152	0	2.198 e	1.542 e
	25	2.448 d	1.752 bc
	50	2.698 b	2.191a
FCB 26	0	1.990 f	1.513 e
	25	2.209 e	1.788 b
	50	2.917a	2.110a

* Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama pada setiap kolom dan setiap perlakuan tidak berbeda nyata menurut DMRT pada taraf 5 %

Sumber: Simanungkalit *et al*. (1996)

Tabel 8. Okupasi bintil kedelai di tiga lokasi karena inokulasi dengan tiga strain

Strain	% okupasi bintil kedelai[1)]		
	Taman Bogo	Muara	Pasar Miring
CB 1809 $^{spe\ R}$	85^{a}	53 ^{b}	85^{a}
USDA 110 $^{str\ R}$	57 ^{b}	31 ^{c}	34 ^{b}
FCB 26 $^{spe\ R}$	68 ^{b}	75^{a}	86^{a}

1) Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama tidak berbeda pada taraf 5%
Sumber: Simanungkalit *et al*. (1996)

Informasi tentang besarnya penambatan N_2 pada kacang-kacangan melalui simbiosis di Indonesia sangat sedikit. Sisworo *et al.* (1990) pada penelitian dua pola tanam (padi-kedelai-kacang panjang dan padi-jagung-kacang panjang) selama 2 tahun di Kotabumi Lampung dengan sisa tanaman dan pupuk yang dilabel dengan ^{15}N mendapatkan 12-33% dari total N tanaman pada kacang panjang dan 33% pada kedelai berasal dari penambatan N_2 secara hayati Penambatan N_2 pada kedelai yang ditetapkan dengan metode ureida pada percobaan lapang di Taman Bogo, Simanungkalit *et al*. (1996) mendapatkan indeks ureida relatif dan % N tajuk dipengaruhi secara nyata oleh takaran N (Tabel 9). Indeks ureida relatif ini menyatakan persentase N pada tanaman yang merupakan hasil

penambatan N_2. Pemberian 50 kg N ha^{-1} mereduksi N hasil penambatan 10% dibandingkan dengan pemberian 25 kg N $ha^{-1.}$ Dari hasil penelitian di atas terlihat bahwa pemberian starter 25 kg N ha^{-1} merupakan batas dimana penambatan N_2 tertinggi dicapai seperti ditunjukkan oleh indeks ureida relatif dan BK bintil, sedangkan pada pemberian yang lebih tinggi (50 kg N ha^{-1}) sudah terjadi penurunan penambatan $N_{2.}$

Tabel 9. Pengaruh taraf N terhadap % N tajuk dan indeks ureida relatif pada tanah masam di Taman Bogo

Taraf N	% N pada tajuk	Indeks ureida relatif
kg N ha^{-1}		%
0	3.38 b	49,9a
25	3,60 b	50,2a
50	4,00a	40,4b

* Nilai rata-rata yang diikuti huruf yang sama pada setiap kolom dan setiap perlakuan tidak berbeda nyata menurut DMRT pada taraf 5%

Sumber: Simanungkalit *et al*. (1996)

Pada percobaan lain (Simanungkalit *et al*., 1998), 23 strain *B. japonicum* hasil skrining toleran masam diuji pada tanah masam di empat lokasi: Toto Projo (pH 4,32) dan Taman Bogo (pH 4,50) di Lampung, Bumi Asih (pH 4,64) di Kalimantan Selatan, dan Bontobili (pH 5,56) di Sulawesi Selatan. Ke-23 strain berbeda penampilan dan keefektifannya menambat N_2 di keempat lokasi. Di Toto Projo hanya tiga dari 12 strain (FCB 190/1, FCB 193/3, dan FCB 63/2) yang dapat meningkatkan hasil kedelai 31-41%, sedangkan di Taman Bogo ke-23 strain tidak dapat meningkatkan hasil kedelai karena tanah di lokasi ini mengandung rhizobia alami yang sama efisiennya dengan strain yang terkandung dalam inokulan. Sepuluh dari ke-23 strain (FCB 178/1, FCB 249/3, FCB 229/3, FCB 230/3, FCB 44/2, FCB 187/3, FCB 31/1, FCB 246/3, FCB 251/3, dan 151/2) dapat meningkatkan hasil 38-74% di Bontobili. Meskipun nodulasi lebih baik ke-23 strain yang diuji di Bumi Asih tidak meningkatkan hasil, karena pertumbuhan kedelai terhambat oleh kondisi tanah yang buruk. Dari hasil percobaan di atas dapat disimpulkan bahwa toleransi potensial terhadap kondisi masam pada medium buatan di laboratorium tidak menjamin bahwa strain-strain tersebut akan menunjukkan toleransinya pada kondisi lapangan, karena kondisi agro-ekologis dimana kedelai tumbuh sangat beragam.

Tabel 10. Rata-rata kenaikan produksi kedelai (kg ha^{-1}) dari hasil pengujian PMMG di lahan petani di delapan lokasi pertanaman kedelai di Jawa dan Lampung pada musim kering 1995/1996-1997/1998

Lokasi	Produksi		Selisih kenaikan produksi
	Tanpa PMMG 25N-100P-100K	Dengan PMMG ON-50P-100K	
	kg ha^{-1}		
Lahan sawah, Muktihardjo, Pati (1995/1996)	1.096	1.412	316
Lahan masam, Seputih Banyak, Lampung (1995/1996)	837	1.060	223
Desa Danaraja, Kab. Banyumas (1996/1997)	1.550	1.791	241
Desa Carikan, Kab. Magetan (1996/1997)	2.930	3.100	170
Desa Ciranjang, Kab. Cianjur (1996/1997)	1.630	1.670	40
Pasuruan, Lokai I (1997/1998)	1.700	1.820	120
Pasuruan, Lokasi II (1997/1998)	1.890	1.990	100
Desa Bojen Kec. Penimbing, Kab. Pandeglang (1997/1998)	1.270	2.000	730
Selang	837-2.930	1.060-3.100	40-730
Rata-rata produksi			242,5

Dalam upaya pengembangan pupuk hayati guna peningkatan produksi dan efisiensi pemupukan menunjang keberlanjutan sistem produksi pangan (khususnya kedelai), tim peneliti pupuk hayati Badan Litbang Pertanian telah menciptakan suatu sistem teknologi produksi yang unggul dan ekonomis dengan strategi pengembangan pupuk mikroba multiguna (PMMG) yang bersifat komplementer, bermutu unggul, dan konsisten. PMMG tersebut mempergunakan formula mikroba efektif dan formula bahan pembawa yang sesuai melalui proses produksi secara teknis aseptis mutakhir, didukung dengan sistem pengawasan mutu dan distribusi yang mampu menjamin keunggulan produk sampai ke tingkat pengguna. Interaksinya positif yakni berpengaruh sangat baik pada pertumbuhan tanaman dan hasil biji kering per hektar.

Dari hasil demonstrasi plot pemberian PMMG pada tanaman kedelai di delapan lokasi pertanaman kedelai di Jawa dan Lampung pada musim kering 1995/1996-1997/1998 menunjukkan hasil yang positif (Tabel 10). Pemberian PMMG dapat menekan kebutuhan pupuk urea sampai 100% dan SP-36 sampai 50% dari takaran anjuran baku. Dari hasil demonstrasi plot di sembilan lokasi pertanaman kedelai lahan petani penggunaan PMMG dapat meningkatkan hasil kedelai dengan selang kenaikan 0,4-7,3 ku ha^{-1} (2,42 ku

ha^{-1}) atau 5-45%, sedangkan dari hasil uji multilokasi yang dilaksanakan oleh proyek pengembangan kedelai P2RTPTPH dan pola sekolah lapang, pola pertumbuhan, dan pola unggulan di sembilan provinsi tersebar di 30 Kabupaten pada tahun 1997/1998 menunjukkan peningkatan hasil 4,79-5,40 ku ha^{-1} (42,09- 56,69%). Keuntungan usaha tani kedelai dengan pemanfaatan PMMG adalah peningkatan nilai pendapatan petani, yang meliputi penghematan biaya usaha tani dan peningkatan produksi kedelai.

DAFTAR PUSTAKA

Albrecht, S.L. 1998. Eukaryotic Algae and Cyanobacteria. p. 94-131. *In* D.M. Sylvia, J.J. Fuhrmann, P.G. Hartel, and D.A. Zuberer (Eds.). Principles and Applications of Soil Microbiology. Prentice-Hall, Inc.

Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Mycrobiology. 2nd Ed. John Wiley and Sons. New York. 467 p.

Allen, O.N. and E.A. Allen. 1981. The Leguminosae. A Source Book of Characteristic, Uses and Nodulation. The University of Wisconsin Press, Wisconsin.

Alva, A.K., D.G. Edwards, C.J. Asher, and S. Suthipradit. 1987. Effect of acid soil infertility factors on growth and nodulation of soybean. Agron. J. 79: 302-306.

Amarger N., V. Macheret, and G. Laguerre. 1997. *Rhizobium gallicum* sp.nov., *Rhizobium giardinii* sp.nov., from *Phaseolus vulgaris* nodules. Int. J.Sys. Bacteriol. 47: 996-1006.

Asanuma, S. and R. Saraswati. 1988. Expectation and potential for improved production: Use of *Rhizobium* in soybean production in Indonesia. Food Legumes - Coarse Grains Newsletter 5: 6-7, 21, 23.

Baldani, J.I., L. Caruso Vera, L.D. Baldani, Silvia R. Goi, and J. Dobereiner. 1997. Recent advances in BNF with non-legume plants. Soil Biol. Biochem. 29(5/6): 911-922.

Barbour, W.M., S.H. Wang, and G. Stacey. 1992. Molecular genetics of *Bradyrhizobium* symbiosis. *In* Biological Nitrogen Fixation. G. Stacey, R.H. Borris, and H.J. Evans (Eds.). Chapman and Hall Inc., USA.

Boddey, R.M., de O.C. Oliviera, S. Urquiaga, V.M. Reis, F.L. Olivares, V.L.D. Baldani, and J. Dobereiner. 1995. Biological nitrogen fixation associated with sugar cane and rice: contributions and prospects for improvement. Plant Soil 174: 195-209.

Brotonegoro, S., B. Santosa, and R.D. Hastuti. 1993. Growth responses and yields of soybean plants moculated with different strains of

Bradyrhizobium japonicum in acid podsolic soil amended with or without lime. *In* Workshop on Biological Nitrogen Fixation by Soybean in Acid Soils. Information LIPI, Bogor.

Burkhardt, B., D. Schillik, and A. Puhler. 1987. Physical characterization of *Rhizobium meliloti* megaplasmids. Plasmid 17: 13-25.

Chen, W.X., G.H. Yan, and J.L. Li. 1988. Numerical taxonomic study of fast-growing soybean rhizobia and a proposal that *Rhizobium fredii* be assigned to *Sinorhizobium* gen. nov. Int. J. Sys. Bacteriol. 38: 392-397.

De Lajudie, P., E. Laurent-Fulele, A. Willems, U. Torck R. Coopman, M.D. Collins, K. Kersters, B. Dreyfus, and M. Gilles. 1998. *Allorhizobium undicola* sp.nov, sp.nov. nitrogen-fixing bacteria that efficiently nodulate *Neptunia natans* in Senegal. Int. J. Sys. Bacteriol. 48: 1.277-1.290.

Dreyfus, B., J.L. Garcia, and M. Gillis. 1988. Characterization of *Azorhizobium caulinodans* gen.nov., sp.nov., a stem-nodulating nitrogen-fixing bacterium isolated from *Sesbania rostrata*. Int. J. Sys. Bacteriol. 38: 89-98.

Frank, B. 1889. Über die Pilzsymbiose der Leguminosen. Berichte der Deutschen Botanischen Gesellschaft 7: 332-346.

Fred, E.B., I.L. Baldwin, and E. McCoy. 1932. Root Nodule Bacteria and Leguminous Plants. University of Wisconsin, Madison.

Fuhrmann, J. 1990. Symbiotic effectiveness of indigenous soybean bradyrhizobia as related to serological, morphological, rhizobitoxine, and hydrogenase phenotypes. Appl. Environ. Microbiol. 56: 224-229.

Ito, J. 1977. Behaviour and fixation of nitrogen in paddy field. Niigata Agronomy 13: 51-61 (In Japanese).

James, E., and F.L. Olivares. 1997. Infection and colonization of sugarcane and other graminaceous plants by endophytic diazotrophs. Plant Science 17: 77-119.

James, E.K., P. Gyaneshwara, W.L. Barraquio, N. Mathan, and J.K Ladha. 2000. Endophytic diazotroph associated with rice. *In* J.K. Ladha and P.M. Reddy (Eds.). The Quest for Nitrogen Fixation in Rice. IRRI.

Jarvis, B.D.W., H.L. Downer, and J.P.W. Young. 1992. Phylogeny of fast growing soybean-nodulating rhizobia supports synonymy of *Sinorhizobium* and *Rhizobium* and assignment to *Rhizobium fredii*. Int. J. Sys. Bacteriol. 42: 93-96.

Jordan, D.C. 1982. Transfer of *Rhizobium japonicum* Buchanan 1980 to *Bradyrhizobium* gen. nov., a genus of slow-growing, root nodule bacteria from leguminous plants. Int. J. Sys. Bacteriol. 32: 136-139.

Jutono. 1973. Blue-green algae in rice soils of Jogjakarta, Central Java. Soil Biol. Biochem. 5(1): 91-95.

Keyser, H.H., B.B. Bohlool, T.S. Hu, and D.F. Weber. 1982. Fast-growing rhizobia isolated from root nodules of soybeans. Science 215: 1.631-1.632.

Kundig, C., H. Hennecke, and M. Gottfert. 1993. Correlated physical and genetic map of *Bradyrhizobium japonicum* 110 genome. J. Bacteriol. 175: 613-622.

Kuykendall, L.D., B. Saxena, T.E. Devine, and S.E. Udell. 1992. Genetic diversity in *Bradyrhizobium japonicum* Jordan 1982 and a proposal for *Bradyrhizobium elkanii* sp. nov. Canadian J. Microbiol. 38: 501-505.

Kyuma, K. 2004. Paddy Soil Science. Kyoto University Press and Trans Pacific Press.

Ladha, J.K. and P.M. Reddy. 1995. Extension of nitrogen fixation to rice: necessity and possibilities. Geo Journal 35: 363-372.

Ladha, J.K, F.J. de Bruijn, and K.A. Malik. 1997. Introducing assessing opportunities for nitrogen fixation in rice: a frontier project. Plant and Soil 194: 1-10.

Malik, K.A., R. Bilal, S. Mehnaz, G. Rasul, M.S. Mirza, and S. Ali. 1997. Association of nitrogen-fixing, plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) with kallar grass and rice. Plant and Soil 194: 37-44.

Martinez-Romero, E., L. Segovia, F.M. Mercante, A.A. Franco, P. Graham, and M.A. Pardo. 1991. *Rhizobium tropici*, a novel species nodulating *Phaseolus vulgaris* L, beans and *Leucaena* sp. trees. Int. J. Sys. Bacteriol. 41: 417-426.

Masterson, R.V., P.R. Russel, and A.G. Atherly. 1982. Nitrogen fixation (*nif*) genes and large plasmid of *Rhizobium japonicum*. J. Bacteriol. 152: 928-931.

Ogasawara, M., T.Suzuki, L.Muthoh, K.Annapurna, N.K.Arora, Y.Nishimura, and D.K.Maheshwari. 2003. *Sinorhizobium indiaense* sp.nov., and *Sinorhizobium abri* sp.nov. isolated from tropical legumes *Sesbania rostrata* and *Abrus precatorius*, respectively. Symbiosis 34: 53-68.

Olivares, F.L., V.L.D. Baldani, V.M. Reis, J.I. Baldani, and J. Dobereiner. 1996. Occurrence of the endophytic diazotrophs *Herbaspirillum* spp. In roots, stems and leaves predominantly of gramineae. Biology Fertility Soils 21: 197-200.

Pasaribu, D. and D.L. McIntosh. 1985. Increasing tropical soybean production with improved cropping systems as management. *In* S. Shanmugasundaram and E.W. Sulzberger (*Eds*.). Soybean in Tropical

and Subtropical Cropping Systems. Proceedings of a Symposium Tsukuba. Japan, 26 September-1 Oktober 1983. AVRDC Taiwan.

Roger, P.A. and S.A. Kulasooriya. 1980. Blue-green Algae and Rice. International Rice Research Institute, Los Banos.

Roger, P.A. and I. Watanabe. 1986. Technologies for utilizing biological nitrogen fixation in wetland rice: potentialitis, current usage, and limiting factors. Fertilizer Research 9: 39-77.

Roger P.A. and J.K. Ladha. 1992. Biological N_2 fixation in wetland rice fields: estimation and contribution to nitrogen balance. Plant Soil 141: 41-55.

Saraswati, R , Z. Nunung, and H. Inoue. 1989. Evaluation of Rhizobium acid-Al tolerant to Red Yellow Podzolic soil. hlm. 285-291. *Dalam* Buletin Seminar Hasil Penelitian Tanaman Pangan Balittan Bogor, 13-14 Pebruari 1989.

Saraswati, R , M. Kobayashi, T. Matoh, and J. Sekiya. 1994. Characterization of *Rhizobium* and *Azorhizobium* a root- and stem-nodulating nitrogen-fixing bacterium isolated from *Sesbania* species. Contribution. Central Research Institute for Food Crops, Agency for Agricultural Research and Development, Bogor, Indonesia. 82: 1-11.

Saraswati, R. 2005. Rhizobial production sistem. pp. 40-44. *In* The Future Use of Legume Nodulating Bacteria (LNB) In Indonesia. Technical and Economic Perspective. Univ. Lampung. Bandar Lampung.

Scholla, M.H. and Elkan G.H. 1984. *Rhizobium fredii* sp nov. a fast-growing spesies that effectively nodulates soybeans. Int. J. Sys. Bacteriol. 34: 484-486.

Segovia, L., J.P.W. Young, and E. Martinez-Romero. 1993. Reclasification of American *Rhizobium leguminosarum* biovar phaseoli type I strains in a new species, *Rhizobium etli* sp.nov. Int. J. Sys. Bacteriol. 43: 374-377.

Simanungkalit, R.D.M., A. Indrasumunar, R.D. Hastuti E. Pratiwi, and R.J. Roughley. 1995a. Soybean response on nodulation to starter nitrogen and inoculation with *Bradyrhizobium japonicum*. Indonesian. J. Crop Science 10: 25-32.

Simanungkalit, R.D.M , A. Indrasumunar, E. Pratiwi, R.D. Hastuti, and R.J.Roughley. 1995b. Population dynamics of soybean root-nodule bacteria in latosol soil used for upland and lowland rice/soybean cropping systems in West Java, Indonesia. Soil Biol. Biochem. 27: 625-628.

Simanungkalit, R.D.M , A. Indrasumunar, E. Pratiwi, R.D. Hastuti, and R.J. Roughley.1996. Inoculation of soybean with selected strains of

Bradyrhizobium japonicum can increase yield on acid soils in Indonesia. Soil Biol. Biochem. 28: 257-259.

Simanungkalit, R.D.M , T. Hutagalung, R.D. Hastuti, E. Pratiwi, and R.J. Roughley. 1998. Effectiveness of *Bradyrhizobium japonicum* strains selected for acid-tolerance to increase yields of soybean grown in acid soils in Indonesia. Indonesian J. Crop Sci. 13: 32-40.

Sisworo, W.H., M.M. Mitrosuhardjo, H. Rasyid, and R.J.K. Myers. 1990. The relative roles of N fixation, fertilizer, crop residues and soil in supplying N in multiple cropping system in humid tropical upland system. Plant Soil 121: 73-82.

Somasegaran, P. and H.J. Hoben. 1994. Handbook for Rhizobia. Springer-Verlag, New York.

Subba-Rao, N.S. 1999. Soil Microbiology (Fourth Edition of Soil Microorganisms and Plant Growth). Science Publishers, Inc. USA.

Sunarlim, N., D. Pasaribu, dan W. Gunawan. 1986. Pengaruh pengolahan tanah, mulsa, inokulasi, dan pemupukan nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil kedelai. Penelitian Agronomi Kacang-kacangan 7: 18-28. Balai Penelitian Tanaman Pangan, Bogor.

Sunarlim, N , D. Pasaribu and W. Gunawan. 1992. Effect of nitrogen and rhizobium inoculation on growth and yield of soybean in red-yellow podzolic soil. Penelitian Pertanian 12: 3, 116-118.

Sunarlim, N dan M. Achlan. 1994. Kajian manfaat pupuk N dan Inokulasi Rhizobium pada kedelai yang ditanam setelah padi sawah. Risalah Hasil Penelitian Tanaman Pangan 3: 149-157.

Swift, M. and D. Bignell (Eds.). 2001.Standards Methods for Assessment of Soil Biodiversity and Land Use Practice. International Centre for Research in Agroforestry, Southeast Asian Regional Research Programme, Bogor, Indonesia.

Tenuta, M. 2006. Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Prospect for increasing nutrient acquisition and disease control. Available: http://www.umanitoba.ca/afs/agronomists_conf/2003/pdf/tenuta_rhizobacteria.pdf . [Accessed 22 July 2006].

Venkataraman, G.S. 1979. Algal inoculation on rice fields. p. 331-321. *In* International Rice Research Institute. Nitrogen and Rice. Los Banos, Philippines.

Waluyo, S.H. 2005. Biological Nitrogen Fixation of Soybean in Acid Soils of Sumatra, Indonesia. PhD Thesis, Wageningen University, The Netherlands.

Willems, A. and M.D. Collins. 1993. Phylogenetic analysis of rhizobia and agrobacteria based on 16S ribosomal RNA gene sequences. Int. J. Sys. Bacteriol. 43: 305-313.

Xu, L.M., C. Ge, Z. Cui, J. Li, and H. Fan. 1995. *Bradyrhizobium liaoningensis* sp. nov. isolated from the root nodules of soybean. Int. J. Sys. Bacteriol. 45: 706-711.

Yanagi, M. and K. Yamasato. 1993**.** Phylogenetic analysis of the family *Rhizobiaceae* and related bacteria by sequencing of 16S rRNA gene using PCR and DNA sequencer. FEMS Microbiology Lett. 107: 115-120.

Young, J.P.W., H.L. Downer, & B.D. Eardly. 1991. Phylogeny of the phototrophic rhizobium strain BTAil by polymerase chain reaction-based sequencing of a 16S rRNA gene segment. J. Bacteriol. 173: 2.271-2.277.

Young, J.P.W. and K.E. Haukka. 1996. Diversity and phylogeny of rhizobia. New Phytol. 133: 87-94.

Zuberer, D.A. and W.S. Silver. 1978. Biological dinitrogen fixation (Acetylene reduction) associated with Florida mangrove. Appl. Environ. Microbiol. 35: 567-575.

7. MIKROORGANISME PELARUT FOSFAT

Rohani Cinta Badia Ginting, Rasti Saraswati, dan Edi Husen

SUMMARY

Phosphate-solubilizing Microbes. Phosphorous is one of the essensiel elements which plays a very important role in photosyntetis and root development. A part of the phosphate forms is bound in soil colloids, so that it is not available for plants. A group of the so-called phosphate-solubilizing microorganisms can increase the efficiency of phosphate fertilization. These microrganisms including various bacteria, fungi, and actinomycetes, can solubilize unavailable to available phsophates. Naturally they live in the rhizosphere. The existence of phosphate-solubilizing microorganismes varies from site to site, and their different specific characteristics and optimum environmental conditions influence their effectiveness.Moreover, different phosphate forms in each soil type may cause the different requirement of phosphate-solubilizing inoculant for respective soil type. Phosphate compounds can be solubilized chemically and biologically by phosphate-solubilizing microorganisms. Chemical mechanism becomes the main phosphate solubilization,however, the findings in the last decade shows that there are other mechanisms in phosphate solubilization including proton release in repiration process or NH_4^+ formation, and P chelation by siderophores (ferric-specific chelates) produced by these microorganisms. Besides it is also found that organic acids are not only considered as chelating agents, but as hidrogen ion supplier for hydroxylapatite solubilization. Phosphate-solubilizing microorganisms can be isolated from the soil containing low phosphate particularly in the rhizosphere. The ability of bacteria and fungi to solubilize phosphates varies depending on strain. Currently peat is the most widely used carrier for phosphate-solubilizing microorganisms. Inoculant is applied directly to soils or as seed-coating at the rate of $>10^8$ cells g^{-1} carrier.

Unsur fosfat (P) adalah unsur esensial kedua setelah N yang berperan penting dalam fotosintesis dan perkembangan akar. Ketersediaan fosfat dalam tanah jarang yang melebihi 0,01% dari total P. Sebagian besar bentuk fosfat terikat oleh koloid tanah sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Tanah dengan kandungan organik rendah seperti Oksisols dan Ultisols yang banyak terdapat di Indonesia kandungan fosfat dalam organik bervariasi dari 20-80%, bahkan bisa kurang dari 20% tergantung tempat. Demikian juga kebanyakan lahan sawah di Indonesia telah jenuh fosfat. Fosfat tersebut tidak dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin oleh tanaman, karena fosfat dalam bentuk P-terikat di dalam tanah, sehingga petani tetap melakukan pemupukan P di lahan sawah walaupun sudah terdapat kandungan P yang cukup memadai. Pada tanah-tanah masam, fosfat akan bersenyawa dalam bentuk-bentuk Al-P, Fe-P, dan *occluded*-P, sedangkan pada tanah-tanah alkali, fosfat akan bersenyawa dengan kalsium (Ca) sebagai Ca-P membentuk senyawa kompleks yang sukar larut.

Adanya pengikatan-pengikatan fosfat tersebut menyebabkan pupuk fosfat yang diberikan tidak efisien, sehingga perlu diberikan dalam takaran tinggi. Pemberian pupuk fosfat ke dalam tanah, hanya 15-20% yang dapat diserap oleh tanaman. Sedangkan sisanya akan terjerap di antara koloid tanah dan tinggal sebagai residu dalam tanah (Buckman dan Brady, 1956; Jones, 1982). Hal ini akan menyebabkan defisiensi fosfat bagi pertumbuhan tanaman.

Salah satu alternatif untuk meningkatkan efisiensi pemupukan fosfat dalam mengatasi rendahnya fosfat tersedia dalam tanah adalah dengan memanfaatkan kelompok mikroorganisme pelarut fosfat, yaitu mikro-organisme yang dapat melarutkan fosfat tidak tersedia menjadi tersedia sehingga dapat diserap oleh tanaman. Pemanfaatan mikro-organisme pelarut fosfat diharapkan dapat mengatasi masalah P pada tanah masam (Sundara Rao dan Sinha, 1963; Asea *et al*., 1988; Saleh *et al*., 1989).

Mikroorganisme pelarut fosfat terdiri atas bakteri (Taha *et al.,* 1969), fungi (Khan & Bhatnagar, 1977) dan sedikit aktinomiset (Rao *et al*., 1982; Chen *et al*., 2002). Mikroorganisme yang termasuk dalam kelompok bakteri pelarut fosfat antara lain *Pseudomonas striata, P. diminuta, P. fluorescens, P. cerevisia, P. aeruginosa, P. putida, P. denitrificans, P. rathonis, Bacillus polymyxa, B. laevolacticus, B. megatherium, Thiobacillus* sp*., Mycobacterium, Micrococcus, Flavobacterium, Escherichia freundii, Cunninghamella, Brevibacterium* spp*., Serratia* spp*., Alcaligenes* spp*., Achromobacter* spp*., dan Thiobacillus* sp. Kelompok bakteri pelarut fosfat yang banyak terdapat pada lahan pertanian di Indonesia berasal dari genus *Enterobacter* dan *Mycobacterium* (Gunarto dan Nurhayati, 1994).

Sedangkan fungi yang dapat melarutkan fosfat umumnya berasal dari kelompok Deutromycetes antara lain *Aspergillus niger, A. awamori, P. digitatum, P. bilaji, Fusarium, Sclerotium, Aspergillus niger*, dan lain-lain (Alexander, 1977; Shale, 1978; Das, 1963). Fungi pelarut fosfat yang dominan di tanah adalah *Penicillium* dan *Aspergillus (*Suh *et al*., 1995; Whitelaw *et al*., 1999). Fungi pelarut fosfat yang dominan ditemukan di tanah masam Indonesia ialah *Aspergillus niger* dan *Penicillium* (Goenadi *et al.*, 1993).

Penyebaran mikroorganisme pelarut fosfat

Umumnya mikroorganisme pelarut fosfat secara alami berada di tanah berkisar 0,1-0,5% dari total populasi mikroorganisme (Kucey, 1983). Populasi mikroorganisme pelarut fosfat dari kelompok bakteri jauh lebih banyak dibandingkan dengan kelompok fungi. Jumlah populasi bakteri pelarut fosfat dapat mencapai 12 juta organisme per gram tanah sedangkan fungi pelarut fosfat hanya berkisar dua puluh ribu sampai dengan satu juta per gram tanah (Alexander, 1977).

Mikroorganisme ini hidup terutama di sekitar perakaran tanaman, yaitu di daerah permukaan tanah sampai kedalaman 25 cm dari permukaan tanah. Keberadaan mikroorganisme ini berkaitan dengan banyaknya jumlah bahan organik yang secara langsung mempengaruhi jumlah dan aktivitas hidupnya. Akar tanaman mempengaruhi kehidupan mikroorganisme dan secara fisiologis mikroorganisme yang berada dekat dengan daerah perakaran akan lebih aktif daripada yang hidup jauh dari daerah perakaran.

Keberadaan mikroorganisme pelarut fosfat dari suatu tempat ke tempat lainnya sangat beragam. Salah satu faktor yang menyebabkan keragaman tersebut adalah sifat biologisnya. Ada yang hidup pada kondisi asam, dan ada pula yang hidup pada kondisi netral dan basa, ada yang hipofilik, mesofilik, dan termofilik, ada yang hidup sebagai aerob dan ada yang anaerob, dan beberapa sifat lain yang bervariasi. Masing-masing mikroorganisme memiliki sifat-sifat khusus dan kondisi lingkungan optimal yang berbeda-beda yang mempengaruhi efektivitasnya melarutkan fosfat.

Pertumbuhan mikroorganisme pelarut fosfat sangat dipengaruhi oleh kemasaman tanah. Pada tanah masam, aktivitas mikroorganisme didominasi oleh kelompok fungi sebab pertumbuhan fungi optimum pada pH 5-5,5. Pertumbuhan fungi menurun bila pH meningkat. Fungi dalam tanah berbentuk miselium vegetatif ataupun spora (Waksman dan Starkey, 1981). Miselium atau filamen fungi tersebar di antara partikel tanah dan tersusun dalam hifa-hifa, ada yang bersepta dan ada yang tidak.

Sebaliknya pertumbuhan kelompok bakteri optimum pada pH sekitar netral dan meningkat seiring dengan meningkatnya pH tanah. Secara umum

bakteri pelarut fosfat yang dominan yang diisolasi dari rizosfer tanah termasuk ke dalam golongan mikroorganisme aerob pembentuk spora (Taha *et al*., 1969), hidup pada kisaran pH 4-10,6 (Sen dan Paul, 1957).

Populasi bakteri pelarut fosfat umumnya lebih rendah pada daerah yang beriklim kering dibandingkan dengan daerah yang beriklim sedang. Karena bentuk dan jumlah fosfat dan bahan organik yang terkandung dalam tanah berbeda-beda, maka keefektifan tiap mikro-organisme pelarut fosfat untuk melarutkan fosfat berbeda pula. Penggunaan mikroorganisme pelarut fosfat masih menghadapi beberapa kendala seperti faktor tanah, karena setiap jenis tanah mempunyai bentuk fosfat yang berbeda-beda antara lain pada lahan masam bentuk fosfat didominasi oleh Al-P, Fe-P atau *occluded*-P sedangkan pada lahan basa didominasi oleh bentuk Ca-P. Jadi masing-masing lahan seperti itu memerlukan inokulan pelarut fosfat yang berbeda.

Mekanisme pelarutan fosfat

Di dalam tanah, fosfat dapat berbentuk organik dan anorganik yang merupakan sumber fosfat penting bagi tanaman. Fosfat organik berasal dari bahan organik, sedangkan fosfat anorganik berasal dari mineral-mineral yang mengandung fosfat. Pelarutan senyawa fosfat oleh mikroorganisme pelarut fosfat berlangsung secara kimia dan biologis baik untuk bentuk fosfat organik maupun anorganik. Mikroorganisme pelarut fosfat membutuhkan adanya fosfat dalam bentuk tersedia dalam tanah untuk pertumbuhannya.

Mekanisme pelarutan fosfat secara kimia merupakan mekanisme pelarutan fosfat utama yang dilakukan oleh mikroorganisme. Mikro-organisme tersebut mengekskresikan sejumlah asam organik berbobot molekul rendah seperti oksalat, suksinat, tartrat, sitrat, laktat, α-ketoglutarat, asetat, formiat, propionat, glikolat, glutamat, glioksilat, malat, fumarat (Illmer dan Schinner, 1992; Banik dan Dey, 1982; Alexander, 1977; Beauchamp dan Hume, 1997). Meningkatnya asam-asam organik tersebut diikuti dengan penurunan pH. Penurunan pH juga dapat disebabkan karena terbebasnya asam sulfat dan nitrat pada oksidasi kemoautotrofik sulfur dan amonium, berturut-turut oleh bakteri *Thiobacillus* dan *Nitrosomonas* (Alexander, 1977). Perubahan pH berperanan penting dalam peningkatan kelarutan fosfat (Thomas, 1985; Asea *et al*., 1988). Selanjutnya asam-asam organik ini akan bereaksi dengan bahan pengikat fosfat seperti Al^{3+}, Fe^{3+}, Ca^{2+}, atau Mg^{2+} membentuk khelat organik yang stabil sehingga mampu membebaskan ion fosfat terikat dan oleh karena itu dapat diserap oleh tanaman.

Beberapa hasil penelitian dalam dekade terakhir, antar lain hasil penelitian Moghimi dan Tate (1978) menyimpulkan bahwa asam 2-ketoglukonat yang banyak terdapat pada rizosfir gandum berperan sebagai

penyedia ion hidrogen untuk melarutkan hidroksiapatit, tetapi bukan sebagai agen pengkhelat kalsium. Ditambahkan oleh hasil penelitian Kim *et al*. (1997) yang menyimpulkan bahwa meskipun asam yang diproduksi berperan penting dalam pelarutan hidroksiapatit, mekanisme ini bukan satu-satunya cara mikroorganisme pelarut fosfat melarutkan P-terikat. Hasil penelitian lain menunjukkan bahwa pelarutan P dipacu oleh pelepasan proton dalam proses respirasi atau pembentukan NH_4^+ (De Freitas *et al*., 1997; Bolan *et al*., 1997).

Pelarutan fosfat secara biologis terjadi karena mikroorganisme tersebut menghasilkan enzim antara lain enzim fosfatase (Lynch, 1983) dan enzim fitase (Alexander, 1977). Fosfatase merupakan enzim yang akan dihasilkan apabila ketersediaan fosfat rendah. Fosfatase diekskresi-kan oleh akar tanaman dan mikroorganisme, dan di dalam tanah yang lebih dominan adalah fosfatase yang dihasilkan oleh mikroorganisme (Joner *et al.,* 2000). Pada proses mineralisasi bahan organik, senyawa fosfat organik diuraikan menjadi bentuk fosfat anorganik yang tersedia bagi tanaman dengan bantuan enzim fosfatase (Gaur *et al*., 1980; Paul dan Clark, 1989). Enzim fosfatase dapat memutuskan fosfat yang terikat oleh senyawa-senyawa organik menjadi bentuk yang tersedia.

Louw dan Webley (1959) meyakini bahwa salah satu mekanisme pelepasan P yang terikat pada besi fosfat terkait dengan hidrogen sulfida (H_2S) yang diproduksi oleh bakteri pelarut fosfat. Pengkhelatan Fe^{3+} dari Fe-P oleh *siderophore* (ferric-specific chelates) yang diproduksi oleh beberapa bakteri pelarut fosfat juga diyakini sebagai salah satu mekanisme pelarutan hara P pada tanah-tanah masam (Mullen, 1998).

Hasil penelitian Louw dan Webley (1958; 1959) menggunakan berbagai sumber P menunjukkan bahwa beberapa isolat bakteri pelarut fosfat yang digunakan mampu melepaskan/melarutkan P dari batuan fosfat Gafsa (hidroksiapatit) dan kalsium fosfat, tetapi tidak satupun dari isolat tersebut mampu melepaskan P dalam bentuk *variscite* ($AlPO_4.\ 2H_2O$), *strengite* ($FePO_4.2H_2O$), dan *taranakite* ($2K_2O.3Al_2O_3.\ 5P_2O_5.\ 26H_2O$) yang banyak terdapat pada tanah-tanah masam. Hasil ini mengindikasikan bahwa ada perbedaan mekanisme pelepasan P-terikat pada tanah-tanah bereaksi netral dan basa dengan tanah-tanah bereaksi masam. Penelitian lebih jauh mengenai mekanisme pelepasan unsur P-terikat pada tanah-tanah masam yang banyak terdapat di daerah tropika seperti di Indonesia masih sangat diperlukan.

Aktivitas mikroorganisme pelarut fosfat sangat tergantung pada pH tanah (Soepardi, 1983). Kecepatan mineralisasi juga meningkat dengan nilai pH yang sesuai bagi metabolisme mikroorganisme dan pelepasan fosfat akan meningkat dengan meningkatnya nilai pH dari asam ke netral. Selain

itu, kecepatan mineralisasi ternyata berkorelasi langsung dengan jumlah substrat. Tanah-tanah yang kaya fosfat organik merupakan tanah yang paling aktif bagi berlangsungnya proses mineralisasi (Alexander, 1977).

Asam-asam organik yang dihasilkan mikroorganisme berbeda kualitas dan kuantitasnya dalam membebaskan fosfat (Soepardi, 1983). Asam-asam organik yang dihasilkan mikroorganisme pelarut fosfat mempunyai kemampuan untuk melarutkan fosfat dari yang terkuat sampai terlemah menurut urutan sebagai berikut: sitrat > oksalat > tartat > malat > HCl (Kim *et al*., 1997). Nagarajah *et al*. (1970) menggolongkan asam sitrat dan oksalat sangat efektif dalam melarutkan fosfat dari kaolinit dan gibsit, sedangkan asam malonat, tartarat dan malat, keefektifannya sedang, serta asam asetat dan suksinat digolongkan kurang efektif. Pada tanah vulkanik yang kaya alovan, asam-asam organik (benzoat, p-OH benzoat, salisilat, dan ptalat) tidak mampu melarutkan fosfat. Earl *et al.* (1979) meneliti pengaruh asam organik (sitrat, tartarat, dan asetat) pada gel Al dan Fe terhadap jerapan P. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa anion organik, maka Fe menjerap P dalam jumlah yang sangat banyak. Asam sitrat menjerap P jauh lebih banyak dibanding tartarat, demikian pula dalam hal mengurangi P terjerap. Tetapi jumlah Al yang diikat kedua asam tersebut tidak berbeda. Asam asetat tidak efektif dalam melarutkan fosfat, karena asetat kurang kuat dalam membentuk kompleks dengan Al maupun Fe.

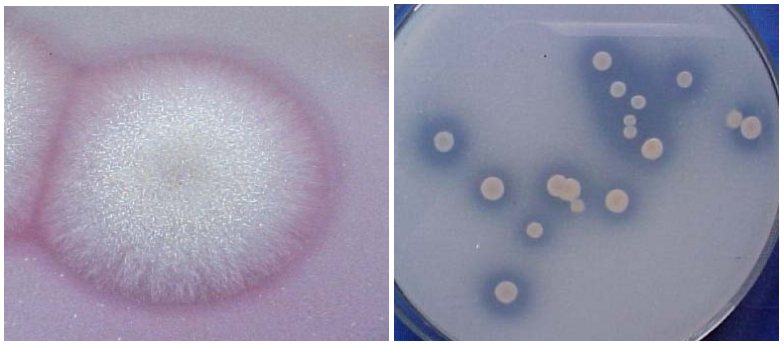
Asam organik dapat meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah melalui beberapa mekanisme, diantaranya adalah: (1) anion organik bersaing dengan ortofosfat pada permukaan tapak jerapan koloid tanah yang bermuatan positif, sehingga memperbesar peluang ortofosfat dapat diserap oleh tanaman; (2) pelepasan ortofosfat dari ikatan logam-P melalui pembentukan kompleks logam organik (Beaucamp dan Hume, 1997); dan (3) modifikasi muatan permukaan tapak jerapan oleh ligan organik (Havlin *et al*., 1999).

Hue *et al*. (1986) melaporkan bahwa beberapa asam organik juga dapat mengurangi daya racun Al yang dapat dipertukarkan (Al-dd) pada tanaman kapas. Kemampuan detoksifikasi asam organik terhadap Al-dd digolongkan dalam tiga kelompok, yaitu kuat (sitrat, oksalat, dan tartarat), sedang (malat, malonat, dan salisilat), dan lemah (suksinat, laktat, asetat, dan ptalat). Selain itu, Premono *et al*. (1992) juga mendapatkan bahwa mikroorganisme pelarut fosfat secara nyata mampu mengurangi Fe, Mn, dan Cu yang terserap oleh tanaman jagung yang ditanam pada tanah masam, sehingga berada pada tingkat kandungan yang normal. Terdapatnya asam-asam organik sitrat, oksalat, malat, tartarat dan malonat di dalam tanah sangat penting artinya dalam mengurangi pengikatan P oleh unsur penjerapnya dan mengurangi daya racun aluminium pada tanah masam.

Selain mengasimilasi fosfat yang dibebaskannya, mikroorganisme tersebut menghasilkan sejumlah besar fosfat terlarut sebagai kelebihan dari pasokan nutrisinya ke dalam larutan tanah. Dengan pelarutan fosfat oleh mikroorganisme tersebut, maka fosfat tersedia dalam tanah meningkat dan dapat diserap oleh akar tanaman. Untuk dapat mencapai akar secara alami hara fosfat yang larut masuk melalui mekanisme difusi.

Isolasi mikroorganisme pelarut fosfat

Mikroorganisme pelarut fosfat dapat diisolasi dari tanah yang kandungan fosfatnya rendah terutama di sekitar perakaran tanaman, karena bakteri ini menggunakan fosfat dalam jumlah sedikit dan mampu memanfaatkan fosfat tidak tersedia untuk keperluan metabolismenya (Alexander, 1977). Di laboratorium, deteksi dan estimasi kemampuan mikroorganisme pelarut fosfat dilakukan dengan mengunakan metode cawan petri. Media selektif yang umum digunakan untuk mengisolasi dan memperbanyak organisme pelarut fosfat adalah media agar Pikovskaya (Sundara Rao dan Sinha, 1963) yang berwarna putih keruh, karena mengandung P tidak larut seperti kalsium fosfat. Setelah inkubasi (48-72 jam), potensi mikroorganisme untuk melarutkan fosfat tidak tersedia secara kualitatif dicirikan oleh zona bening (halozone) di sekitar koloni mikroorganisme yang tumbuh pada agar trikalsium fosfat (Gambar 1), sementara mikroorganisme yang lain tidak menunjukkan ciri tersebut.



Gambar 1. Mikroorganisme pelarut fosfat yang membentuk zona bening. Bakteri (kanan), fungi (kiri)

Foto: Rohani Cinta Badia Ginting.

Sumber fosfat yang dapat digunakan dalam medium agar antara lain $Ca(PO_4)$, $FePO_4$, $AlPO_4$, apatit, fosfat alam, atau senyawa fosfat tidak larut yang lainnya sebagai satu-satunya sumber fosfat misalnya $Ca_3(PO_4)_2$ yang disuspensikan ke dalam medium agar. Kemampuan tiap mikroorganisme

pelarut fosfat tumbuh dan melarutkan fosfat berbeda-beda (Tabel 1) yang diidentifikasi dari waktu terbentuk dan luas halozone. Mikroorganisme pelarut fosfat yang unggul akan menghasilkan diameter halozone yang paling besar dibandingkan dengan koloni yang lainnya.

Kemampuan bakteri dan fungi pelarut P dalam melarutkan P berbeda-beda tergantung jenis strain (Gunadi dan Saraswati, 1993; Gunadi *et al.,* 1993). Untuk mengukur kemampuan kuantitatif pelarutan fosfat dari mikroorganisme, dilakukan dengan cara menumbuhkan biakan murni mikroorganisme tersebut pada media cair Pikovskaya. Sumber fosfat $Ca_3(PO_4)_2$ dapat diganti dengan fosfat alam atau senyawa fosfat tidak larut lainnya. Medium disterilisasi dalam autoklaf dan kemudian diisolasi dengan mikroorganisme pelarut fosfat. Selanjutnya biakan tersebut diinkubasi selama 3-7 hari. Kandungan P terlarut media cair tersebut diukur dengan menggunakan metode spektofotometer.

Tabel 1. Kemampuan mikroorganisme pelarut P dalam melarutkan P

Inokulan	Aktivitas enzim fosfatase		P-terlarut
	Asam	Basa	
	μM nitrofenol g^{-1} jam^{-1}		ppm
Aspergillus niger	2,3	0,5	6,4
***Micrococcus* sp.**	1,9	0,6	5,5
Tanah steril	0,7	0,4	4,4

Teknik produksi inokulan

Penelitian dan pemanfaatan mikroorganisme pelarut fosfat sudah mulai dilakukan sejak tahun 1930-an (Waksman dan Starkey, 1981; Gerretsen, 1948). Negara yang mula-mula memproduksi mikroorganisme pelarut fosfat sebagai pupuk hayati adalah Rusia pada tahun 1947. Inokulan pelarut fosfat ini dijual secara komersial di beberapa negara Eropa Timur dengan nama dagang fosfobakterin. Selain itu, India, Kanada, dan Mesir juga banyak melakukan penelitian terhadap mikroorganisme ini dengan tujuan untuk melarutkan endapan-endapan Ca-P (Sen dan Paul, 1957; Kundu dan Gaur, 1980; Sundara Rao dan Sinha, 1963).

Untuk memproduksi inokulan dibutuhkan bahan pembawa yang mampu mendukung pertumbuhan dan perkembangan mikroorganisme pelarut fosfat. Beberapa bahan pembawa yang telah diuji antara lain tanah-tanah mineral, gambut, zeolit, batu bara, bentonit, vermikulit, dan perlit. Fosfobakterin yang dikomersialkan di negara Rusia menggunakan kaolin yang membawa 7 juta spora bakteri *Bacillus megaterium* varietas *phosphaticum* setiap gram kaolin. Dari berbagai bahan pembawa yang telah

diuji, saat ini gambut merupakan bahan pembawa yang paling banyak digunakan untuk memproduksi inokulan. Namun demikian, bahan pembawa gambut bukan berarti tidak mempunyai masalah, karena beberapa jenis gambut dapat menghambat pertumbuhan strain rhizobia tertentu.

Dari hasil penelitian Premono dan Widiastuti (1994) media pembawa kompos-zeolit (9:1, v/v) yang disimpan pada suhu 28^0 C merupakan bahan pembawa yang terbaik. Medium kompos lebih baik dibandingkan gambut dalam mempertahankan populasi *P. putida*, dan penambahan zeolit menjadikan medium pembawa tersebut semakin baik karena zeolit mempunyai sifat khusus yaitu mempunyai kisi-kisi yang saling berhubungan dan mempunyai kapasitas menahan zat alir yang tinggi (Mumpton, 1984).

Pemberian inokulan pelarut fosfat pada tanaman biasanya harus dengan kepadatan yang tinggi, yaitu lebih dari 10^8 sel $gram^{-1}$ media pembawanya. Dengan kepadatan yang tinggi diharapkan mikroorganisme pelarut fosfat yang diberikan tersebut dapat bersaing dengan mikroorganisme yang ada di dalam tanah. Dengan demikian mampu mendominasi di sekitar perakaran tanaman.

Pemanfaatan mikroorganisme pelarut fosfat untuk efisiensi pemupukan fosfat

Pemanfaatan mikroorganisme pelarut fosfat sebagai pupuk hayati dilakukan dengan cara menginokulasi tanah secara langsung pada tanaman benih atau diberikan ke biji (seed coating) (Paul dan Clark, 1989). Inokulasi biasanya dilakukan pada saat tanam bersamaan dengan pemupukan P. Pada tanah-tanah yang kandungan P tinggi akibat akumulasi atau residu pemberian pupuk P yang menumpuk, maka mikroorganisme ini dapat digunakan sebagai penambang fosfat dari tanah-tanah tersebut. Dengan pemberian mikroorganisme pelarut fosfat tersebut, diharapkan dapat meningkatkan kelarutan P dari pupuk P yang diberikan maupun senyawa P yang berasal dari residu pemupukan sebelumnya di dalam tanah.

Kemampuan berbagai jenis mikroorganisme pelarut fosfat dalam menyediakan unsur P banyak dilaporkan. Bakteri *P. putida, Citrobacter intermedium,* dan *Serratia mesenteroides* mampu meningkatkan P yang larut dalam medium $AlPO_4$ dari batuan fosfat sebanyak 6-19 kali lipat, yaitu sekitar 0,57-22,0 ppm, tetapi tidak mampu melarutkan $FePO_4$ (Premono *et al*., 1991). Isolat bakteri yang digunakan Sundara Rao dan Sinha (1963) mampu melarutkan $Ca_3(PO_4)_2$ sampai 172 ppm. Goenadi *et al*. (1993) mengisolasi bakteri pelarut fosfat dari tanah Andisol, Ultisol, dan dari pupuk kandang, dan diperoleh bahwa bakteri pelarut fosfat ter-sebut dapat melarutkan fosfat 10-184 kali lebih banyak daripada kontrol.

Sen dan Paul (1957) menggunakan fosfobakterin galur fosfo-24, *Bacillus subtilis, Bacterium mycoides,* dan *B*. *mesenterricus* untuk melarutkan P-organik (glisero fosfat, lesitin, dan tepung tulang) dan P-anorganik (Ca-P, Fe-P) yang dilakukan secara *in vitro*. Hasilnya menunjukkan bahwa bakteri tersebut mampu melarutkan $FePO_4$, $Ca_3(PO_4)_2$, gliserofosfat, lesitin, dan tepung tulang berturut-turut sebanyak 2-7, 3-9, 3-13, 5-21, dan 14%. Banik dan Dey (1982) memanfaatkan *Bacillus* sp. dan dua galur *Bacillus firmus*, hasil percobaannya menunjukkan bahwa ketiga bakteri tersebut masing-masing hanya mampu melarutkan berturut-turut 0,3, 0,9, dan 0,3% dari senyawa $Ca_3(PO_4)_2$ yang diberikan, dan tidak mampu melarutkan $AlPO_4$ dan $FePO_4$.

Fungi lebih mampu melarutkan P dalam bentuk $AlPO_4$ (pada tanah masam), sedangkan bakteri lebih efektif melarutkan fosfat dalam bentuk Ca_3PO_4 pada tanah basa (Banik dan Dey, 1982). Beberapa peneliti telah membuktikan bahwa jenis-jenis fungi tertentu mempunyai kemampuan yang lebih tinggi daripada bakteri (Beever dan Burns, 1980; Banik dan Dey, 1982; Kucey, 1983; Illmer dan Schinner, 1992; Goenadi dan Saraswati, 1993). Menurut Goenadi dan Saraswati (1993), kemampuan fungi melarutkan fosfat berkisar dari 12-162 ppm di medium Pikovskaya yang mengandung sumber P-$AlPO_4$ yang relatif lebih sukar larut dari sumber P lainnya. Lestari dan Saraswati (1997) melaporkan bahwa fungi pelarut P tersebut meningkatkan kadar fosfat terlarut sebesar 27-47% di tanah masam. Lingkungan pertumbuhan yang berbeda ini memberi peluang yang baik untuk mengembangkan fungi di daerah tropis karena fungi lebih menyukai tanah masam.

Tanaman dapat menyerap fosfat dalam bentuk ion $H_2PO_4^-$ dan $HPO_4^{2=}$. Tetapi pada umumnya ion $H_2PO_4^-$ lebih tersedia dibandingkan dengan HPO_4^{2-}. Hara fosfat diperlukan dalam proses metabolisme tanaman antara lain untuk merangsang pertumbuhan tanaman, perkembangan akar, pertumbuhan buah, ikut dalam pembelahan sel, memperkuat batang, meningkatkan ketahanan terhadap rebah, memperbaiki kualitas, dan memperkuat daya tahan terhadap hama dan penyakit.

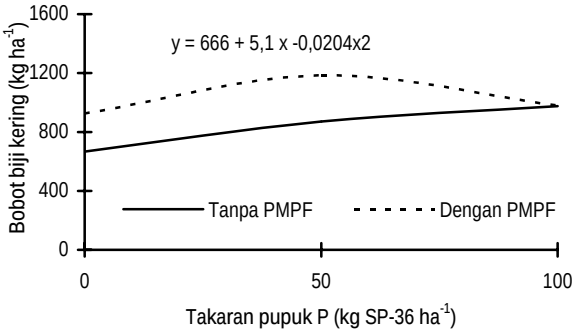
Sejumlah tanaman yang pernah diinokulasi dengan mikro-organisme pelarut fosfat antara lain gandum, gula bit, kubis, *barley*, kedelai, jagung, padi, kacang panjang, kacang tanah, tomat, kentang, kapas, timun, dan dapat meningkatkan hasil 10-15%. Pemanfaatan *Pseudomonas putida* dan *Citrobacter intermedium* mampu meningkatkan bobot kering tanaman sampai 30% (Premono *et al*., 1991).

Penggunaan mikroorganisme pelarut fosfat dapat mensubstitusi sebagian atau seluruhnya kebutuhan tanaman akan pupuk P, tergantung pada kandungan P tanahnya dan memberikan hasil yang positif terhadap pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Prihatini *et al.* (1997) melaporkan bahwa inokulan bakteri pelarut fosfat memberikan hasil yang sama dengan pemberian pupuk TSP. Premono dan Widyastuti (1994) menggunakan batuan

fosfat yang dikombinasi dengan *P. putida* dan diperoleh bahwa kombinasi tersebut dapat menggantikan pupuk, sehingga penggunaan pupuk TSP dapat dikurangi atau sebagian dapat disubstisusi dengan batuan fosfat. Isgitani *et al*. (2005) mendapatkan bahwa bakteri pelarut fosfat yang digunakannya dapat meningkatkan jumlah dan berat biji, dan secara nyata meningkatkan pertumbuhan vegetatif sorgum. Sunarlim *et al*. (2000) melaporkan bahwa penggunaan pupuk mikroba pelarut fosfat (PMPF) di lokasi yang belum pernah ditanami kedelai, di Seputih Banyak, Lampung dapat menekan kebutuhan pupuk P pada kedelai hingga 50-60% (Tabel 2). Pada tanaman kedelai dengan meng-gunakan PMPF hanya memerlukan 50 kg SP-36 ha^{-1}, sedangkan pada tanaman kedelai tanpa PMPF membutuhkan 125 kg SP-36 ha^{-1} (Gambar 2).

Tabel 2. Interaksi pupuk P dan pupuk mikroorganisme pelarut fosfat (PMPF) terhadap serapan N tanaman kedelai 42 hari setelah tanam

Takaran pupuk P	Tanpa PMPF	PMPF
50 kg ha^{-1}	29,6 a	70,5 d
100 kg ha^{-1}	40,9 ab	46,9 bc



Gambar 2. Pengaruh interaksi antara takaran pupuk P dan pupuk mikroorganisme pelarut fosfat terhadap bobot biji kering kedelai pada lahan kering masam

Santosa *et al.* (1997) menunjukkan bahwa inokulasi bakteri pelarut fosfat dan aplikasi P-alam (rock phosphate) pada tanah masam Ultisols mampu meningkatkan ketersediaan P, serapan P, dan bobot biji kering kacang tanah (Tabel 3). Hasil ini memperlihatkan peran bakteri pelarut fosfat dalam mempercepat proses pelarutan P dari P-alam, namun belum banyak menjelaskan peran mikroorganisme tersebut dalam melepaskan P yang terikat pada mineral tanah.

Tabel 3. Pengaruh inokulasi bakteri pelarut fosfat (BPF) dan P-alam terhadap kandungan P tanah, serapan P pada saat tanaman berbunga, dan hasil panen kacang tanah di tanah masam (rumah kaca)

P-alam	Tanpa inokulasi	*Proteus* sp.	*Bacillus* sp.	Rerata
ppm P_2O_5		P-total (HCl 25%), mg $100g^{-1}$		
0	8,15	8,51	7,33	8,00 a
30	9,88	11,59	9,51	10,31 a
60	18,57	19,03	23,65	20,41 b
90	21,83	26,22	27,99	25,35 c
Rata-rata	14,61 a	16,34 a	17,2 a	
		P-tersedia (Bray I), ppm P_2O_5		
0	5,84	8,22	7,62	7,22 c
30	7,32	9,76	8,50	8,52 b
60	9,04	10,07	9,58	9,56 b
90	11,23	11,64	12,14	11,67 a
Rata-rata	8,36 b	9,92 a	9,46 a	
		Serapan P, mg P $tanaman^{-1}$		
0	1,84	2,28	2,20	2,11 c
30	2,96	3,80	3,25	3,34 b
60	3,44	3,64	3,83	3,62 b
90	3,70	4,72	4,01	4,14 a
Rata-rata	2,98 c	3,61 a	3,32 b	
		Bobot biji kering, g $tanaman^{-1}$		
0	2,43 d	3,00 b	1,53 d	2,32
30	5,97 c	8,60 a	6,70 c	7,09
60	7,83 b	8,83 a	8,40 b	8,35
90	9,83 a	9,40 a	10,63 a	9,95
Rata-rata	6,51	7,46	6,81	

Keterangan: Huruf yang sama dibelakang angka pada baris atau lajur yang sama pada tiap parameter pengamatan tidak berbeda nyata pada taraf 5% DMRT.

Sumber: Santosa *et al*. (1997)

Banyak di antara mikroorganisme pelarut fosfat, selain dapat meningkatkan ketersediaan fosfat, juga mampu mengkolonisasi rizosfir dan menghasilkan zat pengatur tumbuh, antara lain *P. fluorescens, P. putida, P. striata,* dan *Bacillus megaterium*. Mikroba tersebut dapat menghasilkan zat pengatur tumbuh seperti asam indol asetat (IAA) dan asam giberelin (GA3) (Arshad dan Frankenberger, 1993; Patten dan Glick, 1996) (lihat Bab 9 pada buku ini).

Beberapa mikroorganisme pelarut fosfat juga dapat berperan sebagai biokontrol melalui proteksinya terhadap penyakit. Dilaporkan bahwa *Pseudomonas* sp. dapat mencegah tanaman dari patogen fungi yang berasal dari tanah dan potensialnya sebagai agen biokontrol untuk digunakan secara komersial di rumah kaca maupun di lapangan (Arshad dan Frankenberger, 1993). *Pseudomonas fluorescens* dapat mengontrol perkembangan penyakit *damping-off Pythium ultimum* (Fenton *et al.,* 1992). Selain itu, bakteri *P. fluorescens* ini juga dapat mengontrol perkembangan jamur *Sclerotium rolfsii* pada tanaman kacang-kacangan.

Dari beberapa keberhasilan BPF meningkatkan pertumbuhan tanaman, sebagian diantaranya terkait dengan peran ganda BPF. Beberapa strain dan jenis BPF dilaporkan mampu menghasilkan fitohormon yang turut berperan dalam perkembangan tanaman (Pietr *et al*., 1991; De Freitas *et al*., 1997). Hasil penelitian Berthelin *et al*. (1991) pada tanaman tahunan yang diinokulasi oleh *Agrobacterium* sp. menunjukkan peningkatan pertumbuhan tanaman yang tidak berkaitan langsung dengan kandungan P tanaman (Tabel 4). Namun, karakter fungsional tambahan ini memberi keuntungan dalam pemanfaatan rizobakteri ini sebagai agen pemacu tumbuh tanaman.

Tabel 4. Pertumbuhan, serapan dan kandungan P, kandungan asam organik pada rizosfir cemara dan pinus umur 2 tahun yang diinokulasi oleh *Agrobacterium* sp. dan ditaman pada media campuran pasir + mika + P-alam (rumah kaca)

Uraian	Cemara		Pinus	
	+ RPTT	- RPTT	+ RPTT	- RPTT
Pertumbuhan (g tanaman^{-1})				
- Tajuk	2,37 a	1,22 b	4,40 c	4,37 c
- Akar	2,38 a	1,48 b	3,54 c	2,52 d
Serapan P (mg P tanaman^{-1})	10,3 a	5,9 b	11,2 c	9,5 d
Kandungan P (‰)				
- Tajuk	2,6 a	3,5 a	1,4 c	1,3 c
- Akar	1,5 a	1,8 a	1,5 c	1,4 c
Asam organik di rizosfir (me tanaman^{-1})	42,9 a	20,4 a	103,3 c	63,2 d

Keterangan: Huruf yang sama dibelakang angka pada baris yang sama pada tiap dua perlakuan perbanding inokulasi (+ RPTT) dan tanpa inokulasi (- RPTT) tidak berbeda nyata

Sumber: Berthelin *et al*. (1991)

DAFTAR PUSTAKA

Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Mycrobiology. 2nd Ed. John Wiley and Sons. New York. 467 p.

Arshad, M. and W.T. Frankenberger. 1993. Microbial production of plant growth regulators. p. 307-347. *In* F.B. Metting (Ed.). Soil Microbial Ecology. Marcel Dekker, Inc. New York, Bassel, Hongkong.

Asea, P.E.A., R.M.N. Kucey, and J.W.B. Stewart. 1988. Inorganic phosphate solubilization by two *Penicillium* species in solution culture and soil. Soil Biol. Biochem. 20: 459-464.

Banik, S. and B.K. Dey. 1982. Available phosphate content of an alluvial soil as influenced by inoculation of some isolated phosphate-solubilizing micro-organisms. Plant Soil 69: 353-364.

Beauchamp, E.G. and D.J. Hume. 1997. Agricultural soil manipulation: The use of bacteris, manuring, and plowing. p. 643-664. *In* J.D. van Elsas, J.T. Trevors, and E.M.H. Wellington (Eds.). Modern Soil Microbiology. Marcel Dekker, New York.

Beever, R.E. and D.J.W. Burns. 1980. Phosphorus uptake, storage, and utilization by fungi. Adv. Bot. Res. 8: 127-219.

Berthelin, J., C. Leyval, F. Laheurte, and P. De Guidici. 1991. Some consideration on the relations between phosphate solubilizing rhizobacteria and their effect on seedlings and plants growth related to phosphorus mobilization. p. 359-364. *In* C. Keel, B. Koller, and G. Defago (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizo-bacteria-Progress and Prospects. The Second International Workshop on PGPR. Interlaken, Switzerland, October 14-19, 1990.

Bolan, N.S., J. Elliott, P.E.H. Gregg, and S. Weil. 1997. Enhanced dissolution of phosphate rocks in the rhizosphere. Biol. Fertil.Soils 24: 169-174.

Buckman, H.O. and N.C. Brady. 1956. The Nature and Properties of Soils. 5th ed. Macmillan, New York.

Chen, X., J.J. Tang, Z.G. Fang, and S. Hu. 2002. Phosphate-solubilizing microbes in rhizosphere soils of 19 weeds in southeastern China. Journal of Zhejiang University Science 3: 355-361

Das, A.C. 1963. Utilization of insoluble phosphate by soil fungi. J. Indian Soc. Soil Sci. 11: 203-207.

De Freitas, J.R., M.R. Banerjee, and J.J. Germida. 1997. Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.). Biol. Fertil. Soils 24: 358-364.

Earl, K.D., J.K. Syers, and J.R. Mc Laughlin. 1979. Origin of the effect of citrate, tartarate, and acetate on phosphate sorption by soils and synthetic gels. Soil Sci. Am. J. 43: 474-678.

Fenton, A.M., P.M. Stephens, J. Crowley, M.O. Callaghan, and F. O'Gara. 1992. Exploitation of genes involved 2,4-diacethylphloroglucinol biosynthesis to confer a new biocontrol capability to a *Pseudomonas* strain. Appl. Environ. Microbiol. 58: 3.873-3.878.

Gaur, A.C., R.S. Mathur, and K.V. Sadasivam. 1980. Effect of organic materials and phosphate-dissolving culture on the yield of wheat and greengram. Indian. J. Agron. 25: 501-503.

Gerretsen, F.C. 1948. The influence of microorganism on the phosphorus uptake by the plant. Plant Soil 1: 51-81.

Goenadi, D.H., R. Saraswati, dan Y. Lestari. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat bakteri asal tanah dan pupuk kandang sapi. Menara Perkebunan 61(2): 44-49.

Goenadi, D.H., dan R. Saraswati. 1993. Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat fungi pelarut fosfat. Menara Perkebunan 61(3): 61-66.

Gunarto, L. dan L. Nurhayati. 1994. Karakterisasi dan identifikasi bakteri pelarut fosfat pada tanah-tanah di Indonesia. Makalah disampaikan pada Seminar Tahunan 1994 Hasil Penelitian Tanaman Pangan, Balai Penelitian Tanaman Pangan Bogor, 29-30 Maret 1994.

Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson. 1999. Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. 6th ed. Prentice Hall, New Jersey.

Hue, N.V., G.R. Craddock, and F. Adamet. 1986. Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoils. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 28-34.

Illmer, P. and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphate by microorganisms isolated from forest soils. Soil Biol. Biochem. 24(4): 389-395.

Isgitani, M., S. Kabirun, dan S.A. Siradz. 2005. Pengaruh inokulasi bakteri pelarut fosfat terhadap pertumbuhan sorghum pada berbagai kandungan P tanah. Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan 5(1): 48-54.

Jones, U.S. 1982. Fertilizers and Soil Fertility. 2nd ed. Reston Publ. Co. Reston, Virginia.

Joner, E.J., I.M. Aarle, and M. Vosatka. 2000. Phosphatase activity of extra-radical arbuscular mycorrhiza hyphae: a review. Plant Soil 226: 199-210.

Khan, J.A. and R.M. Bhatnagar. 1977. Studies on solubilization of insoluble phosphates by microorganisms. I. Solubilization of Indian phosphate rocks by *Aspergillus niger* and *Penicillium* sp. Fert. Technol. 14: 329-333.

Kim, K. Y., G. A. McDonald, and D. Jordan. 1997. Solubilization of hydroxyapatite by *Enterobacter agglomerans* and cloned *Escherichia coli* in culture medium. Biol. Fertil. Soils 24: 347-352.

Kucey, R.M.N. 1983. Phosphate-solubilizing bacteria and fungi in various cultivated and virgin Alberta soils. Can. J. Soil Sci. 63: 671-678.

Kundu, B.S. and A.C. Gaur. 1980. Establishment of nitrogen fixing and phosphate solubilizing bacteria in rhizosphere and their effect on yield and nutrient uptake of wheat crop. Plant Soil 57: 223-230.

Lestari, Y. Dan R. Saraswati. 1997. Aktivitas enzim fosfatase jamur pelarut fosfat pada tanah Podzolik Merah Kuning. *Dalam* Prosiding Seminar Pembangunan Pertanian Berkelanjutan Menyongsong Era Globalisasi, Banjarmasin, 13-14 Maret 1997.

Louw, H.A. and D.M. Webley. 1958. A plate method for estimating the numbers of phosphate-dissolving and acid-producing bacteria in soil. Nature, 182, 1317.

Louw, H.A. and D.M. Webley. 1959. A study of soil bacteria dissolving certain mineral phosphate fertilizers and related compounds. J. appl. Bact. 22: 227-233.

Lynch, J.M. 1983. Soil Biotechnology: Blackwell Sci. Pub. Co., London. 191 p.

Moghimi, A. and M.E. Tate. 1978. Does 2-ketogluconate chelate calcium in the pH range 2.4 to 6.4. Soil Biol. Biochem. 10: 289-292.

Mullen, M.D. 1998. Transformation of other elements. p. 369-386. *In* Silvia *et al*. (Ed.). Principles and Application of Soil Microbiology. Prentice Hall. New Jersey.

Mumpton, F.A. 1984. The Role of Natural Zeolites in Agriculture. J. Animal. Sci. 12: 3-24.

Nagarajah, S., A.M. Posneer, and J.P. Quirk. 1970. Description of phosphate from kaolinite by citrate and bicarbonate. Soil Sci. Am. J. 32: 507-510.

Paul, E.A. and F.E. Clark. 1989. Phosphorus transformation in soil. *In* Soil Microbiology and Biochemistry. Academic Press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich, Publ.n New York.

Patten, C.L. and B.R. Glick. 1996. Bacterial biosynthesis of indole-3-acetic acid. Can. J. Microbiol. 42: 207-220.

Pietr, S.J., B. Karon, and M. Stankiewicz. 1991. Influence of rock phosphate-dissolving rhizobacteria on the growth and P-uptake by cereals: Preliminary results. p. 81-84. *In* C. Keel, B. Koller, and G. Defago (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria-Progress and Prospects. The Second International Workshop on PGPR. Interlaken, Switzerland, October 14-19, 1990.

Premono, M.E., R. Widyastuti, dan I. Anas. 1991. Pengaruh bakteri pelarut fosfat terhadap senyawa P sukar larut, ketersediaan P tanah dan pertumbuhan jagung pada tanah masam. Makalah Pertemuan Ilmiah Tahunan, Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia, Bogor, 2-3 Desember 1991 (Tidak dipublikasikan).

Premono, M.E., R. Widyastuti, dan I. Anas. 1992. Pengaruh bakteri pelarut fosfat terhadap serapn kation unsur mikro tanaman jagung pada tanah masam. Makalah Pertemuan Ilmiah Tahunan, Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia, Bandung, 31 Juli-1 Agustus 1992.

Premono, M.E. dan R. Widyastuti. 1994. Stabilitas *Pseudomonas putida* dalam medium pembawa dan potensinya sebagai pupuk hayati. Hayati 1 (2): 55-58.

Prihatini, T., S. Komariah, A. Hamzah, dan E. Suhaeti. 1997. Penambangan residu P secara biologis di lahan sawah. hlm. 89-98 D*alam* Prosiding Penelitian Tanah.

Rao, A.V., B. Venkateswarin, and P. Kami. 1982. Isolation of a phosphate dissolving soil actinomycete. Curr. Sci. 51: 1.117-1.118.

Saleh, H.M., A.I. Yahya., A.M. Abdul-Rahem, and H. Munam. 1989. Availability of phosphorus in a calcareous soil treated with rock phosphateor superphosphate as affected by phosphate dissolving fungi. Plant Soil 120: 181-185.

Santosa, E., T. Prihatini, S.Widati, dan Sukristiyonubowo. 1997. Pengaruh bakteri pelarut fosfat dan fosfat alam terhadap beberapa sifat tanah dan respon tanaman kacang tanah (*Arachis hypogaea*. L). *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Pupuk, HITI-Universitas Lampung.

Sen, A. and N.B. Paul. 1957. Solubilization of phosphatase by some common soil bacteria. Curr. Sci. 26: 2-22.

Shale, A.J. 1978. MacGraw Fundamental Principles of Bacteriology. 7^{ed}. MacGrow-Hill Publ. Co. Ltd. New Delhi. 226 p.

Soepardi, G. 1983. Sifat dan Ciri Tanah. Institut Pertanian Bogor. 591 hlm.

Sunarlim, N., S. Hutami, and R. Saraswati. 2000. Aplikasi pupuk mikroba pelarut fosfat pada tanaman jagung di tanah Podsolik Merah Kuning. *Dalam* Prosiding Seminar Tahunan Agronomi.

Sundara Rao, W.V.B. and M.K. Sinha. 1963. Phosphate dissolving microorganisms in the soil and rhizosphere. Indian J. Agric. Sci. 33: 272-278.

Suh, J.S., S.K. Lee, K.S. Kim, and K.Y. Seong. 1995. Solubilization of insoluble phosphates by *Pseudomonas putida, Penicillium* sp. and *Aspergillus niger* isolated from Korean Soils. J.Kor. Soc. Soil Sci. Fert. 28(3): 278-286.

Taha, S.M., and S.A.Z. Mahmoud, A.H. El-Damaty, and A.M. Abd. El-Hafez. 1969. Activity of phosphate-dissolving bacteria in Egyptian soils. Plant Soil 31(1): 149-160.

Thomas, G.V. 1985. Occurence and availability of phosphate-solubilizing fungi from coconut plant soils. Plant Soil 87: 57-364.

Whitelaw, M.A., R.J. Harden, and K.R. Helyar. 1999. Phosphate solubilization in culture by soil fungus *Penicillium radicum*. Soil Biol. Biochem. 31: 655-665.

Waksman, S.A. and R.L. Starkey. 1981. The Soil and The Microbe. John Wiley and Sons, Inc. New York.

8. CENDAWAN MIKORIZA ARBUSKULER

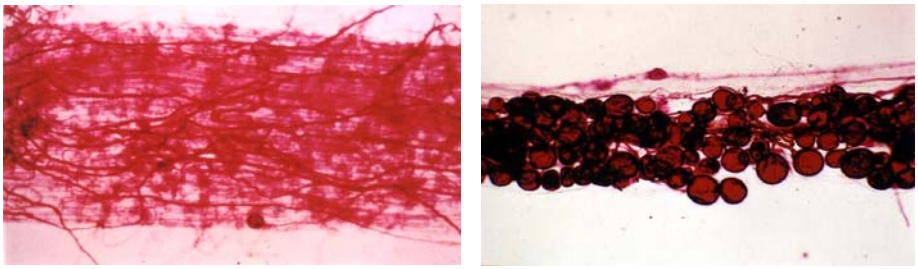
R.D.M. Simanungkalit

Summary

Arbuscular Mycorrhizal Fungi. Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) are a group of soil-borne fungi, which are biotropic and obligate symbionts. It can grow in symbiosis with a wide range of plant roots and can not grow in axenic culture. As yet it is only multiplied by growing it with suitable host plants. Naturally it is widely distributed under various agroecosystems. More than 175 species have been identified. Root colonization by AM fungi are not spesific; it has a broad spectrum. The most important role of arbuscular mycorrhizal fungi is its ability to take up phosphorus nutrient and other immobile nutrients from soils. Other roles which arbuscular mycorrhizal fungi can play are increasing plant tolerance to abiotic stresses such as drought, salinity, and heavy metal, improving physical soil characteristics, and increasing plant tolerance to biotic stress such as various soil born diseases, and rehabilitating degraded lands. Inoculating the crop can increase the efficiency of anorganic fertilizer application.The inefficient production technology of inoculant limits its utilization on a large scale

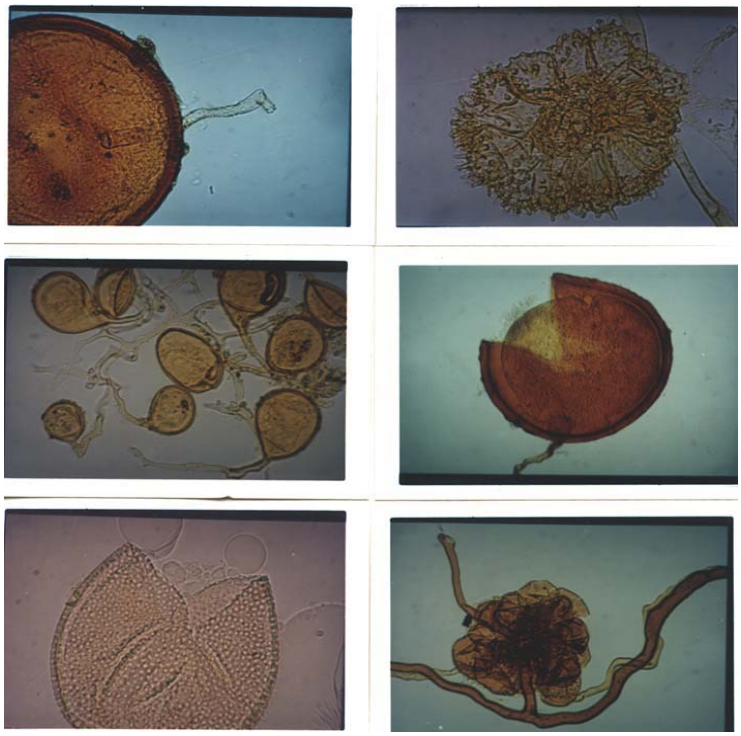
Cendawan mikoriza arbuskuler (MA) merupakan satu kelompok jamur tanah biotrof obligat yang tidak dapat melestarikan pertumbuhan dan reproduksinya bila terpisah dari tanaman inang. Cendawan ini dicirikan oleh adanya struktur vesikel dan/atau arbuskel. Ada yang membentuk kedua struktur ini dalam akar yang dikolonisasi, sehingga lama sebelumnya cendawan dari kelompok ini dikenal sebagai cendawan vesikuler-arbuskuler. Memang ada keberatan karena ada juga spesies dari kelompok ini tidak membentuk vesikel dalam akar sehingga ada kecenderungan untuk menggunakan cendawan MA untuk menyatakan cendawan mikoriza yang membentuk vesikel dan yang tidak, karena struktur arbuskel terdapat pada semua spesies. Oleh karena sampai sekarang dalam literatur mikoriza, kedua sebutan untuk kelompok cendawan masih dipakai. Vesikel merupakan struktur berdinding tipis berbentuk bulat, lonjong atau tidak

teratur. Struktur ini mengandung senyawa lipid (Gambar 1). Arbuskel merupakan struktur dalam akar berbentuk seperti pohon berasal dari cabang-cabang hifa intraradikal setelah hifa cabang menembus dinding sel korteks, dan terbentuk antara dinding sel dan membran plasma.



Gambar 1. Kolonisasi cendawan MA dalam akar padi penuh dengan hifa (kiri), penuh dengan spora (kanan)

Foto: R.D.M. Simanungkalit



Gambar 2. Spora beberapa spesies cendawan MA

Foto: R.D.M. Simanungkalit

Penggunaan teknik-teknik molekuler dalam mikrobiologi dalam mengidentifikasi mikroba pada 15 tahun terakhir ini telah menyebabkan revolusi dalam taksonomi mikroba. Pada masa-masa sebelumnya identifikasi cendawan MA hanya dilakukan berdasarkan karakteristik morfologi sporanya saja (bentuk, warna, tangkai spora, dan ornamen pada permukaan spora). Gambar 2 menunjukkan bentuk, tangkai spora, dan ornamen pada permukaan berbagai spora cendawan MA.

Tabel 1. Sejarah perkembangan taksonomi cendawan MA

Perkembangan	Sumber
Semua spesies cendawan MA disebut sebagai *Endogone*. Sampai tahun 1960-an dalam literatur mikoriza nama ini masih umum digunakan	Frank (1908)
Endogonaceae ditempatkan dalam ordo Mucorales	Bucholtz (1912)
Revisi semua famili Endogonaceae dengan menempatkan anggota *Glomus* dalam *Endogone*, dan *Sclerocystis* tersendiri	Thaxter (1922)
Endogonaceae ditempatkan dalam ordo Endogonales	Moreau (1953)
Beberapa spesies *Endogone* menjadi *Glomus*. Endogonaceae menjadi tiga genus, yaitu *Glomus*, *Acaulospora* dan *Gigaspora*	Gerdemann dan Trappe (1974)
Klasifikasi baru cendawan MA. Ordo Glomales terdiri atas dua subordo, Glomineae dan Gigasporaneae	Morton dan Benny (1990)
Penggunaan perbedaan sekuens 18S rDNA untuk identifikasi spesies. Hasilnya *Acaulospora gerdemannii, Acaulospora trappei* dan *Glomus leptotichum* masing-masing menjadi *Archaeospora gerdemannii*, *A. trappei* dan *A. leptoticha* dan ditempatkan dalam famili baru Archaeosporaceae. *Glomus occultum* dan *G. brasilianum* masing-masing menjadi *Paraglomus occultum* dan *Paraglomus brasilianum* dan ditempatkan dalam famili baru Paraglomaceae	Morton & Redecker (2001)

Pada akhir-akhir ini penggunaan teknik molekuler telah digunakan, selain teknik-teknik konvensional. Taksonomi cendawan MA terbaru dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan taksonomi terbaru ini spesies dalam kelompok cendawan MA berjumlah 176, masing-masing 32 *Acaulospora*, 4 *Entrophospora*, 3 *Archaeospor*a, 98 *Glomus*, 2 *Paraglomus*, 8 *Gigaspora*, dan 29 *Scutellospora* (http://invam.caf.wvu.edu/fungi/taxanomy/ nomenclature.htm)

Tabel 2. Taksonomi cendawan MA

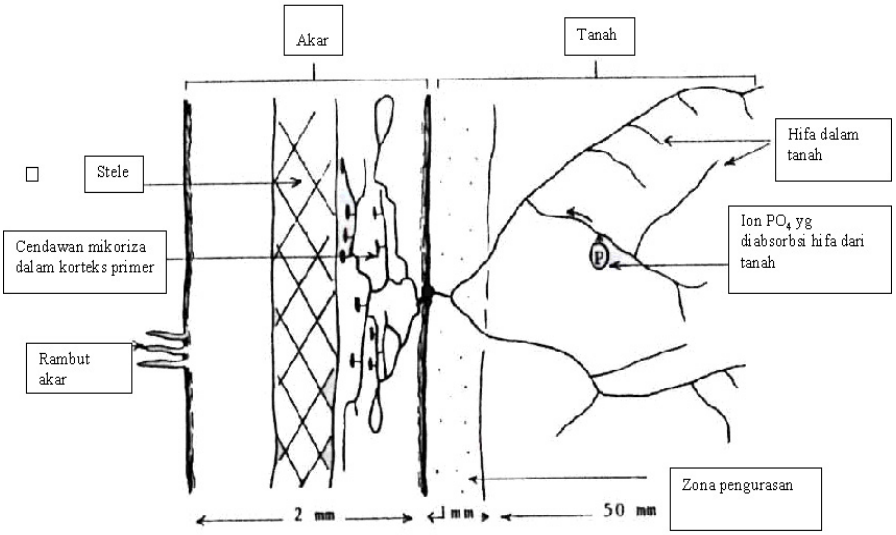
Filum	Ordo	Sub-ordo	Famili	Genus
Zygomycota	Glomeromycota	Glomineae	Glomaceae	Glomus
			Acaulosporaceae	Acaulospora
				Entrophospora
			Archaeosporaceae	*Archaeospora*
			Paraglomaceae	*Paraglomus*
		Gigasporineae	Gigasporaceae	*Gigaspora*
				Scutellospora

Mekanisme penyerapan fosfat

Beberapa hipotesis dikemukakan oleh Tinker (1975) tentang mekanisme penyerapan P, yaitu:

1. Kolonisasi mikoriza mengubah morfologi akar sedemikian rupa, misalnya dengan menginduksi hipertrofi akar, sehingga meng-akibatkan pembesaran sistem akar, dengan demikian luas permukaan akar untuk mengabsorpsi P menjadi lebih besar.
2. Mikoriza memiliki akses terhadap sumber P-anorganik yang relatif tidak dapat larut (seperti apatit misalnya), yang tidak dimiliki oleh akar yang tidak bermikoriza.
3. Kolonisasi mikoriza mengubah metabolisme tanaman inang sehingga absorpsi atau pemanfaatan P oleh akar terkolonisasi ditingkatkan, yaitu peningkatan daya absorpsi (absorbing power) individu-individu akar.
4. Hifa dalam tanah mengabsorpsi P dan mengangkutnya ke akar-akar yang dikolonisasi, dimana P ditransfer ke inang bermikoriza, sehingga berakibat meningkatnya volume tanah yang dapat dijangkau oleh sistem akar tanaman.
5. Daerah akar bermikoriza tetap aktif dalam mengabsorpsi hara untuk jangka waktu yang lebih lama dibandingkan dengan akar yang tidak bermikoriza.

Dari kelima hipotesis tersebut, hipotesis keempat dianggap yang paling penting dalam meningkatkan serapan P, berdasarkan bukti-bukti eksperimental yang ada. Cendawan MA memiliki struktur hifa yang menjalar keluar ke dalam tanah. Hifa meluas di dalam tanah, melampaui jauh jarak yang dapat dicapai oleh rambut akar. Ketika fosfat di sekitar rambut akar sudah terkuras, maka hifa membantu menyerap fosfat di tempat-tempat yang tidak dapat lagi dijangkau rambut akar seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema penyerapan P oleh akar bermikoriza
Sumber : Mosse (1986)

Rhodes dan Gerdemann (1980) membagi proses bagaimana hara dipasok ke tanaman oleh cendawan MA menjadi tiga fase:

1. absorbsi hara dari tanah oleh hifa eksternal;
2. translokasi hara dari hifa eksternal ke miselium internal dalam akar tanaman inang; dan
3. pelepasan hara dari miselium internal ke sel-sel akar.

P diangkut melalui hifa eksternal dalam bentuk polifosfat. Adanya granul polifosfat dalam vakuola hifa telah dibuktikan melalui elektron mikroskop (Cox *et al*., 1975).

Peran agronomis yang paling utama mikoriza yang diterima hingga saat ini adalah kemampuannya untuk meningkatkan serapan hara tanaman. Penyerapan P pada permukaan akar lebih cepat dari pergerakan fosfat ke permukaan akar, sehingga zona terkurasnya fosfat terjadi di sekitar akar. Hifa yang meluas dari permukaan akar membantu tanaman melintasi zona ini, sehingga dapat menyerap fosfat dari zona yang tidak dapat dicapai oleh akar yang tidak bermikoriza. Smith dan Gianinazzi-Pearson (1988) mencatat panjang hifa ini pada beberapa tanaman berkisar antara 0,71-14,20 m cm^{-1} akar (Tabel 3). Mekanisme penyerapan ini digambarkan secara skematis pada Gambar 3 di atas.

Tabel 3. Panjang hifa dalam tanah pada beberapa tanaman inang

Spesies CMA	Tanaman inang	Panjang hifa
:		m cm^{-1} akar
Pada akar terkolonisasi		
Glomus mosseae	Onion	0,79 – 2,5
G. mosseae	Onion	0,71
G. macrocarpum	Onion	0,71
G. microcarpum	Onion	0,71
Glomus sp. (E3)	Clover	1,29
,,	Rye grass	1,36
G. fasciculatum	Clover	2,50
G.tenue	Clover	14,20
Gigaspora calospora	Onion	0,71
G. calospora	Clover	12,30
Acaulospora laevis	Clover	10,55
Pada seluruh sistem akar :		
G. fasciculatum	Kedelai	1,2 – 2,7

Sumber: Smith dan Gianinazzi-Pearson (1988)

Penyebaran

Cendawan MA terdapat pada berbagai ekosistem. Penyebaran cendawan MA ini sangat luas di seluruh dunia, mulai dari arktik sampai daerah tropis (Gerdemann, 1968), dan tidak hanya pada habitat darat tetapi juga pada habitat air (Sondergaard and Laegaard, 1977). Laporan pertama tentang cendawan MA di Indonesia (juga yang pertama di daerah tropis) berasal dari Janse (1896). Berdasarkan hasil penelitiannya pada sejumlah tanaman di Kebun Raya Cibodas, terdapat kolonisasi mikoriza pada 69 spesies dari 75 yang diperiksanya. Spesies ini termasuk pada 56 famili dari Bryophyta, Pteridophyta, Gymnosperma, dan Angiosperma. Sieverding (1991) mengkompilasi data dari Brazil, Kolombia, dan Zaire tentang keanekaragaman cendawan MA (jumlah spesies cendawan MA) dan mendapatkan pada ekosistem alami 16-21 spesies, ekosistem pertanian dengan masukan rendah 10-15 spesies, dan ekosisem pertanian intensif dengan masukan tinggi 6-9 spesies. Data ini memberikan indikasi bahwa keanekaragaman spesies cendawan MA menurun dari ekosistem alami ke ekosistem pertanian dengan masukan tinggi. Di Indonesia (Jambi dan Lampung) pada ekosistem hutan didapatkan 7-10 spesies, ekosistem pertanian 8-11 spesies dan pada padang alang-alang 10-11 spesies (Simanungkalit *et al*., 1999). Pada penelitian yang

dilakukan oleh Kramadibrata *et al*. (1995) pada pertanaman kedelai di beberapa lokasi di Jawa Barat dan Lampung didapatkan 19 taksa cendawan MA. Ini menunjukkan bagaimana besarnya keanekaragaman cendawan MA pada pertanaman kedelai (Tabel 4).

Tabel 4. Keanekaragaman spesies cendawan MA pada pertanaman kedelai Lampung Tengah, Garut, dan Bogor

Nama jenis cendawan MA	Lampung Tengah				Garut		Bogor			
	L1	**L2**	**L5**	**L6**	**G1**	**G2**	**B1**	**B2**	**B3**	**B4**
Acaulospora delicata	**-**	**-**	**+**	**-**	**-**	**-**	**-**	**+**	**+**	**+**
A.foveata	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**+**	**-**	**-**	**-**	**-**
A. rehmii	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**-**	**+**	**-**	**-**	**-**
A. scrobiculata	-	+	+	+	-	-	+	-	+	-
A. tuberculata	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+
Gigaspora cf. *gigantea*	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Gigaspora sp. 1	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-
Glomus clavisporum	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Glomus cf. *fasciculatum*	+	-	-	-	-	-	+	+	+	+
Glomus cf. *microagregatum*	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glomus sp.1	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Glomus sp.2	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-
Glomus sp.3	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
Glomus sp.4	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-
Scutellospora cf. *heterogama*	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Scutellospora cf. *pellucida*	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-
Scutellospora sp.1	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Scutellospora sp.2	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-
Scutellospora sp.3	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Jumlah spesies cendawan MA	**6**	**6**	**4**	**3**	**2**	**2**	**5**	**5**	**3**	**3**

Sumber: Kramadibrata *et al.* (1995)

Empat dari enam genera Glomales ditemukan pada 10 lokasi penelitian. Tentu keanekaragaman ini dapat lebih besar lagi kalau kita sadari bagaimana luasnya pertanaman kedelai di Indonesia dan bervariasinya faktor-faktor lingkungan (tanah dan iklim), teknik budi daya dan pola tanam yang digunakan dimana kedelai tersebut tumbuh.

Teknologi produksi inokulan

Cara yang paling umum dipakai untuk memperbanyak inokulan cendawan MA adalah dengan kultur pot dimana cendawan MA tertentu yang telah diketahui keefektifannya diinokulasikan pada tanaman inang tertentu

pada medium padat yang steril. Metode ini pertama kali dikembangkan oleh Mosse (1953) yang menginokulasi inokulan murni salah satu spesies *Endogone* (sekarang namanya *Glomus mosseae*) pada akar tanaman arbei yang tumbuh pada tanah steril di kamar kaca. Setelah lebih dari 50 tahun metode ini masih tetap banyak digunakan untuk memproduksi inokulan cendawan MA.

Berbagai macam bahan padat seperti tanah, pasir, zeolit, *expanded clay*, dan gambut banyak digunakan sebagai medium pertumbuhan/bahan pembawa. Simanungkalit dan Riyanti (1994) memperbanyak *Glomus fasciculatum* pada medium campuran pasir kuarsa dan arang sekam steril (dengan perbandingan volume 3:1) dengan jagung sebagai tanaman inang yang diberi larutan hara. Dehne dan Backhaus (1986) menggunakan agregat liat (expanded clay) sebagai bahan pembawa dalam produksi inokulan cendawan MA. Bahan agregat liat ini memiliki kelebihan antara lain: (1) bahannya ringan (420 kg m^{-3}) sehingga tidak ada masalah dalam transportasi dan distribusi; (2) daya tahan cendawan MA dalam bahan ini tinggi; dan (3) bahan ini merupakan bahan anorganik sehingga masalah mikroorganisme patogen sedikit.

Inokulan spora

Produksi inokulan tentu tidak bermasalah seandainya cendawan MA dapat ditumbuhkan pada kultur murni seperti bakteri rhizobia. Bila spora yang akan digunakan sebagai inokulan maka produksi dapat dilakukan dalam kultur pot dengan menggunakan berbagai tanaman inang pada medium tanah steril. Berbagai tanaman yang dapat dipakai sebagai tanaman misalnya jagung, rumput bahia (*Paspalum notatum*), rumput guinea (*Panicum maximum*), kirinyu (*Chromolaena odorata*), sorghum (*Sorghum bicolor*), siratro (*Macroptilium purpureum*), dan sebagainya. Setelah tanaman mencapai umur tertentu spora dipisahkan dengan menggunakan teknik saringan basah dan dekantasi. Tapi prosedur ini sangat makan waktu dan tenaga, sehingga tidak praktis bila tujuannya menyediakan inokulan spora untuk skala komersial. Selain itu juga kemungkinan terjadinya kontaminasi oleh jenis cendawan MA lain dan mikroorganisme-mikrorganisme lain yang tidak diinginkan.

Spora yang akan digunakan harus betul-betul spora murni dari suatu spesies tertentu. Ini hanya mungkin diperoleh bila betul-betul berasal dari suatu spora tunggal. Metode untuk memperbanyak inokulan dari spora tunggal telah dikembangkan dengan menggunakan satu spora untuk menginokulasi tanaman inang jagung pada media tanah steril. Penggunaan lebih dari satu spora untuk menginokulasi tanaman inang mungkin menghasilkan spora dari spesies cendawan MA yang berbeda, karena dua spora yang kelihatannya sama belum tentu memiliki sifat genetis yang sama.

Berbagai bentuk dan takaran inokulan cendawan MA telah digunakan pada berbagai tanaman seperti diperlihatkan pada Tabel 5. Bila spora yang dipakai sebagai inokulan, kebutuhan inokulan dapat dihitung seperti pada contoh berikut. Nopamornbodi *et al*. (1987) menempatkan 200 spora di bawah setiap biji kedelai atau kacang hijau yang ditanam di lapangan. Kalau saja jumlah 200 spora yang diberikan ke tiap lubang tanah digunakan untuk memperhitungkan kebutuhan inokulan spora per ha tanaman kedelai dengan jarak tanam 40 cm x 10 cm, maka dibutuhkan 5 x 10^7 spora. Selanjutnya kalau pada kultur pot jagung diperoleh 649 spora $(50\ g)^{-1}$ medium tanah (Djasmara and Simanungkalit, 1999), maka diperlukan kira-kira 3,85 t tanah untuk disaring. Dengan bobot medium 10 kg pot^{-1}, maka diperlukan kira-kira 385 pot. Ini merupakan jumlah yang tidak sedikit. Produksi inokulan ini tidak efisien. Tentu saja banyaknya spora yang diproduksi per satuan bobot tanah menentukan banyaknya tanah yang harus disaring. Kalau jumlah spora per satuan bobot dapat ditingkatkan jumlahnya, maka jumlah pot kultur yang diperlukan akan berkurang.

Tabel 5. Bentuk dan takaran inokulan pada berbagai tanaman

Tanaman	Bentuk inokulan	Takaran	Keterangan	Sumber
Padi gogo	Spora	50 pot^{-1}	-	Sanni (1976)
	Inokulan tanah	40 g pot^{-1}	2 kg tanah pot	Simanungkalit (1987)
Bawang	Spora	50 pot^{-1}	Kultur pasir	Daft & Nicolson (1972)
	Akar terinfeksi	10 g pot^{-1}	4,2 lbs tanah pot^{-1}	Murdoch *et al*. (1967)
	Inokulan tanah (64 spora g^{-1})	50 g pot^{-1}	4,4 kg pasir pot^{-1}	Hetrick *et al.* (1984)
Kedelai	Inokulan tanah	100 g pot^{-1}	10 kg tanah pot^{-1}	Simanungkalit (1993)
Ubi kayu	Spora dan miselia	1 g pot^{-1}	1 kg tanah pot^{-1}	Kang *et al*. (1980)
	Akar terinfeksi	2 g $stek^{-1}$	Percobaan lapang	Howeler and Sieverding (1983)
Sorghum	Inokulan tanah	25 g pot^{-1} (42 spora g^{-1})	11 kg tanah pot^{-1}	Raju *et al.* (1990)
Tomat	Spora	50 pot^{-1}	Kultur pasir	Daft & Nicolson (1972)
Kentang	Spora	5000 pot^{-1}	750 cm^3 pot^{-1}	Furlan & Bernier-Cardou (1989)
	Pelet tanah	1 pellet pot^{-1}	450 g (pasir + lempung)	Hall (1979)
	Pot ball	100g pot^{-1}	10 kg tanah pot^{-1}	Mamo & Kilham (1987)
Clover	Spora	200 pot^{-1}	1 l (vermikulit + tanah)	Miller *et al*. (1985)
	Inokulan tanah	50 g pot^{-1}	Pot tanah liat ukuran 15 cm	Menge *et al.* (1978)
	Inokulan cair	-	-	Nemec (1983)

Inokulan akar bermikoriza

Penyediaan inokulan dalam bentuk akar masih lebih praktis daripada inokulan spora. Yang diperlukan adalah tanaman inang yang sangat responsif terhadap cendawan MA terpilih dan memiliki sistem akar dengan massa besar. Akar tanaman inang dipanen setelah dicek terlebih dahulu apakah memiliki presentase kolonisasi mikoriza dan intensitas infeksi yang tinggi. Bila jagung yang dipakai sebagai tanaman inang, panen akar biasanya dilakukan 7-8 minggu setelah tanam.

Akar bermikoriza pada waktu panen dipisahkan dari medium tumbuh, lalu dicuci dan disteril permukaan dan kemudian dipotong-potong halus (1-2 mm). Segmen-segmen akar inilah selanjutnya yang diinokulasikan pada lubang tanaman. Bila akar yang dipakai sebagai inokulan untuk menginokulasi tiap lubang pertanaman kedelai dengan jarak tanam 40 cm x 10 cm, misalnya 1 g akar segar/lubang tanaman, maka diperlukan 250 kg akar. Bila satu kultur pot dengan bobot tanah 8 kg menghasilkan 20 g akar segar, maka diperlukan 12.500 pot kultur. Produksi inokulan akar dengan kultur pot ini ini juga sangat tidak efisien.

Inokulan campuran

Apa yang dimaksud dengan inokulan campuran dalam makalah ini adalah inokulan yang mengandung kombinasi spora, hifa, dan akar bermikoriza. Pembuatan inokulan campuran dapat dilakukan dengan kultur pot yang berisi tanah atau substrat lain yang steril. Sterilisasi dapat dilakukan dengan oven, autoklaf, fumigan, dan iradiasi sinar gamma. Tanah steril ini selanjutnya diinokulasi dengan cendawan MA unggul dan ditanami dengan tanaman inang yang sesuai. Pada waktu panen, akar dipisahkan dan diproses seperti pada pembuatan inokulan akar. Segmen-segmen akar ini selanjutnya dicampur rata kembali dengan medium tumbuhnya. Inokulan campuran ini pada akhirnya mengandung propagul yang meliputi spora, akar terkolonisasi, dan hifa.

Dalam hal inokulan campuran dengan tanah sebagai bahan pembawa misalnya untuk kedelai di lapangan dengan 250.000 lubang ha^{-1} (jarak tanam 40 cm x 10 cm), maka kalau tiap lubang diberi 20 g, dibutuhkan 5 t inokulan tanah. Tingginya bobot inokulan tanah sebenarnya adalah karena bahan pembawanya, sedangkan berat propagul dalam tanah tersebut tidak seberapa.

Metode perbanyakan inokulan dengan kultur pot sering menghadapi masalah adanya kontaminasi dari mikroba lain sehingga menurunkan mutu dari inokulan tersebut. Untuk mengatasi masalah ini sistem kultur hidroponik dan aeroponik telah dikembangkan. Sistem kultur hidroponik menggunakan teknik film hara (nutrient film technique) yang

diadaptasi dari Mosse dan Thompson (1984). Pada sistem ini akar tanaman tumbuh pada lapisan tipis larutan hara yang mengalir cepat. Aerasi pada sistem dipertahankan melalui kecepatan aliran hara dan kedalaman larutan hara pada bak tanaman. Sistem kultur aeroponik pada dasarnya merupakan sistem menumbuhkan tanaman dimana akar dibasahi dengan kabut hara dengan teknik yang diadaptasi dari Zobel *et al*. (1976). Sistem ini kemudian dikembangkan untuk memproduksi inokulan cendawan MA (Sylvia and Hubbell, 1986; Huang and Sylvia, 1988). Penggunaan kedua sistem kultur ini untuk memproduksi inokulan dalam skala besar sangat rumit.

Upaya lain untuk mendapatkan teknologi produksi inokulan yang bebas kontaminasi dan mungkin lebih efisien adalah menggunakan teknik-teknik bioteknologi seperti kultur jaringan dan transformasi tanaman. Rhodes (1983) mengemukakan ada tiga alasan untuk menggunakan teknik kultur gnotobiotik, yaitu: (1) perbaikan dalam standardisasi dan kemurnian inokulan yang dipakai dalam penelitian mikoriza; (2) menghilangkan hiperparasit; dan (3) potensi perbaikan keefektifan simbiosis cendawan MA melalui manipulasi genetika isolat-isolat pilihan. Kultur akar transformasi merupakan metode yang paling efisien untuk menumbuhkan akar yang terkolonisasi karena tidak memerlukan zat pengatur tumbuh tanaman untuk pertumbuhan yang berkelanjutan (Jarstfer and Sylvia, 1993). Mugnier dan Mosse (1987) memperoleh infeksi cendawan MA dengan spora pada akar wortel yang ditransformasi oleh plasmid T-DNA bakteri *Agrobacterium rhizogenes*. Dengan teknik ini nantinya diharapkan produksi inokulan dapat dilakukan secara kultur aksenik dalam fermentor. Tetapi penggunaan teknik maju ini masih dalam tahap-tahap penelitian.

Perbanyakan cendawan MA pada tingkat petani

Cendawan MA adalah simbion obligat, yang harus hidup secara simbiosis dengan tanaman, sehingga tidak dapat diperbanyak secara aksenik di fermentor seperti halnya jenis mikroba pupuk hayati lainnya. Perbanyakan dalam skala besar, sangat makan waktu, dan tidak efisien. Teknologi ini dapat diteruskan kepada petani dengan cara produksi *in situ* (di lahan petani sendiri) dengan cara seperti yang dilakukan di Kolumbia (Sieverding, 1991). Petani memperbanyak sendiri inokulan pada luasan tanah tertentu sebelum waktu tanam. Penyuluh pertanian dapat membimbing mereka dan instistusi tertentu menyediakan starter inokulan yang akan diperbanyak petani.

Ketergantungan terhadap cendawan MA

Berbagai tanaman berbeda ketergantungannya terhadap cendawan MA. Ketergantungan tanaman terhadap mikoriza diartikan sebagai tingkatan ketergantungan terhadap kondisi mikoriza untuk menghasilkan pertumbuhan atau hasil pada suatu taraf kesuburan tanah tertentu (Gerdemann, 1975). Pada umumnya hubungan simbiosis antara tanaman dan cendawan MA dapat dikatakan tidak spesifik tapi memiliki spektrum yang luas. Artinya suatu spesies cendawan MA tertentu dapat mengkolonisasi dan efektif terhadap lebih dari satu jenis tanaman tertentu. Sebagai contoh 10 spesies cendawan MA dapat mengkolonisasi dan efektif pada jagung dan kedelai (Simanungkalit, 1997). Jagung varietas Arjuna dan hibrida C-1 dapat ditingkatkan pertumbuhannya oleh tiga spesies cendawan MA yang berbeda (Lukiwati dan Simanungkalit, 1999)

Tanaman dengan akar besar lebih tergantung pada mikoriza dari-pada tanaman dengan sistem akar yang memiliki rambut akar banyak dan panjang (Baylis, 1975). Ketergantungan mikoriza relatif dapat berbeda antara spesies tanaman atau bahkan antara varietas (kultivar) dalam satu spesies (Azcon and Ocampo, 1981). Tanaman-tanaman sangat berbeda kebutuhan dan respon terhadap fosfat dan ketergantungannya terhadap mikoriza (Mosse, 1986) Perbedaan ketergantungan antara berbagai jenis tanaman dapat digolongkan menjadi besar, medium, dan kecil (Tabel 6). Menurut daftar ini tanaman-tanaman yang ketergantungannya besar terhadap mikoriza memang memiliki akar yang besar dan atau memiliki rambut akar yang terbatas seperti ubi kayu dan jeruk misalnya.

Tabel 6. Ketergantungan beberapa tanaman terhadap mikoriza

Ketergantungan		
Besar	Medium	Kecil
Ubi kayu		
Jeruk (Citrus)		
Bawang merah	Kedelai	Gandum
Bawang perai	Jagung	*Barley*
Kacang tunggak	Sorgum	Kentang
Asparagus	Paspalum	Padi
Stylosanthes guyanensis		
Pinus spp. (ektomikoriza)		

Sumber: Mosse (1986)

Cendawan MA dapat bersimbiosis dengan tanaman pangan, tanaman hortikultura, tanaman perkebunan, dan tanaman industri. Tabel 7 memperlihatkan contoh berbagai tanaman pangan, tanaman hortikultura, dan tanaman perkebunan yang membentuk simbiosis dengan cendawan MA.

Tabel 7. Daftar berbagai tanaman pertanian bermikoriza

Spesies	Referensi
Tanaman pangan:	
Arachis hypogaea	Daft dan El-Giahmi (1975)
Glycine max.	Jones (1924)
Manihot utilissima	Johnston (1948)
Oryza sativa	Sanni (1976); Simanungkalit (1981)
Zea mays	Johnston (1948)
Tanaman hortikultura:	
Ananas comosus (nanas)	Guillemin dan Gianinazzi (1992)
Artocarpus integra (jagung)	Smith *et al*. (1997)
Capsicum annum (Cabai)	Johnston (1948)
Carica papaya (pepaya)	Johnston (1948)
Citrus aurantifolia	Johnston (1948)
C. paradisi	Johnston (1948)
C. sinensis	Johnston (1948)
Durio zibethinus (durian)	Smith *et al*. (1997)
Garcinia mangostana (manggis)	Silviana *et al*. (1997)
Lansium domesticum	Smith *et al.* (1997)
Litchi chinensis	Pandey dan Misra (1971)
Lycopersicum esculantum (tomat*)*	Daft dan Nicolson (1969)
Musa sp. (pisang)	Johnston (1948)
Nephelium lappaceum (rambutan)	Smith *et al*. (1997)
Pyrus malus	Mosse (1957)
Virfina unguiculata	Johnston (1948)
Vitis vignifera	Possingham dan Obbink (1971)
Tanaman perkebunan:	
Thea sinensis (teh)	Webster (1953)
Cocos nucifera (kelapa)	Lily (1978**)**
Elaeis guineensis (kelapa sawit)	Nadarajah (1980)
Theobroma cacao (coklat)	Laycock (1945)
Hevea brasiliensis (karet)	Wastie (1965)
Saccharum officinarum (tebu)	Ciferri (1928)

Peranan potensial cendawan MA

Peningkatan pertumbuhan, serapan hara, dan hasil tanaman

Kolonisasi akar kedelai oleh cendawan MA dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil kedelai (Ross and Harper, 1970; Ross, 1971; Mosse *et al*., 1976; Carling and Brown, 1980; Ganry *et al*., 1985) dan konsentrasi P tanaman kedelai (Ross and Harper, 1970; Ross, 1971; Bethlenfalvey *et al*., 1985). Selain itu juga dapat meningkatkan nodulasi dan fiksasi N (Carling *et al*., 1978; Carling and Brown, 1980; Ganry *et al*., 1985).

Perbaikan serapan hara karena simbiosis dengan cendawan MA tidak hanya terbatas pada fosfat, tetapi juga pada berbagai unsur lain. Pacovsky (1986) membandingkan serapan hara mikro tanaman mikoriza yang diinokulasi dengan *Glomus mosseae* dan *Glomus fasciculatum* dengan tanaman kontrol yang diberi pupuk P yang tinggi. Hasilnya adalah bahwa tanaman mikoriza mempunyai konsentrasi Cu dan Zn yang lebih tinggi tapi Fe dan Mn yang lebih rendah daripada tanaman kontrol. Perbaikan serapan Zn dilaporkan pada *maple* (Daft and Hacskaylo, 1977), kentang (Swaminathan dan Verma, 1979), dan pada Calliandra (Simanungkalit dan Lukiwati, 2001). Kahat Zn pada bibit *peach* dapat diatasi melalui inokulasi mikoriza (Gilmore, 1971; La Rue *et al.*, 1975).Tanaman kedelai bermikoriza mempunyai konsentrasi Si yang lebih tinggi daripada tanaman kontrol (Yost and Fox, 1982). Kahat Zn pada bibit peach dapat diatasi melalui inokulasi mikoriza (Gilmore, 1971; La Rue *et al.*, 1975).

Heckman dan Angle (1987) mendapatkan adanya perbedaan varietas dalam kolonisasi cendawan MA pada 15 varietas kedelai yang diuji. Simanungkalit dan Riyanti (1997) mendapatkan bahwa varietas kedelai berbeda tanggapan terhadap inokulasi cendawan MA. Dari 10 varietas yang diuji, enam varietas menunjukkan respon yang nyata terhadap inokulasi cendawan MA. Ada pengaruh sinergistik dari hasil interaksi antara inokulan cendawan MA dengan Rhizobium terhadap pertumbuhan tanaman kedelai (Azimi *et al*., 1980).

Inokulasi jagung dengan cendawan MA memberikan pengaruh yang positif terhadap pertumbuhan jagung (Gerdemann, 1964; Murdoch *et al*., 1967; Jackson *et al*., 1972). Murdoch *et al*. (1967) mendapatkan tanaman bermikoriza tumbuh sama baik bila fosfat mudah larut yang dipakai tapi bila pupuk fosfat sukar larut yang dipakai tanaman bermikoriza tumbuh lebih baik dan mempunyai kandungan P yang lebih tinggi daripada tanaman tak bermikoriza.

Dengan menggunakan inokulan akar bermikoriza yang digiling dan diliofilisasi, Jackson *et al*. (1972) memperoleh kenaikan hasil jagung 50% lebih tinggi dari ada tanaman yang hanya dikolonisasi oleh cendawan MA asli, tapi tidak ada perbedaan yang nyata pada konsentrasi P di antara

perlakuan. Hall (1979) melihat adanya perbedaan tanggapan beberapa varietas jagung terhadap inokulasi dengan cendawan MA. Tetapi Simanungkalit (1989) tidak mendapatkan adanya perbedaan tanggapan lima varietas jagung yang diuji terhadap inokulasi cendawan MA. Barea *et al*. (1975) mendapatkan adanya pengaruh sinergistik melalui cendawan MA dengan bakteri pelarut fosfat terhadap pertumbuhan jagung pada tanah yang kandungan P-nya rendah. Gerdemann (1964) menemukan konsentrasi P lebih tinggi pada tanaman bermikoriza daripada yang tidak, sebaliknya konsentrasi K, Mg, Bo, dan Mn lebih rendah pada tanaman bermikoriza. Serapan Zn pada tanaman jagung dan gandum yang tumbuh pada tanah kahat Zn dapat ditingkatkan melalui inokulasi cendawan MA, *Glomus macrocarpum* (Swaminathan and Verma, 1979).

Daft dan El-Giahmi (1975) dalam percobaan mereka dengan tiga jenis kacang-kacangan mendapatkan adanya kenaikan bobot kering tanaman kacang tanah karena inokulasi cendawan MA. Empat varietas kacang tanah yang diuji pada tanah Latosol Bogor memberikan respon yang berbeda terhadap inokulasi cendawan MA (Simanungkalit *et al*., 1992). Varietas Pelanduk memberikan respon yang paling besar dengan kenaikan bobot kering biji sebesar 26%. Krishna dan Bagyaraj (1984) menemukan adanya pengaruh sinergistik dari interaksi antara cendawan MA dengan Rhizobium terhadap pertumbuhan kacang tanah.

Pengaruh positif inokulasi cendawan MA terhadap pertumbuhan dan hasil padi gogo telah dilaporkan (Sanni, 1976; Simanungkalit, 1987). Sanni (1976) menggunakan *Gigaspora gigantea* untuk menginokulasi padi gogo varietas OS6 pada tanah dengan pH 7,2 dan P-tersedia 15,5 ppm. Inokulasi meningkatkan bobot gabah dan serapan hara P. Simanungkalit (1987) mendapatkan kenaikan bobot kering (BK) gabah, BK jerami, jumlah malai, konsentrasi P gabah dan jerami padi varietas UPLRi-7 yang ditanam pada tanah dengan pH 5,0 dan P-tersedia (Olsen) 1,8 ppm karena inokulasi dengan *Glomus fasciculatum* dan *Glomus* sp. (Tabel 8). Hasil inokulasi padi gogo dengan cendawan MA pada tanah masam Podsolik Merah Kuning (Ultisols) Jasinga (pH 4,2; P-tersedia 2,2 ppm; Al-dd 15,7 me 100 g tanah^{-1}) menunjukkan adanya pengaruh interaksi pemberian kapur, pupuk P dan inokulasi cendawan MA terhadap hasil, jumlah malai, jumlah gabah/malai dan kadar P tanaman (Burbey dan Simanungkalit, 1991).

Khan (1975) dalam percobaan inokulasi MA pada tanah tidak steril memperoleh kenaikan hasil tertinggi yang besar (221%) tanpa pemberian pupuk, sedangkan dengan pemberian pupuk P hasil ini kenaikan sangat kecil (9%). Kecilnya kenaikan hasil ini mungkin berhubungan dengan penurunan kolonisasi cendawan MA sebagai akibat dari pemberian pupuk TSP (280 kg TSP ha^{-1}). Azcon dan Ocampo (1981) mengemukakan adanya perbedaan tanggap berbagai varietas terigu terhadap inokulasi cendawan MA.

Tabel 8. Pengaruh inokulasi cendawan MA, sumber pupuk P, dan sterilisasi tanah terhadap hasil dan konsentrasi P padi gogo UPLRi-7 pada tanah Lusiana

	Inokulasi *			Sumber Pupuk P *		Sterilisasi *	
	Kontrol	M_1 **	M_2 **	TSP **	CIRP **	Tidak steril	Steril
BK gabah, g pot^{-1}	7,91 b	8,98a	9,26a	8,09 b	9,34a	10,17a	7,27 b
BK jerami, g pot^{1}	11,12 b	12,44a	11,92ab	11,38 b	12,27a	13,95a	9,70 b
Jumlah malai pot^{-1}	4,3 b	6,2a	5,8a	5,1 b	5,8a	6,3a	4,5 b
Bobot 100 butir , g	2,31a	2,34a	2,35a	2,30a	2,36a	2,40a	2,26 b
% gabah hampa	13,63a	9,90ab	9,11 b	11,11a	10,65a	8,22 b	13,54a
Tinggi tanaman,cm	109,6a	102,9 b	106,5a	105,2a	107,5a	103,9 b	108,8a
Konsentrasi P, %							
Gabah	0,137 b	0,169a	0,156a	0,147a	0,161a	0,134 b	0,174a
Jerami	0,069 b	0,081a	0,078a	0,073 b	0,080a	0,052 b	0,101a

* Angka yang diikuti oleh huruf yang sama pada satu baris dalam satu perlakuan tidak berbeda nyata pada taraf 5% menurut uji jarak Duncan

** M_1 = inokulasi dengan *Glomus fasciculatum* ; M_2 = inokulasi dengan *Glomus* sp.

TSP = pupuk tripel superfosfat ; CIRP = pupuk fosfat alam P. Christmas

Sumber : Simanungkalit (1987)

Tanaman ubi kayu sangat tergantung pada hubungan mikoriza untuk memenuhi kebutuhan P-nya pada tanah-tanah yang rendah P-nya (Yost and Fox, 1979; Zaag *et al*., 1979; Howeler *et al*., 1982). Kang *et al.* (1980) dalam salah satu percobaannya di Nigeria mendapatkan kenaikan bobot tanaman ubi kayu >900% karena inokulasi dengan *Glomus mosseae*. Howeler dan Sieverding (1983) dalam percobaan lapangan pada tanah masam dengan populasi cendawan MA asli yang rendah di Kolombia mendapatkan kenaikan hasil karena inokulasi dengan *Glomus manihitis* sedangkan pada tanah masam lain dengan populasi cendawan MA yang tinggi dan efektif, inokulasi tidak menaikkan hasil ubi kayu.

Simanungkalit dan Lukiwati (2001) yang menginokulasi *Calliandra calothyrsus* dengan cendawan MA, mendapatkan kenaikan bobot kering tajuk, tinggi tanaman, serapan N, P, S, dan Zn yang sangat nyata seperti diperlihatkan pada Tabel 9. Inokulasi ini menaikkan nilai nutrisi dari tanaman *Calliandra,* yang banyak dipakai sebagai pakan ternak. Penampilan tanaman ini diperlihatkan pada Gambar 4.

Inokulasi cendawan MA dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk P pada tanaman kedelai (Simanungkalit, 1993). Efisiensi hasil, jumlah polong dan serapan P tertinggi pada tanaman kedelai dicapai pada tanpa pemberian pupuk P. Hasil jumlah polong dan serapan P kedelai menurun dengan meningkatnya jumlah pupuk P yang diberikan. Respon tanaman terhadap pemberian berbagai takaran pupuk, baik pada tanaman yang diinokulasi maupun yang tidak, sama-sama mengikuti hukum kenaikan hasil yang menurun dari *Mitscherlich.* Hasil penelitian ini juga mengindikasikan bahwa kombinasi pemberian pupuk kimia dan pupuk hayati diperlukan untuk mencapai tingkat hasil yang tinggi.

Tabel 9. Pengaruh inokulasi mikoriza terhadap bobot tajuk, tinggi tanaman, serapan hara N, P, S, dan Zn *Calliandra calothyrsus*

Variabel	Kontrol	Inokulasi Cendawan MA	% kenaikan terhadap kontrol
Bobot kering tajuk(g/tan)	2,284	4,239**	86%
Tinggi tanaman (cm)	25,44	34,05**	34%
Serapan N (mg/tan)	15,918	159,616**	902%
Serapan P (mg/tan)	O,109	1,250**	1047%
Serapan S (mg/tan)	0,647	7,228**	1017%
Serapan Zn	0,015	0,179*	1093%

** = berbeda sangat nyata

Sumber: Simanungkalit dan Lukiwati (2001)

M_0 P_0 = tanpa mikoriza, tanpa P M_0 P_1 = tanpa mikoriza, CIRP
M_1P_0 = mikoriza, tanpa P M_1P_1 = mikoriza, CIRP
M_0P_2 = tanpa mikoriza, TSP M_1P_2 = mikoriza, TSP

Gambar 4. Pertumbuhan *Calliandra* karena pengaruh inokulasi mikoriza *inoculation and phosphate forms*

Foto: R.D.M. Simanungkalit

Mikoriza sebagai pengendali hayati

Menurut Linderman (1996) pengendalian hayati berbagai penyakit oleh mikoriza dapat dipengaruhi oleh satu atau lebih mekanisme-mekanisme berikut: (1) perbaikan gizi tanaman; terjadinya peningkatan serapan hara (terutama P dan unsur mineral lain) menghasilkan tanaman yang lebih baik sehingga dapat melawan atau bersifat toleran terhadap penyakit; (2) kompetisi

hara dan tempat infeksi pada tanaman inang; Dehne (1982) menunjukkan bahwa patogen cendawan akar dapat menempati sel-sel korteks akar yang berdekatan dengan yang dikolonisasi cendawan MA, jadi tidak ada kompetisi; (3) perubahan morfologi dan jaringan akar; misalnya Dehne dan Schonbeck (1979) menunjukkan adanya peningkatan lignifikasi pada sel-sel endodermis tomat dan ketimun tanaman bermikoriza, dan berspekulasi bahwa respons semacam itu merupakan penyebab berkurangnya penyakit layu *Fusarium*; (4) perubahan susunan kimia jaringan tanaman; perubahan fisiologis dapat juga terlibat pada pengaruh lokal terhadap patogen akar. Dehne *et al*. (1978) menunjukkan terjadinya peningkatan konsentrasi kitinase anti cendawan pada akar bermikoriza dan mengusulkan bahwa peningkatan akumulasi arginin pada akar bermikoriza menekan sporulasi *Thielaviopsis*; (5) reduksi stres abiotis; stres lingkungan mempengaruhi terjadi dan beratnya penyakit tanaman biotis. Mikoriza arbuskuler meningkatkan toleransi terhadap stres seperti itu dengan berbagai mekanisme. Mikoriza arbuskuler dapat secara biologis mengurangi penyakit berdasarkan kemampuannya untuk mengurangi pengaruh faktor stres seperti stres hara, (kahat atau kelebihan), kekeringan dan keracunan tanah; dan (6) perubahan mikroba dalam mikorizosfir; mikoriza sangat berpengaruh terhadap terhadap mikroflora rizosfir dengan jalan mengubah fisiologi dan. eksudasi akar. Meyer dan Linderman (1986) menggunakan media selektif untuk menunjukkan perbedaan populasi kelompok taksonomi dan fungsional bakteri dalam rizosfir dan rizosplan tanaman bermikoriza dan tidak bermikoriza. Linderman (1996) menyebutkan empat faktor yang dapat mempengaruhi pengelolaan MA dalam pengendalian hayati: 1**. Waktu dan luasnya pembentukan MA**. Umumnya MA dapat menekan penyakit akar, kalau MA sudah terbentuk dan berfungsi sebelum invasi patogen; 2. **Taraf inokulum patogen**. Potensi pengendalian hayati berhubungan langsung dengan potensi inokulum patogen; 3. **Keragaman cendawan MA, genotipe inang, dan komposisi kimia dan mikroba tanah**. Interaksi yang berbeda terjadi di antara cendawan MA, tanaman inang, dan patogen tanaman yang berbeda; dan 4. **Strategi pengelolaan MA**. Praktek pertanian yang menurunkan populasi cendawan MA dan antagonis yang bersangkutan harus dihindarkan.

Pada umumnya tanaman bermikoriza mengalami kerusakan lebih sedikit daripada tanaman tidak bermikoriza dan serangan penyakit berkurang atau perkembangan patogen dihambat (Dehne, 1982). Perbedaan pengaruh cendawan MA terhadap serangan dan perkembangan penyakit dapat dipengaruhi oleh berbagai faktor yaitu cendawan MA dan kondisi lingkungan. Tidak semua laporan mengindikasikan bahwa mikoriza menekan penyakit seperti terlihat pada Tabel 10.

Tabel 10. Penekanan dan peningkatan serangan penyakit karena cendawan MA pada berbagai tanaman

Tanaman inang	Patogen	Penekanan (-) peningkatan (+)	Sumber
Kedelai	*Phytophthora megasperma*	+	Ross (1972)
	P. megasperma	-	Chou dan Schmithenner (1974)
	Meloidogyne incognita	-	Schenck *et al*. (1975)
Kacang hijau	*Binucleate Rhizoctonia* sp.	+	Kasiamdari *et al.* (2000)
	Rhizoctonia solani	+	
Ketimun	*Fusarium oxysporum*	-	Schönbeck (1980)
	Meloidogvne incorgnita	-	Schönbeck (1980)
	Erysiphe chichoracearum	+	Schönbeck (1980)
Tomat	*Fusarium oxysporum*	-	Schönbeck (1980)
	Meloidogyne incognita	-	Schönbeck (1980)
	Meloidogyne spp.	+	Hersanti dan Apanti (2000)
	TMV	+	Schönbeck (1980)
Wortel	*Meloidogyne hapla*	-	Schönbeck (1980)
	Pratylenchus penetans	-	Schönbeck (1980)
Alpukat	*Phytophthora chinnamomi*	+	Davis dan Menge (1978)
Jeruk	*Phytophthora parasitica*	+	Davis dan Menge (1978)
	Phytophthora parasitica	-	Davis dan Menge (1978)
	Radopholus similis	-	O'Bannon dan Nemec (1979)

.

Mikoriza sebagai sebagai pembenah tanah

Mikoriza berpengaruh terhadap agregasi tanah (Tisdall and Oades, 1979). Terutama ini dipengaruhi oleh persentase agregat tanah dengan ukuran >2 mm, yang lebih tinggi pada tanaman yang diinokulasi mikoriza daripada yang tidak diinokulasi (Tabel 11). Adanya miselium cendawan MA yang dilapisi oleh zat berlendir menyebabkan partikel-partikel tanah melekat satu sama lain. Wright dan Upadhyaya (1996) menyebutkan zat yang berlendir ini sebagai glomalin. Glomalin ini merupakan glikoprotein yang mengikat partikel-partikel tanah, dikeluarkan oleh cendawan MA melalui hifa. Banyak tanaman pertanian yang ditanam pada lahan-lahan yang mudah tererosi, karena terletak pada tingkat kemiringan yang tinggi. Dengan kemampuan seperti disebutkan di atas simbiosis tanaman dengan cendawan MA dapat meningkatkan stabilitas tanah.

Tabel 11. Pengaruh inokulasi cendawan MA terhadap agregasi tanah

Perlakuan tanah	Panjang hifa	% agregat stabil >2 mm	BK tajuk
	m g soil^{-1}		g
Fumigasi	5,9	10,2	17,8
Fumigasi dan diinokulasi	13,7	15,9	17,8
Tanpa fumigasi	11,3	13,5	18,1

Sumber: Tisdall dan Oades (1979)

Mikoriza sebagai pereduksi stres abiotis

Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa MA dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan (Kothari *et al*., 1990; Sylvia *et al*., 1993; Subramanian *et al*., 1995). Perbaikan toleransi tanaman bermikoriza terhadap stres air dapat disebabkan oleh peningkatan konduktivitas hidraulik, laju transpirasi yang lebih kecil per satuan luas, adanya ekstraksi air dari tanah ke potensi yang lebih rendah, pemulihan tanaman yang lebih cepat dari stres air, P tanah yang lebih baik. Menurut Safir *et al*. (1971, 1972) simbiosis cendawan MA mungkin mempengaruhi hubungan air tanaman kedelai secara tidak langsung, yaitu melalui perbaikan nutrisi P tanaman. Dari hasil-hasil penelitian yang ada berkaitan dengan toleransi terhadap cekaman kekeringan ini, kelihatannya ada dua kubu yaitu: (1) yang menyatakan perbaikan nutrisi P sebagai penyebab peningkatan toleransi dan (2) yang mengakui adanya pengaruh-pengaruh yang bersifat nonnutrisi yang dapat terjadi (Auge, 2001).

Kandowangko (2004) dalam penelitian inokulasi ganda cendawan MA dan *Azospirillum* pada tanaman jagung mendapatkan peningkatan kadar air relatif daun (KARD) dan kadar prolin, dan kadar asam absisat (ABA). Ketiga peubah ini merupakan indikator toleransi ketahanan terhadap cekaman kekeringan. Menge *et al*. (1978) mendapatkan tanaman avokad yang bermikoriza lebih tahan pada waktu dipindahkan ke lapangan (Tabel 12). Tentunya kemampuan cendawan MA seperti ini sangat bermanfaat bagi tanaman-tanaman yang terlebih dahulu ditumbuhkan di persemaian sebelum dipindahkan ke lapangan.

Tabel 12. Pengaruh inokulasi terhadap daya hidup bibit tanaman avokad yang dipindahkan

Perlakuan	BK rata-rata	% tanaman sehat	Indeks layu
	g		
Non-mikoriza	17,2	20	2,6
Mikoriza	31,4	80	0,4

Indeks layu: 0-4

Sumber: Menge *et al*. (1978)

Lahan-lahan pertanian, terutama yang letaknya dekat dengan daerah-daerah industri atau pertambangan sudah banyak yang tercemar dengan beberapa jenis logam berat seperti Pb, Cd, Hg, Zn, dan Cu. Konsentrasi tinggi logam berat berakibat buruk terhadap mikroorganisme dan proses-proses mikrobial (Leyval et al., 1997) Membicarakan hubungan antara cendawan MA dan logam berat tidak hanya menyangkut pengaruh logam berat terhadap kolonisasi cendawan MA, tetapi juga toleransi cendawan MA terhadap logam berat, dan pengaruh terhadap serapan dan transfer logam berat ke tanaman. Gildon dan Tinker (1981) mendapatkan 35% akar clover yang tumbuh pada bekas tambang yang tercemar dengan dengan logam (sampai 8,3% Zn dan 863 µg g^{-1} Cd) terkolonisasi cendawan MA. Cooper and Tinker (1978), dengan menggunakan sistem kultur yang memisahkan hifa ekstrradikal dari akar mendapatkan hifa ekstraradikal mampu mengakumulasi dan mentraslokasi ^{65}Zn. Isolat cendawan MA yang toleran terhadap Cd sudah diisolasi dari lahan-lahan tercemar logam berat (Gildon and Tinker, 1981: Weissenhorn et al, 1993, 1994). Nurbaity *et al*. (2000) mendapatkan bahwa cendawan MA dapat menekan kadar Cu pada tanaman padi gogo yang ditanam pada tanah yang berasal dari areal tailing Mekanisme kemampuan tanaman bermikoriza untuk mengakumulasi logam berat pada akar sehinggamencegah translokasi ke batang belum jelas.

Peran mikoriza pada sistem pola tanam

Populasi mikoriza pada sistem pola tanam dapat berbeda karena perbedaan ketergantungan tanaman terhadap mikoriza. Kuo and Huang (1982) menanam benih kedelai pada 15 g inokulan campuran *Glomus* dalam tunggul padi yang baru dipanen dan mendapatkan kenaikan hasil kedelai 21%, sedangkan yang diberi 60 kg P ha^{-1} kenaikan hasilnya hanya 14%. Inokulasi mikoriza mungkin penting untuk tanaman bermikoriza seperti kedelai, yang ditanam setelah padi pada pola tanam dimana populasi mikoriza asli sudah terkuras pada kondisi padi anaerob. Oleh karena adanya perbedaan ketergantungan jenis tanaman yang ditanam pada suatu rotasi, maka pengelolaannya haruslah sedemikian rupa sehingga keberadaan berbagai jenis tanaman pada lahan tersebut dapat mempertahankan jumlah populasi mikoriza tetap tinggi.

Peran mikoriza dalam merehabilitasi lahan-lahan terdegradasi

Peran mikoriza sudah diakui tidak hanya mempunyai arti potensial untuk melestarikan produksi tanaman, tetapi juga untuk mengkonservasi lingkungan. Di Jepang inokulan cendawan MA sudah digunakan paling berhasil untuk penanaman kembali (revegetasi) lahan-lahan yang dirusak oleh aktivitas gunung berapi (Marumoto, 1999). Aktivitas pertambangan dan industri juga dapat menimbulkan kerusakan pada lingkungan. Berbagai

bekas tambang dan daerah industri sudah tidak memiliki lagi lapisan atas (top soil), sehingga tidak ada vegetasi lagi yang tumbuh. Biasanya lapisan ini tidak mengandung propagul CMA lagi. Oleh karena itu inokulasi tanaman-tanaman yang digunakan untuk revegetasi lahan-lahan terdegradasi ini dengan cendawan MA sangat dibutuhkan.

Praktek pertanian yang merugikan perkembangan cendawan MA

Penggunaan pupuk dan insektisida pada pertanian konvensional dapat mempengaruhi perkembangan simbiosis mikoriza arbuskuler dalam tanah. Misalnya penggunaan dosis pupuk P yang tinggi dapat menekan kolonisasi mikoriza pada akar tanaman. Oleh karena itu ada batas maksimal pemberian pupuk P untuk berfungsinya simbiosis secara optimal. Pengkerdilan bibit jeruk (*citrus*) setelah tanah difumigasi dengan metilbromida berkaitan dengan penghambatan cendawan MA oleh fumigan (Kleinschmidt and Gerdemann, 1972). Infeksi mikoriza dan pertumbuhan tanaman bawang perai menurun nyata karena tetesan fungisida metalaxyl (Ridomil^{R}) di tanah (Jabaji-Hare and Kendrick, 1987). Menge (1982) meriviu pengaruh fumigan tanah dan fungisida terhadap cendawan MA. Pengaruh herbisida, insektisida, nematisida dan lain-lain terhadap simbiosis mikoriza perlu pengkajian lebih lanjut karena hasil-hasil yang kontradiksi pada berbagai contoh (Hayman, 1982).

DAFTAR PUSTAKA

Auge, R.M. 2001. Water relations, drought and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza 11: 3-42.

Azcon, R and J.A. Ocampo. 1981. Factors effecting the vesicular-arbuscular infection and mycorrhizal dependency of thirteen wheat cultivars. New Phytol. 87: 677-685.

Azimi S., V. Gianinazzi-Pearson, and S. Gianinazzi. 1980. Influence of increasing soil phosphorus levels on interactions between vesicular-arbuscular mycorrhiza and *Rhizobium* in soybeans. Can. J. Bot. 58: 200-205.

Barea, J.M., R. Azcon, and D.S. Hayman. 1975. Possible synergistic interactions between Endogone and phosphate-solubilizing bacteria in low phosphate soil. pp. 511-525. *In* F.E. Sanders, B. Mosse, and P.B. Tinker (Eds.). Endomycorrhizas. Academic Press, London.

Baylis, G.T.S. 1975. The magnoloid mycorrhiza and mycotrophy in root systems deived from it. pp. 373-389. *In* F.E.Sanders, B.Mosse, and P.B. Tinker (Eds.). Endomycorrhizas. Academic Press, London.

Bethlenfalvay, G.J., J.M. Ulrich, and M.S. Brown. 1985. Plant response to mycorhizal fungi: host, endophyte and soil effects. Soil Sci. Soc. Am. J. 49: 1.164-1.168.

Buchholz, F. 1912. Beiträge zur Kenntnis der Gattung *Endogone* Link. Beih.zum Botan. Centr. Abr. 2(29): 147-225.

Burbey dan R.D.M. Simanungkalit. 1991. Tanggapan padi gogo terhadap inokulasi mikoriza dengan pupuk P dan kapur tanah Ultisol. hlm. 1-9 *Dalam* Djoko S. Damardjati dan Adi Widjono (Ed.). Hasil Penelitian Pertanian dan Bioteknologi Pertanian III. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Jakarta.

Carling, D.E., W.G. Richle, M.F. Brown, and D.R. Johnson. 1978. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus on nitrate reductase and nitrogenase activities in nodulating and non nodulating soybens. Phytopathology 68: 1.590-1.596.

Carling, D.E. and M.F. Brown. 1980. Relative effect of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and yield of soybeans. Soil Sci. Soc. Am. J. 44: 528-532.

Chou, L.G. and A.F. Schmitthenner. 1974. Effect of *Rhizobium japonicum* and *Endogone mosseae* on soybean root rot caused by *Pythium ultimum* and *Phytophthora megasperma* var. sojae. Plant Dis. Rep. 58: 221-225.

Ciferri, R. 1928. Preliminary observations on sugar cane mycorrhizae and their relationships to root diseases. Phytopathology 18: 249-261.

Cooper, K.M., and P.B. Tinker. 1978. Translocation and transfer of nutrients in vesicular-arbuscular mycorrhizas. II. Uptake and translocation of phosphorus, zinc and sulphur. New Phytol 81: 43-52.

Cox, G., P.B. Tinker, and J.A. Wild. 1975. Ultrastructural evidence relating to host-endophyte transfer in vesicular-arbuscular mycorrhiza, pp. 279-312. *In* F.E. Sanders, B. Mosse, and P.B. Tinker (Eds.). Endomycorrhizas. Academic Press, London.

Daft, M.J. and T.H. Nicolson. 1969. Effect of *Endogone* mycorrhiza on plant growth II. Influence of inoculum concentration on growth and influence in tomato. New Phytol. 68: 935–963.

Daft, M.J. and T.H. Nicholson. 1972. Effect of *Endogone* mycorrhiza on plant growth. IV. Quantitative relationships between the growth of the host and the development of the endophyte in tomato and maize. New Phytol. 71: 287-295.

Daft, M.J. and A.A. El-Giahmi. 1975. Effect of *Glomus* infection on three legumes. pp. 581-592. *In* F.E. Sanders, B. Mosse, and P.B. Tinker (Eds.) Endomycorrhizas. Academic Press, London.

Daft, M.J. and E. Hacskaylo. 1977. Growth of endomycorrhizal and non-mycorrhizal red mapple seedlings in sand and anthracite spoil. Forest Sci. 23: 297-30.

Davis, R.M. and J.A. Menge. 1978. Influence of *Glomus fasciculatum* and soil phosphorus on. *Phytophthora* root rot of citrus. Phyto-pathology 68: 1.115-1.119.

Dehne, H.W., F. Schönbeck, and H. Baltruschat. 1978. Untersuchungen zum Einfluß der endotrophen Mycorrhiza auf Pflanzenkrankheiten. 3. Chitinase-aktivität und Ornithinzyklus (The influence of endotropic mycorrhizae on plant diseases. 3. Chitinase activity and ornithine cycle). Z. Pflkrankh. 85: 666-678.

Dehne, H.W., and F. Schönbeck. 1979. Untersuchungen zum Einfluß der endotrophen Mycorrhiza auf Pflanzenkrankheiten. II. Phenolstoffwechsel und Lignifizierung. (The influence of endotropic mycorrhizae on plant diseases. II. Phenolmetabolism and lignification.). Phytopath. Z. 95: 210-216.

Dehne, H.W. 1982. Interaction between vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and plant pathogens. Phytopathology 72: 1.115-1.119.

Dehne, H.W. and G.F. Backhaus. 1986. The use of vesicular arbuscular mycorrhizal fungi in plant production. I. Inoculum production. J. Plant Diseases and Protection 93: 415-424.

Djasmara and R.D.M. Simanungkalit. 1999. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate-solubilizing bacterial inoculation on growth and yield of mungbean in Inceptisol. pp. 163-174. *In* F.A. Smith, Kartini Kramadibrata, R.D.M. Simanungkalit, Nampiah Sukarno, and S.Taka Nuhamara (Eds.). Proc. International Conference on Mycorrhizas in Sustainable Tropical Agriculture and Forest Ecosystems. Research and Development Centre for Biology, Bogor Agricultural University and the University of Adelaide, Australia.

Furlan, V. and M. Bernier-Cardou. 1989. Effects of N, P and K on formation of vesicular-arbuscular mycorrhizae, growth and mineral content of onion. Plant Soil 113: 167-174.

Ganry, F., H.G. Diem, and Y.R. Dommergues. 1985. Effect of inoculation with *Glomus mosseae* on nitrogen fixation by fieldgrown soybeans. Plant Soil 68: 321-329.

Gerdemann, J.W. 1964. The effect of mycorhiza on the growth of maize. Mycologia 56: 342-349.

Gerdemann, J.W. 1968. Vesicular-arbuscular mycorrhiza and plant growth. Annu. Rev. Phytopath. 6: 397-418.

Gerdemann, J.W. and J.M. Trappe. 1974. The Endogonaceae in the Pacific Northwest. Mycol. Memoir 5: The New York Botanical Garden, New York.

Gerdemann, J.W. 1975. Vesicular-arbuscular mycorrhizae. pp. 575-591. *In* J.G. Torrey and D.T. Clarkson (*Eds.*). Development and Function of Roots. Academic Press, London.

Gildon, A.,and P.B. Tinker. 1981. A heavy metal tolerant strain of a mycorrhizal fungus. Trans.Br.Mycol.Soc. 77: 648-649.

Gilmore, A.E. 1971. The influence of endotrophic mycorrhizae on the growth of peach seedlings. J. Amer. Soc. Hort. Sci 96: 35-38.

Guillemin, J.P. and S. Gianinazzi. 1992. Fungicide interactions with VA fungi in *Ananas comosus* grown in a tropical environment. p. 381. *In* D.J. Read, D.H. Lewis, A.H. Fitter, and I.J. Alexander (Eds.). Mycorrhizas in Ecosystems, CAB International, Wallingford

Hall, I. 1979. Soil pellets to introduce vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi into soil. Soil Biol. Biochem. 11: 85-86.

Hayman, D.S. 1982. Endomycorrhizae. pp. 401-442. *In* Y.R. Dommergues and S.V. Krupa., Interaction between Non-pathogenic Microorganisms and Plants. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.

Heckman, J.R. and J.S. Angle. 1987. Variation between soybean cultivars in vesicular-arbuscular mycorrhiza fungi colonization. Agron J. 79: 428-430.

Hersanti dan Apanti. 2000. Inokulasi cendawan mikoriza vesicular-arbuskular dan effective microorganism (EM4) untuk mengendalikan penyakit bengkak akar (*Meloidogyne* spp.) pada tanaman tomat. hlm. 297-301 *dalam* Y. Setiadi, S. Hadi, E. Santoso, M. Turjaman, RSB Irianto, R. Prematuri, D. Maryanti, dan R. Widopratiwi (Eds.). Prosiding Seminar Nasional Mikoriza I. Puslitbang Hutan dan Konservasi Alam, Bogor.

Hetrick, B.A.D., J.A. Hetrick, and J. Bloom. 1984. Interaction of mycorrhizal infection, phosphorus level, and moisture stress in growth of field corn. Can. J. Bot. 62: 2.267-2.271.

Howeler, R.H., L.F. Cadavid, and E. Burckhardt. 1982. Cassava response to VA mycorrhizal inoculation and phosphorus application in greenhouse and field experiments. Plant Soil 69: 327-340.

Howeler, R.H. and E. Sieverding. 1983. Potentials and limitations of mycorrhizal inoculation illustrated by experiments with field-grown cassava. Plant Soil. 75: 245-261.

http://invam.caf.wvu.edu/fungi/taxonomy/nomenclature.htm. Name and authorities of fungi in Glomeromycota. 24 Juni 2006

Huang, L.L. and D.M. Sylvia. 1988. Production of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus inoculum in aeroponic culture. Appl. Environ. Microbiol. 54: 353-357.

Jabaji-Hare, S.H., and W.B. Kendrick. 1987. Response of an endomycorrhizal fungus in *Allium porrum* L. to different concentrations of the systemic fungicides, metalaxyl (Ridomil^{R}) and fosetyl-Al (Aliette^{R}). Soil.Biol.Biochem. 19: 95-99.

Jackson, N.E., R.E. Franklin, and R.H. Miller. 1972. Effects of VA mycorhiza on growth and phosphorus content of three agronomic crops. Proc. Soil Sci. Soc. Am. 36: 64-67.

Janse, J.M. 1896. Les endophytes radicaux de quelques plantes javanais. Annal. Jardin Bot. Buitenzorg 14: 53-201.

Jarstfer, A.G. and D.M. Sylvia. 1993. Inoculum production and inoculation strategies for vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. p. 349-377. *In* F. B. Metting, Jr. (Ed.). Soil Microbial Ecology. Marcel Dekker, Inc., New York.

Johnston, A. 1948. Vesicular-arbuscular mycorrhiza in Sea Island cotton and other tropical plants. Trop. Agric. 26: 118-121.

Jones, F.R. 1924. A mycorrhizal fungus in the roots of legumes and some other plants J. Agric. Res. 29: 459-470.

Kandowangko, N.Y. 2004. Respons Tanaman Jagung (*Zea mays* L.) terhadap Pemberian *Azospirillum* sp. dan CMA pada Kondisi Tercekam Kekeringan selama Fase Pembungaan sampai Pengisian Biji. Disertasi, Program Pasca Sarjana Universitas Padjadjaran.

Kang, B.T., R. Islam, F.E. Sanders, and A. Ayanaba. 1980. Effect of phosphate fertilization and inoculation with VA-mycorrhizal fungi on performance of cassava (*Manihot esculenta* Crantz) grown on an alfisol. Field Crops. Res. 3: 83-94.

Kasiamdari, R.S., S.E. Smith, F.A. Smith, and E.S. Scott. 2000. Effects of phosphorus on the interaction between *Glomus* sp. and binucleate *Rhizoctonia* sp. or *Rhizoctonia solani.* pp. 309-315. *In* Y. Setiadi, S. Hadi, E. Santoso, M. Turjaman, RSB Irianto, R. Prematuri, D. Maryanti, dan R. Widopratiwi (Ed.). Prosiding Seminar Nasional Mikoriza I. Puslitbang Hutan dan Konservasi Alam, Bogor.

Khan, A.G. 1975. Growth effect of VA-mycorrhiza on crops in the field. pp. 419-435. *In* F.E. Sanders, B. Mosse and P.B. Tinker (Eds.). Endomycorrhizas. Academic Press, London.

Kleinschmidt, G.D., and J.W. Gerdemann. 1972. Stunting of citrus seedlings in fumigated nursery soils related to the absence of endomycorrhizae. Phytopathology 62: 1447-1453.

Kothari, S.K., H. Marschner, and E. George. 1990. Effects of VA-mycorhizal fungi and rhizosphere microorganism on root and shoot morphology, growth and water relations in maize. New Phytol. 116: 303-311.

Kramadibrata, K., E.I. Riyanti, and R.D.M. Simanungkalit. 1995. Arbuscular mycorhizal fungi from the rhizospheres of soybean crops in Lampung and West Java. Biotropic 8: 30-38.

Krishna, K.R. and D.J. Bagyaraj. 1984. Growth and nutrient uptake of peanut inoculated with the mycorrhizal fungus, *Glomus fasciculatum* compared with non-inoculated ones. Plant Soil 77: 405-408.

Kuo, C.G., and R.S. Huang. 1982. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizae on the growth and yield of rice stubble cultured soybeans. Plant Soil 64: 325-330.

Laycock, D.H. 1945. Preliminary investigations into the function of the endotrophic mycorrhiza of *Theobroma cacao* L. Trop. Agric. 22: 77-80.

La Rue, J.H., W.D. McClellan, and W.L. Peacock. 1975. Mycorrhizal fungi and peach nursery nutrition. California Agric. 29: 7.

Leyval, C., K. Turnau, and K. Haselwandter. 1997. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects. Mycorrhiza 7: 139-153.

Lily, V.G. 1978. Note on the development of VA mycorrhiza *Endogone fasciculata* in coconut root. Curr. Sci. 44: 201-202.

Linderman, R.G. 1996. Role of VAM fungi in biocontrol, pp. 1-25. *In* F.L. Pfleger and R.G. Linderman (Eds.), Mycorrhizae and Plant Health. APS Press, St. Paul, Minnesota.

Lukiwati, D.R. dan R.D.M. Simanungkalit. 1999. Peningkatan Produksi bahan kering, serapan N dan P hijauan jagung dengan inokulan cendawan mikoriza arbuskular. Sainteks 6(4): 99-106.

Mamo, T. and K.S. Killham. 1987. Effect of soil liming and vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth and micronutrient content of the teff plant. Plant Soil 102: 257-259.

Marumoto, T., N.Kohno, T.Ezaki, and H.Okabe. 1999. Reforestation of volcanic devastated land using the symbiosis with mycorrhizal fungi. Soil Microorganisms 53: 81-90.

Menge, J.A. 1982. Effect of soil fumigants and fungicides on vesicular-arbuscular fungi. Phytopathology 72: 1125-1132.

Menge, J.A., E.L.V. Johnson, and R.G. Platt. 1978. Mycorrhizal dependency of several citrus cultivars under three nutrient regimes. New Phytol. 81: 553-559.

Meyer, J.R. and R.G. Linderman. 1986. Response of subterranean clover to dual inoculation with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi and a plant growth-promoting bacterium, *Pseudomonas putida*. Soil. Biol. Biochem. 18: 185-190.

Miller, D.D., P.A. Domoto, and C. Walker. 1985. Colonization and efficiency of different endomycorrhizal fungi with apple seedlings at two phosphorus levels. New Phytol. 100: 393–402.

Moreau, F. 1953. Les Champignons.Tome II. Systematique. Encycl. Mycol. 23: 941-2.120.

Morton, J.B. and J.L. Benny. 1990. Revised classification of arbuscular mycorrhizal fungi (Zygomycetes): A new order, *Glomales*, two new sub orders, *Glomineae* and *Gigasporineae* and two new families *Acaulosporaceae* and *Gigasporaceae* with an emendation of Glomaceae. Mycotaxon 37: 471-491.

Morton, J.B. and D. Redecker. 2001. Two new families of Glomales, Archaeosporaceae and Paraglomaceae, with two new genera, *Archaeospora* and *Paraglomus*, based on concordant molecular and morphological characters. Mycologia 93: 181-195.

Mosse, B. 1953. Fructifications associated with mycorrhizal strawberry roots. Nature (London) 171: 974.

Mosse, B. 1957. Growth and chemical composition of mycorrhizal and non-mycorrhizal apples. Nature 179: 922-924.

Mosse, B., C.L. Powell, and D.S. Hayman. 1976. Plant growth responses tovesicular-arbuscular mycorrhiza IX. Interactions between VA-mycorrhiza, rock phosphate and symbiotic nitrogen fixation. New Phytol. 76: 331-342.

Mosse, B. 1986. Mycorrhiza in a sustainable agriculture. Biol. Agric. Hort. 3: 191-209.

Mosse, B. and J.P. Thompson. 1984. Vesicular-arbuscular endomycorrhizal inoculum production I. Exploratory experiments with beans (*Phaseolus vulgaris*) in nutrient flow culture. Can. J. Bot. 62: 1.523-1.530.

Mugnier, J. and B. Mosse. 1987. Vesicular-arbuscular mycorrhizal infection in transformed root-inducing T-DNA roots grawn axenically. Phytopathology 77: 1.045-1.050.

Murdoch, C.L., J.A. Jackobs, and J.W. Gerdemann. 1967. Utilization of phosphorus sources of different availability by mycorrhizal and non-mycorrhizal maize. Plant Soil 27: 329-334.

Nadarajah, P. 1980. Species of Endogonaceae and mycorrhizal association of *Elaeis guineensis* and *Theobroma cacao.* pp. 232-237. *In* P.

Mikola (*Ed*.), Tropical Mycorrhiza Research. Oxford Univ. Press, Oxford, England.

Nemec, S. 1983. Inoculation of citrus in the field with vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in Florida. Trop. Agric (Trinidad) 60: 97-101.

Nopamornbodi, O., S. Tramsurakul, and Y. Vasuvat. 1987. Effect of VAM on growth, yield and phosphorus absorption of soybean and mungbeans in Thailand. p. 52. *In* D. M. Sylvia, L.L. Hung and J. H. Graham (*Eds*.). Mycorrhizae in the Next Decade, Practical Applications and Research Priorities. Proc. 7 th NACOM. IFAS, University of Florida, Grainesville.

Nurbaity, A., Y. Setiadi, dan N. Nurlaeni. 2000. Pengaruh cendawan mikoriza arbuskula dan pupuk organik terhadap kadar Cu dalam tanaman padi gogo di areal tailing. hlm. 269-275 *dalam* Y. Setiadi, S. Hadi, E. Santoso, M. Turjaman, RSB Irianto, R. Prematuri, D. Maryanti, dan R. Widopratiwi (*Eds*.). Prosiding Seminar Nasional Mikoriza I. Puslitbang Hutan dan Konservasi Alam, Bogor.

O'Bannon, J.H. and S. Nemec. 1979. The response of citrus lemon seedlings to a symbiont, *Glomus etunicatus* and a pathogen, *Radopholus similis*. J. Nematol. 11: 270.

Pandey, S. and A.P. Misra. 1971. Rhizophagus in mycorhizal association with *Litchi chinensis* Sonn. Mycopath, et Mycol. Appl. 45: 337-354.

Pacovsky, R.S. 1986. Micronutrient uptake and distribution in mycorrhizal or phosphorus fertilized soybeans. Plant Soil 95: 379-388.

Possingham, J.V. and J.B. Obbink, 1971. Endotropic mycorrhiza and the nutrition of grape vines. Vitis 10: 120-130.

Raju, P.S., R.B. Clark, J.R. Ellis, R.R. Duncan, and J.W. Maranville. 1990. Benefit and cost analysis and phosphorus deficiency of VA mycorrhizal fungi colonizations with sorghum (*Sorghum bicolor*) genotypes grown at varied phosphorus levels. Plant Soil 124: 199-204.

Rhodes, L.H. 1983. Mycorrhizae. pp. 419 – 435. *In* D. A. Evans, W. R. Sharp, P. V. Ammirato and Y. Yamado (*Eds*.). Handbook of Plant Cell Culture Vol. 1, Techiques for Propagation and Breeding. Mac Millan Publishing Company, New York.

Rhodes, L.H. and J.W. Gerdemann. 1980. Nutrient translocation in vesicular-arbuscular mycorrhizae, pp. 173-195. In C.B. Cook., P.W. Pappas, and E.D. Rudolph (Eds.), Cellular interactions in Symbiosis and Parasitism. Ohio State Univ. Press, Columbus.

Ross, J.P. and J.A. Harper. 1970. Effect of *Endogone mycorrhiza* on soybean yields. Phytopathology 60: 1.552-1.556.

Ross, J.P. 1971. Effect of phosphate fertilization on yield of mycorrhizal and non-mycorrhizal soybeans. Phytopathology 61: 1.400-1.403.

Ross, J.P. 1972. Influence of *Endogone* mycorrhiza on phytophthora rot soybean. Phytopathology 62: 896-897.

Safir, G.R., J.S. Boyer, dan J.W. Gerdemann. 1971. Mycorrhizal enhancement of water transport in soybean. Science 172: 581-583.

Safir, G.R., J.S. Boyer, dan J.W. Gerdemann. 1972. Nutrient status and mycorrhizal enhancement of water transport in soybean. Plant Physiol. 49: 700-703.

Sanni, S.O. 1976. Vesicular-arbuscular mycorrhiza in some Nigrerian Soils: the effect of *Gigaspora gigantea* on the growth of rice. New Phytol. 77: 673-674.

Schenck, N.C., R.A. Kinloh, and D.W. Dickson. 1975. Interaction of endomycorrhizal fungi and root-knot nematode on soybean. pp. 605-617. *In* F.E. Sanders, B. Mosse, and P.B. Tinker (Eds.). Endomycrrhizas. Academic Press, London.

Schönbeck, F. 1980. Endomycorrhiza: ökologie, funktion, and phytopathologische Aspekte. Forum Mikrobiologie 2: 90-96.

Sieverding, E. 1991. Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agroecosystem. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Eschborn.

Silviana, A.W. Gunawan, and K. Kramadibrata. 1997. Biodiversity of arbuscular-mycorrhizal fungi in the rhizospheres of mangosten. pp. 97-100. *In* F.A. Smith, Kartini Kramadibrata, R.D.M. Simanungkalit, Nampiah Sukarno, and S.Taka Nuhamara (Eds.). Proc. International Conference on Mycorrhizas in Sustainable Tropical Agriculture and Forest Ecosystems.Research and Development Centre for Biology, Bogor Agricultural University and the University of Adelaide, Australia.

Simanungkalit, R.D.M.1981. Wirkung der vesikulär-arbuskulären Mycorrhiza auf Nigersaat (*Guizotia abyssinica*) und Reis (*Oryza sativa*) bei veschiedenen Wasserregimen. Dissertation, Göttingen University.

Simanungkalit, R.D.M.1987. Pengaruh jamur mikoriza vesikuler-arbuskular (MVA), sumber P dan sterilisasi tanah terhadap pertumbuhan padi gogo di tanah kahat P. Makalah pada Seminar Bioteknologi Pertanian, PAU-Bioteknologi Institut Pertanian Bogor, 21 Desember 1987 16 hlm.

Simanungkalit, R.D.M.1989. Tanggapan berbagai varietas jagung terhadap inokulasi jamur mikoriza vesikular-arbuskular. Makalah pada Kongres Nasional V Perhimpunan Mikrobiologi Indonesia di Yogyakarta, tanggal 4-6 Desember 1989.

Simanungkalit, R.D.M., E.I. Riyanti, dan Linda. 1992. Tanggapan beberapa varietas kacang tanah terhadap inokulasi jamur mikoriza vesikular-arbuskular. hlm. 103-110 *dalam* S. Haryosumadi, M. Machmud, S. Tjokrowinoto, D. Pasaribu, Sutrisno, A. Kurnia, dan N. Mulyono (Eds.). Hasil Penelitian Tanaman Pangan. Prosiding Seminar Balittan Bogor.

Simanungkalit, R.D.M.1993. Efficiency of vesicular-arbuscular mycorrhizal (VAM) funggi-soybean symbiosis at various levels of P fertilizer. pp. 167-178. *In* Proc. Second Asian Conference on Mycorrhiza. Biotrop. Special Publication No 42.

Simanungkalit, R.D.M., dan E.I. Riyanti.1994. Perbanyakan jamur mikoriza vesikular-arbuskular pada media campuran pasir kuarsa dengan arang. Risalah Hasil Penelitian Tanaman Pangan 5: 295–299.

Simanungkalit, R.D.M.1997. Effectiveness of 10 species of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi isolated from West Java and Lampung on maize and soybean. pp. 267-274. *In* U.A. Jenie (Ed.). Proc. Indonesian Biotechnology Conference. Vol. II. The Indonesian Biotechnology Consortium, IUC Biotechnology IPB, Bogor.

Simanungkalit, R.D.M., dan Eny Ida Riyanti. 1997. Mikoriza arbuskular untuk peningkatan produksi tanaman pangan. hlm. 1.928-1.939 *dalam* Mahyuddin Syam, Hermanto, Arief Musaddad, dan Sunihardi (Eds.). Kinerja Penelitian Tanaman Pangan. Buku 6. Sistem Usahatani dan Komponen Penunjang. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanaman Pangan, Bogor.

Simanungkalit, R.D.M., Iswandi Anas, Yadi Setiadi, and Meine van Noordwijk. 1999. Microbial diversity as affected by different land use systems in Lampung and Jambi. Paper presented at the International Seminar on Toward Sustainable Agriculture in Humid Tropical Soils Facing the 21st Century in Bandar Lampung on September 26-28, 1999.

Simanungkalit, R.D.M., dan D.R. Lukiwati. 2001. Growth and nutrient uptake of *Calliandra callothyrsus* as affected by arbuscular mycorrhizal inoculation and application of two different phosphate forms. Paper presented at the Third International Conference On Mycorrhizas on October 8-13, 2001 in Adelaide, Australia.

Smith, S.E., and V. Gianinazzi-Pearson. 1988. Physiological interactions between symbionts in vesicular-arbuscular mycorrhizal plants. Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol. 39: 221-244.

Smith, H.F., P.J. O'Connor, S.E. Smith, and F.A. Smith. 1997. (Vesicular)-arbuscular mycorrhizas of durian and other plants of forest gardens in West Kalimantan, Indonesia. pp. 192-198. *In* A. Schulte and D. Ruhiyat (Eds.). Forest soils in the Humid Tropics: Characteristics, Ecology and Management, Springer, Berlin.

Sondergaard, M. and S. Laegaard. 1977. Vesicular-arbuscular mycorrhiza in some aquatic vascular plants. Nature 268: 232-233.

Subramanian, K.S., C. Charest, L.M. Dwyer, and R.I. Hamilton. 1995. Arbuscular mycorrhizal and water relations in maize under drought stress at tasseling. New Phytol. 129: 643-650.

Swaminathan, K. and B.C. Verma. 1979. Responses of three crops spesies to vesicular-arbuscular mycorrhizal infection on zinc-deficient Indian soils. New Phytol. 82: 481-487.

Sylvia, D.M., dan D.B. Hubbell. 1986. Growth and sporulation of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in aeroponic and membrane systems. Symbiosis 1: 259-267.

Sylvia, D.M., L.C. Hammond, J.M. Bennett, J.H. Haas, and S.B. Linda. 1993. Field response of maize to a VAM fungus and water management. Agron. J. 85: 193-198.

Thaxter, R. 1922. A revision of the Endogonaceae.Proc. Amer. Acad. Arts Sci.57: 291-351.

Tinker P.B.H. 1975. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizas on higher plants. Symp. Soc. Expt. Biol. 29: 325-349.

Tisdall, J.M. and J.M. Oades. 1979. Stabilization of soil aggregates by the root systems of ryegrass. Aust. J. Soil Res. 17: 429-441.

Wastie, R.L. 1965. The occurrence of an *Endogone* type of endotropic mycorrhiza in *Hevea brasiliensis*. Trans. British Mycol. Soc. 48: 167- 178.

Webster, B.N. 1953. Mycorrhiza. Tea Quarterly (Ceylon) 24: 26-30.

Weissenhorn, I C. Leyval, and J. Berthelin. 1993. Cd-tolerant arbuscular mycorrhizal (AM) fungi from heavy metal-polluted soils. Plant Soil 157: 247-256.

Weissenhorn, I, A. Glasshof, C. Leyval, and J. Berthelin. 1994. Differential intolerance to Cd and Zn of arbuscular mycorrhizal (AM) fungal spores isolated from heavy metal-polluted and unpolluted soils. Plant Soil 167: 189-196.

Wright, S.F and A. Upadhyaya. 1996. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi. Soil Sciience 161: 575-586.

Yost, R.S. and R.L. Fox. 1982. Influence of mycorrhizae on the mineral contents of cowpea and soybean grown in an oxisol. Agron. J. 74: 475-481.

Zaag, P. van der, R.L. Fox, R.S. Pena, and R.S. Yost. 1979. P nutrition of cassava including mycorrhizal effects on P, K, S, Zn and Ca uptake. Field Crops Res. 2: 253-263.

Zobel, R.W., Peter Del Tredici, and J.G. Torrey. 1976. Method for growing plants aeroponically. Plant Physiol. 57: 344-346.

9. RIZOBAKTERI PEMACU TUMBUH TANAMAN

Edi Husen, Rasti Saraswati, dan Ratih Dewi Hastuti

SUMMARY

Various findings on the benefit of plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) for agriculture have been reported by many research institutions. The enthusiasm to commercialize these bacteria as a promising alternative technology is triggered mainly by the need to develop environmentally benign agriculture by reducing the use of synthetically agrochemical inputs (fertilizers and pesticides). PGPR improve the growth of various crops by direct or indirect ways. The direct growth promotion of PGPR is based on their capability to provide the plant with a compound synthesized or facilitate the uptake of certain nutrients from soil environment. The indirect effects result from their ability to produce compounds or metabolites to decrease the activities of pathogens, and eventually increase plant growth.This chapter describes general characteristics of PGPR (definition and historical background), some functional traits and mechanisms of PGPR in enhancing plant growth, and future direction for research and development. A strain of PGPR may have more than one of functional traits. *Azospirillum brasilense*, for example, increased plant growth either by producing plant growth regulator indole acetic acid (IAA) or providing nitrogen, or both. However, the growth increase occurs at low level of IAA produced, meaning that at high concentration IAA inhibits plant growth due to stimulation of ethylene production. Some PGPR, such as *Pseudomonas fluorescens* is able to reduce ethylene concentration by producing an enzyme called aminocyclo-propane carboxylic acid (ACC) deaminase. Other PGPR promote plant growth by producing siderophore to sequester the limited supply of iron in the rhizosphere, there by reducing its availablility for the growth of pathogens. The success of PGPR in enhancing plant growth, which is more than just a biofertilizer, depends much on their ability to grow and develop in various soil ecosystems.

Rizobakteri pemacu tumbuh tanaman (RPTT) atau populer disebut *plant growth promoting rhizobacteria* (PGPR) adalah kelompok bakteri menguntungkan yang agresif 'menduduki' (mengkolonisasi) rizosfir (lapisan tanah tipis antara 1-2 mm di sekitar zona perakaran). Aktivitas RPTT memberi keuntungan bagi pertumbuhan tanaman, baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Pengaruh langsung RPTT didasarkan atas kemampuannya menyediakan dan memobilisasi atau memfasilitasi penyerapan berbagai unsur hara dalam tanah serta mensintesis dan mengubah konsentrasi berbagai fitohormon pemacu tumbuh. Sedangkan pengaruh tidak langsung berkaitkan dengan kemampuan RPTT menekan aktivitas patogen dengan cara menghasilkan berbagai senyawa atau metabolit seperti antibiotik dan *siderophore* (Kloepper *et al*., 1991; Kloepper, 1993; Glick, 1995).

Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Kloepper & Schroth (1978), perkembangan penelitian RPTT atau PGPR mengalami kemajuan pesat, terutama dalam beberapa tahun terakhir. Berbagai penemuan baru dipresentasikan dan dibahas dalam *workshop* PGPR yang secara konsisten dilaksanakan tiap tiga tahun (beberapa prosiding *workshop* PGPR dapat diakses melalui internet). Namun demikian, belum semua peneliti memiliki kesamaan mengenai batasan atau definisi RPTT. Wall (2006) pada *workshop* PGPR kelima tahun 2000 di Argentina mengusulkan perluasan spektrum PGPR menjadi PGPRM (*plant growth promoting rhizospheric microorganisms*) karena beberapa jenis jamur (fungi) seperti *Trichoderma* dan *Aspergillus* yang diisolasi dari rizosfir juga memiliki peran dan pengaruh yang sama seperti kelompok bakteri ini dalam memacu pertumbuhan tanaman. Namun pada *workshop* keenam tahun 2003 di India dan *workshop* ketujuh tahun 2006 di Belanda, istilah PGPR masih tetap digunakan. Berdasarkan definisi, rizobakteri adalah kelompok bakteri rizosfir yang memiliki kemampuan mengkolonisasi rizosfir secara agresif, dan rizobakteri yang memberi keuntungan bagi tanaman dikenal dengan PGPR atau RPTT (Kloepper & Schroth, 1978; Schroth & Hancock, 1982).

Berbagai jenis bakteri telah diidentifikasi sebagai RPTT. Sebagian besar berasal dari kelompok gram-negatif dengan jumlah strain paling banyak dari genus *Pseudomonas* dan beberapa dari genus *Serratia* (Kloepper, 1993). Selain kedua genus tersebut, dilaporkan antara lain dari genus *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Acetobacter*, *Burkholderia*, dan *Bacillus* (Glick, 1995). Meskipun sebagian besar *Bacillus* (gram-positif) tidak tergolong pengkoloni akar, beberapa strain tertentu dari genus ini ada yang mampu melakukannya, sehingga bisa digolongkan sebagai RPTT.

Kemajuan nyata yang diperoleh dari penelitian pemanfaatan RPTT bagi tanaman telah meningkatkan antusias peneliti untuk mempopulerkan RPTT sebagai agen penting dalam sistem produksi pertanian yang ramah

lingkungan, karena penggunaan RPTT akan mengurangi pemakaian senyawa kimia sintetis berlebihan, baik dalam penyediaan hara tanaman (biofertilizers) maupun dalam pengendalian patogen tular tanah (bioprotectants).

Pengaruh positif RPTT bagi pertumbuhan tanaman pertama kali dilaporkan pada tanaman umbi-umbian seperti lobak, kentang, gula bit (Kloepper, 1993). Tanaman kanola (*Brassica compestris*) (sejenis kol atau sawi) yang diinokulasi oleh *Pseudomonas putida* strain GR12-2 meningkatkan panjang akar, tinggi tanaman, dan penyerapan hara P (Lifshitz *et al*., 1987). Beberapa laporan lain juga mengindikasikan adanya pengaruh positif RPTT pada berbagai tanaman seperti *barley* (sejenis gandum), kacang-kacangan (buncis, kacang tanah, kacang polong, dan kedelai), kapas, berbagai tanaman sayuran, dan tanaman pohon-pohonan (apel dan jeruk). Pengaruh positif RPTT pada berbagai jenis tanaman masih terus diteliti, baik menggunakan strain rizobakteri yang sudah dikenal maupun isolat-isolat lokal yang diperoleh/diisolasi dari lingkungan tanah setempat (indigenous).

Saat ini, beberapa produk RPTT sudah dikomersialkan. Di Indonesia, berbagai jenis bakteri yang termasuk dalam kategori RPTT banyak dijumpai dalam kandungan berbagai jenis/merek pupuk hayati majemuk komersial (pupuk hayati majemuk yang mengandung lebih dari satu jenis/strain mikroba). Diantaranya adalah bakteri penambat N hidup bebas dan bakteri pelarut P yang juga mampu menghasilkan hormon pertumbuhan. Keterbatasan penggunaan beberapa produk RPTT secara umum masih terkait dengan belum konsistennya keefektifan RPTT di lapangan (Nelson, 2004). Beragamnya kondisi lingkungan (jenis tanah, tingkat pengelolaan tanah, iklim, dan tanaman yang diusahakan) dengan masa pengujian di lapangan yang pendek dan teknik aplikasi yang belum tepat merupakan kendala yang masih perlu terus diteliti untuk keberhasilan pemanfaatannya ke depan.

Fungsi dan mekanisme

Secara umum, fungsi RPTT dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman dibagi dalam tiga kategori, yaitu: (i) sebagai pemacu/perangsang pertumbuhan (biostimulants) dengan mensintesis dan mengatur konsentrasi berbagai zat pengatur tumbuh (fitohormon) seperti asam indol asetat (AIA), giberellin, sitokinin, dan etilen dalam lingkungan akar; (ii) sebagai penyedia hara (biofertilizers) dengan menambat N_2 dari udara secara asimbiosis dan melarutkan hara P yang terikat di dalam tanah; dan (iii) sebagai pengendali patogen berasal dari tanah (bioprotectants) dengan cara menghasilkan berbagai senyawa atau metabolit anti patogen seperti *siderophore*, β-1,3-glukanase, kitinase, antibiotik, dan sianida (Tenuta, 2006; Cattelan *et al*., 1999; Kloepper, 1993).

Dalam beberapa kasus, satu strain RPTT dapat memiliki kemampuan lebih dari satu kategori fungsi seperti tampak pada Tabel 1 dan 2, sehingga fungsi perangsang pertumbuhan dan penyedia hara (fungsi langsung) dan fungsi pengendali patogen (fungsi tidak langsung) menjadi satu kesatuan yang tidak bisa dipisahkan. Kloepper (1993) menyebut fungsi langsung dan tidak langsung ini bagaikan dua muka dari satu mata uang logam yang sama. Tanaman yang perakarannya berkembang dengan baik akan efisien menyerap unsur hara sehingga tanaman tidak mudah terserang patogen (penyakit), dan sebaliknya tanaman yang terserang patogen tidak akan tumbuh dengan baik walaupun unsur hara yang tersedia cukup. Secara skematis hubungan ketiga fungsi RPTT tersebut dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman disajikan pada Gambar 1.

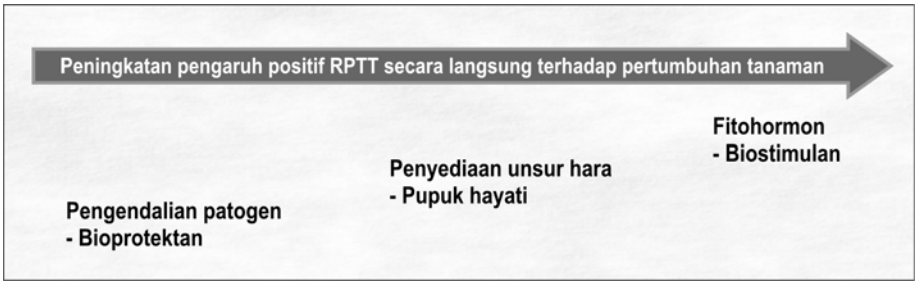
Tabel 1. Kemampuan beberapa isolat RPTT yang diisolasi dari tanah dan rizosfir dalam menghasilkan AIA, melarutan hara P, dan memproduksi *siderophore*

Isolat dan *strain* referensi	Reaksi gram	Produksi AIA *)	Pelarutan P	Produksi *siderophore*
		µmol ml^{-1}		
BS 58	-	14,93	+	+
BTS	-	27,51	+	+
TS 3	-	Tp	-	-
TS 17	-	8,27	-	-
TCaR 59	-	33,28	-	-
TCaR 61	-	19,99	+	+
TCeR 68	-	Tp	-	+
TceRe 60	-	31,45	-	+
TceRe 66	-	6,72	-	-
TceRe 66/71	-	7,23	-	-
TceRe 76	-	21,44	-	-
BTCaRe 65	-	9,83	+	+
Azotobacter vinelandii Mac 259	-	2,09	-	+
Bacillus cereus UW 85	+	4,28	-	-

Sumber: Husen (2002; 2003)

*Pada media garam minimal yang ditambahkan 5 mM L-tryptophan

tp = tidak memproduksi AIA



Gambar 1. Spektrum mekanisme peningkatan pertumbuhan tanaman oleh RPTT (Sumber: Tenuta, 2006)

Tabel 2. Karakter fungsional beberapa isolat RPTT yang diisolasi dari tanah dan rizosfir terkait dengan fungsi pemacu pertumbuhan tanaman

Isolat	Identifikasi dengan FAME (*fattty acid methyl ester*)	Reaksi gram	Karakter fenotip (fungsional)								
			1	2	3	4	5	6	7	8	9
GN1102	*Pseudomonas fluorescens*	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
GN1212	*Pseudomonas chlororaphis*	-	-	+	+	-	-	-	-	+	+
GW2103	*Flavobacterium indologenes*	-	+	-	-	+	-	-	-	-	+
GW1206	*Bacillus laterosporus*	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+
GN1210	*Bacillus thuringiensis*	+	-	-	-	-	-	+	-	-	+
GN2214	*Pseudomonas pickettii*	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+
LC3316	*Acinetobacter baumannli*	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+
LN1118	*Bacillus megaterium*	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+
GW2306	(Belum diidentifikasi)	-	-	+	-	-	+	-	+	-	+

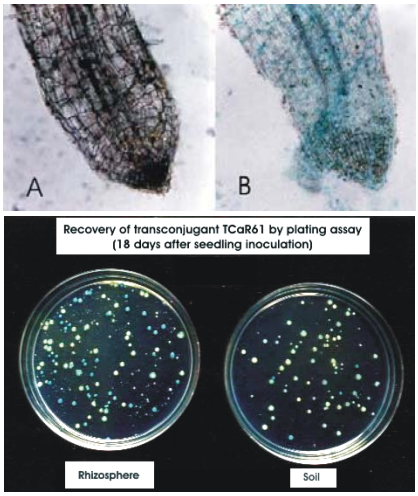
Sumber: Cattelan *et al*. (1999)

Keterangan: 1 = produksi AIA, 2 = produksi ACC *deaminase*, 3 = pelarutan P, 4 = aktivitas nitrogenase, 5 = produksi *siderophore*, 6 = produksi kitinase, 7 = produksi glukanase, 8 = produksi sianida, 9 = prototropi biotin. Kemampuan menghasilkan pektinase dan selulase negatif untuk semua isolat.

Mekanisme RPTT dalam memacu atau meningkatkan pertumbuhan tanaman belum sepenuhnya dipahami. Hal ini terkait dengan komplek-sitas peran RPTT bagi pertumbuhan tanaman dan beragamnya kondisi fisik, kimia, dan biologi di lingkungan rizosfir. Namun diyakini bahwa proses pemacuan tumbuh tanaman dimulai dari keberhasilan RPTT dalam mengkolonisasi rizosfir.

Lingkungan rizosfir yang dinamis dan kaya akan sumber energi dari senyawa organik yang dikeluarkan oleh akar tanaman (eksudat akar) merupakan habitat bagi berbagai jenis mikroba untuk berkembang dan sekaligus sebagai tempat pertemuan dan persaingan mikroba (Sorensen, 1997). Tiap tanaman mengeluarkan eksudat akar dengan komposisi yang berbeda-beda sehingga berperan juga sebagai penyeleksi mikroba; pengaruhnya bisa meningkatkan perkembangan mikroba tertentu dan menghambat perkembangan mikroba lain (Chan *et al*., 1963; Rovira, 1965; Grayston *et al*., 1998). Semakin banyak eksudasi akar, akan semakin besar jumlah dan keragaman mikroba. Kondisi ini akan meningkatkan persaingan dalam proses kolonisasi rizosfir. Rizobakteri merupakan mikroba kompetitor yang paling efisien yang mampu menggeser kedudukan mikroba pribumi (native) di lingkungan rizosfir sampai pada masa pertengahan umur tanaman (Kloepper & Schroth, 1981).

Kemajuan teknologi di bidang biologi molekuler dewasa ini memungkinkan penelusuran (tracking) suatu inokulan di dalam tanah dan lingkungan akar, seperti penggunaan gen penanda (marker gene). Gambar 2 memperlihatkan inokulan RPTT yang sudah mengandung gen *gusA*, sehingga kolonisasi akar oleh inokulan ini dan jumlah populasinya di dalam rizosfir dan tanah dapat dengan mudah diketahui dari warna biru pada akar maupun koloni yang tumbuh pada cawan agar (ekspresi gen *gusA* berwarna biru pada media X-GlcA).



Gambar 2. Warna biru pada ujung akar cabai (Gambar B) menunjukkan akar dikolonisasi oleh inokulan RPTT, sedangkan kontrol (Gambar A) tidak ada kolonisasi. Koloni inokulan RPTT pada cawan agar berwarna biru yang kontras dengan warna koloni bakteri tanah lain (Sumber: Husen, 2005)

Kompleksitas mekanisme RPTT memacu pertumbuhan tanaman banyak dilaporkan. Pada awalnya para ahli percaya bahwa peningkatan pertumbuhan tanaman yang diinokulasi dengan *Azotobacter* dan *Azospirillum* disebabkan semata-mata oleh sumbangan nitrogen hasil penambatan N_2. Namun kemudian diketahui bahwa ternyata ada faktor lain yang turut berperan dalam peningkatan pertumbuhan tanaman, yakni hormon AIA (asam indol asetat) yang dihasilkan bakteri tersebut (Kennedy, 1998). Hasil yang sama dikemukakan oleh De Freitas *et al*. (1997) bahwa peningkatan pertumbuhan tanaman kanola (*Brassica napus* L.) yang diinokulasi dengan rizobakteri pelarut P. *Bacillus* sp. juga terkait dengan kemampuan bakteri ini menghasilkan hormon pertumbuhan AIA. Peran ganda bakteri ini terkait dengan komunikasi bakteri-tanaman. Ekspresi karakter fungsional yang muncul merupakan respon terhadap kondisi fisik dan kimia di lingkungan rizosfir. Oleh karena itu, skrining berbagai karakter fungsional bakteri diperlukan untuk mengetahui potensi pemanfaatannya sebagai RPTT.

Peningkatan pertumbuhan tanaman

Peningkatan pertumbuhan tanaman oleh RPTT dapat terjadi melalui satu atau lebih mekanisme yang terkait dengan karakter fungsional RPTT dan kondisi di lingkungan rizosfir. Beberapa karakter fungsional RPTT yang dibahas pada Bab ini difokuskan pada RPTT penghasil hormon asam indol asetat (AIA), enzim *aminocyclopropane carboxylic acid deaminase* (pengendali sintesis hormon etilen yang berlebihan), dan *siderophore* (pengendali patogen). Sedangkan mekanisme penambatan N secara nonsimbiotik dan pelarutan hara P yang juga dilakukan oleh RPTT dibahas pada Bab 6 dan 7.

Asam indol asetat

Asam indol asetat (AIA) merupakan bentuk aktif dari hormon auksin yang dijumpai pada tanaman dan berperan meningkatkan kualitas dan hasil panen. Fungsi hormon AIA bagi tanaman antara lain meningkatkan perkembangan sel, merangsang pembentukan akar baru, memacu pertumbuhan, merangsang pembungaan, meningkatkan aktivitas enzim (Arshad & Frankenberger, 1993). Umumnya tanaman tidak mampu menghasilkan AIA dalam jumlah cukup untuk pertumbuhan dan perkembangan-nya. Beberapa strain RPTT mampu mensintesis AIA dari prekursor (bahan dasar) yang terdapat dalam eksudat akar maupun dari bahan organik (sisa tanaman dan hewan). Tergantung konsentrasinya, senyawa aktif ini dapat meningkatkan maupun menghambat pertumbuhan tanaman.

Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa AIA yang dihasilkan RPTT seperti *Azospirillum brasilense* dan *Azotobacter paspali* meningkat-kan jumlah bulu akar dan akar lateral sehingga meningkatkan penyerapan air dan unsur hara dari tanah (Okon & Kapulnik, 1986; Abbas & Okon, 1993). Penelitian Tien *et al*. (1979) menyimpulkan bahwa *Azospirillum brasilense* yang menghasilkan beberapa fitohormon mampu meningkatkan produktivitas tanaman *pearl millet* (*Pennisetum americanum* L.) (sejenis rumput) baik secara hormonal maupun dengan penyediaan hara nitrogen. Namun peningkatan pertumbuhan tanaman ini terjadi pada pemberian AIA dengan konsentrasi sangat rendah (0,01 μg ml^{-1}), sedangkan pada konsentrasi lebih tinggi cenderung menurunkan pertumbuhan (Tabel 3).

Tabel 3. Pengaruh RPTT penghasil fitohormon (*Azospirillum brasilense* Sp131 SR2) dan konsentrasi AIA terhadap pertumbuhan tanaman *Pennisetum americanum* L.

Perlakuan	Konsentrasi	Berat basah akar		Berat basah tajuk
	μg ml^{-1}	mg		
Kontrol	-	161	A*	694 B
A. brasilense	-	211	a	1017 A
AIA	0,050	189	a	866 Ab
	0,010	200	a	990 A
	0,005	173	a	838 Ab

Sumber: Tien *et al*. (1979)

* Huruf yang sama dibelakang angka pada lajur yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% LSD

Sintesis AIA yang berlebihan oleh RPTT seperti dilaporkan Beyeler *et al*. (1997) dapat terjadi dalam kondisi tertentu, sehingga ber-pengaruh negatif terhadap pertumbuhan tanaman. Kondisi *hyperauxiny* (akumulasi auksin atau AIA yang berlebihan dalam tanaman) menurut Subba-Rao (1999) dapat terjadi bila tanaman terserang patogen dan patogen ini ikut serta memproduksi AIA. Dengan demikian, secara alamiah dan dalam kondisi normal, jumlah AIA yang diproduksi di lingkungan rizosfir sangat rendah atau sebagian dari AIA yang diproduksi berlebihan didegradasi oleh mikroba rizosfir.

Sintesis AIA di dalam tanah dipacu oleh ketersediaan prekursor spesifik (bahan dasar) triptopan (L-tryptophan). Triptopan (salah satu sumber N bagi mikroba) yang terdapat dalam eksudat akar dan bahan organik dapat diubah oleh mikroba tanah menjadi AIA (Arshad & Frankenberger, 1993). Sintesis AIA dari triptopan oleh *Azospirillum brasilense* menurut Bar & Okon (1992)

merupakan cara RPTT ini mengurangi tingkat konsentrasi triptopan yang bersifat toksik bagi perkembangannya. Namun pada penelitian selanjutnya diketahui bahwa AIA mempunyai peran fisologis bagi *Azospirillum brasilense* dan bukan hanya sebagai produk dari hasil proses detoksifikasi (Dosselaere *et al*., 1997).

Tabel 4. Pengaruh inokulasi RPTT terhadap pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.) menggunakan media pasir steril di ruang penumbuh (growth room)

Perlakuan (inokulasi isolat dan *strain* referensi RPTT)	Produksi AIA *	Tinggi tanaman	Berat kering akar	Berat kering tajuk
	µmol ml^{-1}	cm	——— mg ———	
Kontrol (tidak diinokulasi)	td	18,9 A**	751 a	697 A
BS 58	14,93	7,3 c	99 bc	118 C
BTS	27,51	- **	-	-
TS 3	Tp	-	-	-
TS 17	8,27	-	-	-
TCaR 59	33,28	-	-	-
TCaR 61	19,99	-	-	-
TCeR 68	Tp	16,1 ab	281 b	424 B
TceRe 60	31,45	-	-	-
TceRe 66	6,72	-	-	-
TceRe 66/71	7,23	6,47 c	72 c	119 C
TceRe 76	21,44	9,0 bc	91 bc	110 C
BTCaRe 65	9,83	-	-	-
Azotobacter vinelandii Mac 259	2,09	12,4 abc	171 bc	273 Bc
Bacillus cereus UW 85	4,28	-	-	-

Sumber: Husen (2002); Husen & Saraswati (2003)

* Produksi AIA pada media garam minimal yang ditambahkan 5 mM L-tryptophan

** Huruf yang sama dibelakang angka pada lajur yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% DMRT.

*** Tanaman tidak tumbuh setelah satu minggu pindah-tanam (*transplanting*)

td= tidak ada bakteri; tp= tidak memproduksi AIA

Pengaruh negatif pemberian AIA yang berlebihan bagi pertumbuhan tanaman banyak dilaporkan. Inokulasi berbagai isolat RPTT penghasil AIA pada tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.) seperti disajikan pada Tabel 4 dan 5 menunjukkan respon negatif tanaman, masing-masing pada media steril dan nonsteril. Respon tidak terlalu negatif terjadi pada percobaan di rumah kaca (media nonsteril) karena tidak ada penambahan triptopan ke dalam tanah. Kedua kondisi yang berbeda ini juga mengindikasikan bahwa ada

mekanisme lain yang menghambat pertumbuhan tanaman terkait dengan peningkatan konsentrasi AIA (Husen & Saraswati, 2003). Sebelumnya Glick (1995) dan Mayak *et al*. (1997) menyatakan bahwa produksi AIA yang berlebihan akan memacu pembentukan hormon etilen yang dalam konsentrasi tinggi justru menghambat perkembangan/pemanjangan akar.

Tabel 5. Pengaruh inokulasi RPTT terhadap pertumbuhan tanaman cabai (*Capsicum annuum* L.) menggunakan media tanah-pot nonsteril di rumah kaca

Perlakuan (inokulasi isolat dan *strain* referensi RPTT)	Produksi AIA *	Tinggi tanaman	Berat kering akar	Berat kering tajuk
	µmol ml^{-1}	Cm	mg	
Kontrol (tidak diinokulasi)	td	24,6 A**	1.496 ab	1.208 A
BS 58	14,93	14,5 cd	359 d	447 Cd
BTS	27,51	19,7 abc	1.128 abc	1.052 Ab
TS 3	tp	20,1 abc	849 bcd	982 Ab
TS 17	8,27	14,6 cd	1.003 abcd	567 Bcd
TCaR 59	33,28	24,7 a	1.112 abc	1.232 A
TCaR 61	19,99	20,7 ab	1.200 abc	1.090 Ab
TCeR 68	tp	19,1 abc	1.196 abc	1.163 A
TceRe 60	31,45	20,8 ab	1.293 abc	1.080 Ab
TceRe 66	6,72	21,8 a	1.178 abc	995 Ab
TceRe 66/71	7,23	15,7 bcd	968 abcd	746 Abcd
TceRe 76	21,44	22,4 a	1.623 a	930 Abc
BTCaRe 65	9,83	12,8 d	589 cd	387 D
Azotobacter vinelandii Mac 259	2,09	21,0 ab	1.286 abc	979 Ab
Bacillus cereus UW 85	4,28	19,5 abc	1.415 ab	983 Ab

Sumber: Husen (2002); Husen & Saraswati (2003)

* Produksi AIA pada media garam minimal yang ditambahkan 5 mM L-tryptophan

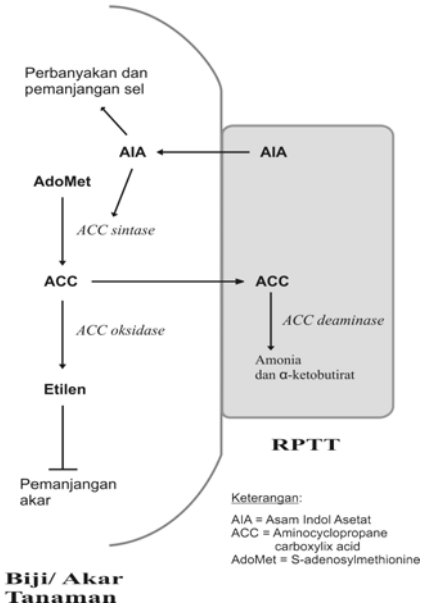
** Huruf yang sama dibelakang angka pada lajur yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% DMRT.

td= tidak ada bakteri; tp= tidak memproduksi AIA

Dari beberapa jenis/merek pupuk hayati majemuk yang dikomersialkan di Indonesia, beberapa diantaranya juga mengandung inokulan RPTT yang mampu menghasilkan hormon AIA (Balai Penelitian Tanah, 2005). Validasi terhadap pengaruh inokulan RPTT penghasil AIA yang terdapat dalam beberapa pupuk hayati komersial diperlukan untuk mengetahui sejauh mana pengaruhnya bagi pertumbuhan tanaman (negatif atau positif).

Enzim ACC deaminase

Enzim *aminocyclopropane carboxylic acid* (ACC) *deaminase* berperan mengurangi pembentukan ACC yang merupakan bahan dasar pembentukan hormon etilen. Hormon etilen selain berfungsi sebagai pemacu tumbuh (mempercepat perkecambahan, perkembangan akar, pembungaan, pematangan buah, dan lain-lain) juga berperan sebagai antagonis atau modulator bagi berbagai fitohormon untuk mencegah pertumbuhan tanaman yang berlebihan (gigantisme) (Imaseki, 1986; Lieberman & Kunishi, 1972). Pembentukan (sintesis) ACC dipacu oleh hormon AIA, dan ACC yang terbentuk akan diubah menjadi hormon etilen yang dalam jumlah besar menghambat pemanjangan (perkembangan) akar baru (Mullins, 1972).



Gambar 3. Mekanisme penurunan konsentrasi etilen dalam akar oleh RPTT untuk mencegah terjadinya proses penghambatan perkembangan (pemanjangan) akar tanaman (tanda ⊥ pada gambar = penghambatan) (Sumber: Shah *et al*., 1997)

Beberapa RPTT seperti *Pseudomonas* dan *Enterobacter* mampu menghasilkan enzim ACC *deaminase* yang berfungsi menghidrolisis ACC untuk mengurangi efek negatif hormon etilen (Glick, 1995; Shah *et al*., 1997). Gambar 3 menyajikan mekanisme penurunan konsentrasi etilen di dalam lingkungan akar. Pada Gambar 3, hormon AIA yang diproduksi oleh

mikroba di lingkungan rizosfir sebagian masuk ke dalam jaringan akar (proses kesetimbangan). Selain memacu perkembangan sel dan akar baru, hormon AIA di dalam jaringan akar juga merangsang pembentukan enzim ACC sintase yang berperan dalam sintesis ACC. Dalam proses kesetimbangan, sejumlah ACC yang terbentuk akan keluar dari akar yang selanjutnya dirombak oleh RPTT penghasil enzim ACC *deaminase* di lingkungan rizosfir menjadi amonia dan α-ketobutirat. Hidrolisis ACC (salah satu sumber N bagi RPTT) secara terus-menerus akan mengurangi jumlah ACC dan etilen di dalam akar, sehingga mengurangi pengaruh negatif etilen bagi perkembangan/pemanjangan akar tanaman.

Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa inokulasi tanaman oleh RPTT ACC *deaminase* seperti *Pseudomonas fluorescens* dan *Enterobacter cloacae* mampu meningkatkan pertumbuhan tanaman. Selain dapat mengurangi pengaruh negatif hormon etilen yang berlebihan, RPTT ini dalam beberapa kasus juga mampu menekan penyakit layu rebah (damping-off) pada bibit mentimum dan penyakit busuk akar pada tomat dan kentang (Wang *et al*., 2000). Tabel 6 dan 7 menyajikan data kemampuan RPTT ini meningkatkan pertumbuhan kanola (sejenis sawi atau kol) dan menekan penyakit layu rebah pada mentimum.

Tabel 6. Perbandingan pengaruh inokulasi beberapa *strain* RPTT terhadap panjang akar kanola (*Brassica compestris*) var. Express

Perlakuan (inokulasi *strain* RPTT)	Aktivitas ACC *deaminase*	Panjang akar			
		Percobaan I		Percobaan II	
		mm			
Pseudomonas fluorescens					
CHAO	-	52,6	A *	70,2	ab
CHAO/ACC	+	63,8	bc	78,1	C
CHA96	-	55,5	ab	69,3	ab
CHA96/ACC	+	64,3	C	77,9	C
Enterobacter cloacae					
UW4	+	59,6	abc	67,5	ab
CAL2	+	52,7	A	71,7	bc
MgSO4 (kontrol)	Tidak ada	51,9	A	65,0	A

Sumber: Wang *et al*. (2000)

* Huruf yang sama dibelakang angka pada lajur yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% LSD.

Tabel 7. Pengurangan dampak penyakit layu rebah (*damping-off*) pada bibit mentimun yang diinokulasi oleh *strain* RPTT penghasil ACC *deaminase* dan jamur patogen *Pythium ultimum* (Pu)

Perlakuan (Inokulasi *strain* RPTT dan jamur patogen *Pythium ultimum* = Pu)	Rata-rata tanaman yang hidup (selamat)		Berat tajuk basah	Berat akar Basah
	Jumlah	%	g	
Kontrol	4,00 a *	100	3,48 a	2,85 A
Pseudomonas fluorescens				
CHA0 + Pu	3,17 bc	79	2,11 b	0,95 C
CHA0/ACC + Pu	3,50 ab	87	2,27 b	1,27 B
CHA96 + Pu	1,50 d	37	0,85 d	0,34 D
CHA96/ACC + Pu	3,25 b	81	2,31 b	1,09 bc
Enterobacter cloacae				
UW + Pu	2,50 c	62	1,53 c	0,62 D
CAL2 + Pu	3,42 ab	85	2,25 b	1,10 bc
Pu (*Pythium ultimum*)	1,25 d	31	0,69 d	0,21 E

Sumber: Wang *et al*. (2000)

P. fluorescens CHA0 dan CHA96 tidak memiliki aktivitas ACC *deaminase*

* Huruf yang sama dibelakang angka pada lajur yang sama tidak berbeda nyata pada taraf 5% LSD.

Saat ini penelitian RPTT penghasil enzim ACC *deaminase* menjadi populer di kalangan peneliti karena selain terbukti mampu mengurangi pengaruh negatif etilen bagi pertumbuhan tanaman, beberapa RPTT ini juga memiliki kemampuan lain seperti melindungi tanaman dari berbagai cekaman lingkungan (genangan) dan memfasilitasi produksi senyawa organik volatil untuk fitoremediasi tanah-tanah tercemar logam berat (Glick, 2006; Wang *et al*., 2006).

Siderophore

Siderophore merupakan senyawa pengompleks Fe^{3+} atau peng-khelat besi spesifik yang dihasilkan mikroba untuk menyembunyikan unsur mikro besi di lingkungan rizosfir, sehingga unsur ini tidak tersedia bagi perkembangan mikroba patogen. Beberapa strain RPTT seperti *Pseudomonas fluorescens* B10 mampu menghasilkan *yellow-green florescent siderophores* (disebut pseudobactin) yang dapat menghambat perkembangan jamur patogen *Erwinia caratovora* penyebab busuk pada kentang (Subba-Rao, 1999). Persaingan antara RPTT dan mikroba patogen dalam mendapatkan

unsur besi berimplikasi pada pengendalian penyakit tular tanah (soilborne diseases) seperti penyakit layu rebah yang disebabkan oleh jamur *Pythium ultimum* dan busuk akar oleh jamur *Fusarium oxysporum* (Kloepper, 1993). Gambar 4 menyajikan kemampuan isolat RPTT melepaskan Fe yang jumlahnya terbatas pada media Fe-CAS agar (Alexander & Zuberer, 1991) dan menyembunyikannya dalam *siderophore*.

Gambar 4. Koloni isolat RPTT BS 58 yang berwarna oranye mengindikasikan kemampuan RPTT ini mensekresikan *siderophore* untuk melepaskan Fe dari Fe-CAS agar kompleks (Sumber: Husen, 2002)

Produksi *siderophore* oleh RPTT umumnya terjadi pada tanah-tanah bereaksi netral sampai basa dimana kelarutan Fe^{3+} rendah sehingga terjadi kondisi kekurangan unsur besi bagi tanaman dan mikroba. Namun dalam beberapa kasus, pengkhelatan Fe^{3+} dari mineral Fe-P dapat pula terjadi sehingga dapat meningkatkan ketersediaan P bagi tanaman (Mullen, 1998). Peran ganda RPTT penghasil *siderophore* ini dilaporkan oleh Reid *et al*. (1985) bahwa *hydroxamate siderophore* yang terdapat di rizosfir secara efektif dapat meningkatkan ketersediaan unsur Fe dan juga P pada tanah-tanah masam. Kemampuan pengkhelatan Fe pada tanah-tanah dengan kandungan Fe-fosfat yang tinggi berimplikasi pada penyediaan hara P bagi tanaman yang sekaligus dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap patogen.

Di Indonesia, pemanfaatan RPTT penghasil *siderophore* yang secara khusus dikembangkan sebagai inokulan komersial belum banyak diketahui. Namun kemungkinan adanya karakter fungsional ini dalam beberapa inokulan komersial bisa saja terjadi (tanpa disadari) yang tentu akan memberikan tambahan manfaat.

Kebutuhan dan arah penelitian

Pemanfaatan RPTT untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan hasil panen diramalkan akan menjadi tren baru dalam pertanian di masa depan. Hal ini karena semakin langkanya pupuk anorganik akibat terbatasnya sumber energi dan semakin pekanya masyarakat akan bahaya penggunaan senyawa agrokimia sintetis yang berlebihan yang terkait dengan keamanan pangan dan lingkungan. Dengan demikian, pemanfaatan RPTT dalam sistem budi daya pertanian akan menjadi salah satu pilihan, terutama untuk komoditas pertanian bernilai ekonomi tinggi dan *input* tinggi seperti sayuran dan buah-buahan.

Di negara-negara maju seperti di Amerika Serikat, RPTT sebagai ilmu pengetahuan sudah lama dikembangkan untuk menciptakan pertanian yang ramah lingkungan. Minat yang begitu tinggi diwujudkan dengan penelitian intensif berbagai karakter fungsional dan ekologi mikroba. Beberapa RPTT sudah dikomersialkan dan instrumen pengendalian mutu berserta lembaganya terus dikembangkan. Di Indonesia, penelitian RPTT penyedia hara, pemacu tumbuh, dan pengendali patogen juga sudah lama berkembang. Namun penelitian RPTT secara khusus dan terpadu masih sangat diperlukan untuk meningkatkan efektivitas pemanfaatannya di lapangan.

Tidak seperti senyawa agrokimia sintetis yang fungsi dan pengaruhnya relatif sama di berbagai kondisi tanah dan lingkungan, mikroba memiliki tanggap (respon) yang relatif berbeda untuk tiap rentang kondisi lingkungan yang berbeda (Glass, 1993). Beragamnya jenis dan karakteristik tanah, tingkat pengelolaan tanah, dan jenis tanaman yang diusahakan merupakan faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan dalam memilih dan mengembangkan suatu RPTT, sehingga RPTT yang dihasilkan benar-benar memiliki daya saing tinggi yang mampu hidup dan berkembang biak di berbagai lingkungan yang rentang kondisinya relatif lebar (beragam).

Karakteristik tanah di daerah tropika seperti di Indonesia sangat berbeda dengan tanah-tanah di daerah empat musim. Untuk itu, validasi dan modifikasi terhadap berbagai metode uji RPTT di laboratorium (termasuk media uji) yang diadopsi dari negara-negara yang kondisi tanahnya berbeda dengan di Indonesia perlu dilakukan untuk efektivitas pemanfaatannya di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

Abbas, Z. and Y. Okon. 1993. Plant growth promotion by *Azotobacter paspali* in the rhizosphere. Soil Biol. Biochem. 25: 1.075-1.083.

Alexander, D.B. and D.A. Zuberer. 1991. Use of chrome azurol S reagents to evaluate siderophore production by rhizosphere bacteria. Biol. Fertil. Soils 2: 39-45.

Arshad, M. and W.T. Frankenberger, Jr. 1993. Microbial production of plant growth regulators. p. 307-347. *In* F.B. Meeting, Jr. (Ed.). Soil Microbial Ecology. Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc. New York.

Balai Penelitian Tanah. 2005. Inventarisasi dan Pengelolaan Tanah. Laporan Tahunan 2004. Balai Penelitian Tanah, Bogor.

Bar, T. and Y. Okon. 1992. Induction of indole-3-acetic acid synthesis and possible toxicity of tryptophan in *Azospirillum brasilense* Sp7. Symbiosis 13: 191-198.

Beyeler, M., P. Michaux, C. Keel, and D. Haas. 1997. Effect of enhanced production of indole-3-acetic acid by the biological control agent *Pseudomonas fluorescens* CHA0 on plant growth. p. 310-311. *In* A. Ogoshi *et al*. (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, Present status and Future Prospects. Proceedings of the Fourth International Workshop on PGPR. Japan-OECD Joint Workshop. Sapporo, Japan. October 5-10, 1997.

Cattelan, A.J., P.G. Hartel, and J.J. Fuhrmann. 1999. Screening for plant growth-promoting rhizobacteria to promote early soybean growth. Soil Sci. Soc. Am. J. 63: 1.670-1.680.

Chan, E.C.S., H. Katznelson, and J.W. Rouatt. 1963. The influence of soil and root extracts on the associative growth of selected soil bacteria. Can. J. Microbiol. 9: 187-197.

De Freitas, J.R., M.R. Banerjee, and J.J. Germida. 1997. Phosphate-solubilizing rhizobacteria enhance the growth and yield but not phosphorus uptake of canola (*Brassica napus* L.). Biol. Fertil. Soils 24: 358-364.

Dosselaere, E., A.V. Broek, M. Lambrecht, P. De Troch, E. Prinsen, Y. Okon, V. Keijers, and J. Vanderleyden. 1997. Indole-3-acetic bisynthesis in *Azospirillum brasilense*. p. 306-309. *In* A. Ogoshi *et al*. (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, Present status and Future Prospects. Proceedings of the Fourth International Workshop on PGPR. Japan-OECD Joint Workshop. Sapporo, Japan. October 5-10, 1997.

Glass, D.J. 1993. Commercialization of soil microbial technologies. p. 595-618. *In* F.B. Meeting, Jr. (*Ed*.). Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc. New York.

Glick, B.R. 1995. The enhancement of plant growth by free-living bacteria. Can. J. Microbiol. 4: 109-117.

Glick, B.R. 2006. Protecting plants from the effects of ethylene using ACC deaminase-containing plant growth-promoting bacteria. Auburn University Web Site, Available: http://www.ag.auburn.edu/argentina/pdfmanuscripts/kloepper.pdf. [Accessed 30 June 2006].

Grayston, S.J., S. Wang, C.D. Campbell, and A.C. Edwards. 1998. Selective influence of plant species on microbial diversity in the rhizosphere. Soil Biol. Biochem. 30: 369-378.

Husen, E. 2002. Growth Enhancement of Hot Pepper (*Capsicum annuum* L.) by Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR). Master Thesis (Soil Science). University of The Philippines Los Banos. Philippines.

Husen, E. 2003. Screening of soil bacteria for plant growth promotion activities in vitro. Indonesian Journal of Agricultural Science 4(1): 27-31.

Husen, E. and R. Saraswati. 2003. Effect of IAA-producing bacteria on the growth of hot pepper. J. Mikrobiol. Indonesia 8(1): 22-26.

Husen, E. 2005. The use of *gusA* reporter gene to monitor the survival of introduced bacteria in the soil. Indonesian Journal of Agricultural Science 6(1): 32-38.

Imaseki, H. 1986. Ethylene. p. 249-264. *In* N. Takahashi (Ed.). Chemistry of Plant Hormones. CRC Press Inc. Boca Raton, Florida.

Kennedy, A.C. 1998. The rhizosphere and spermosphere. p. 389-407. *In* Silvia *et al*. (Eds.). Principles and Application of Soil Microbiology. Prentice Hall. New Jersey.

Kloepper, J.W. and M.N. Schroth. 1978. Plant growth promoting rhizobacteria on radishes. p. 879-882. *In* Angers (*Ed*.). Proceedings of the Fourth International Conference on Plant Pathogenic Bacteria.

Kloepper, J.W. and M.N. Schroth. 1981. Relationship in vitro antibiosis of plant growth promoting rhizobacteria on potato plant development and yield. Phytopathology 70: 1.078-1.082.

Kloepper, J.W., W. Mahaffee, J.A. Mcinroy, and P.A. Backman. 1991. Comparative analysis of isolation methods for recovering root-colonizing bacteria from roots. p. 252-255. *In* C. Keel, B. Koller, and G. Defago (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria - Progress

and Prospects. The Second International Workshop on PGPR. Interlaken, Switzerland, October 14-19, 1990.

Kloepper, J.W. 1993. Plant growth promoting rhizobacteria as biological control agents. p. 255-274. *In* F.B. Meeting, Jr. (*Ed*.). Soil Microbial Ecology, Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc. New York.

Lieberman, M. and A.T. Kunishi. 1972. Thoughts on the role of ethylene in plant growth and development. p. 549-560. *In* D.J. Carr (Ed.). Plant Growth Substances. Springer-Verlag New York.

Lifshitz, R., J.W. Kloepper, M. Kozlowski, C. Simonson, J. Carlson, E.M. Tipping, and I. Zaleska. 1987. Growth promotion of canola (rapeseed) seedlings by a strain of *Pseudomonas putida* under gnotobiotic conditions. Can. J. Microbiol. 33: 390-395.

Mayak, S., T. Tirosh, and B.R. Glick. 1997. The influence of plant growth promoting rhizobacterium *Pseudomonas putida* GR12-2. p. 313-315. *In* A. Ogoshi *et al*. (Eds.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, Present status and Future Prospects. Proceedings of the Fourth International Workshop on PGPR. Japan-OECD Joint Workshop. Sapporo, Japan. October 5-10, 1997.

Mullins, M.G. 1972. Auxin and ethylene in adventitious root. p. 526-533. *In* D.J. Carr (*Ed.*). Plant Growth Substances. Springer-Verlag New York.

Mullen, M.D. 1998. Transformation of other elements. p. 369-386. *In* Silvia *et al*. (Eds.). Principles and Application of Soil Microbiology. Prentice Hall. New Jersey.

Nelson, L.M. 2004. Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR): Prospects for New Inoculants. Online. Crop Management doi:10.1094/CM-2004-0301-05-RV. 2004, Plant Management Network.

Okon, Y and Y. Kapulnik, 1986. Development and function of *Azospirillum*-inoculated Roots. Plant and Soil 90: 3-16.

Reid, R. K., C.P.P. Reid, and P.J. Szaniszlo. 1985. Effect of synthetic and microbially produced chelates on the diffusion of iron and phosphorus to a simulated root in soil. Biol. Fertil. Soils 1: 45-52.

Rovira, A.D. 1965. Interactions between plant roots and soil micro-organisms. Annu. Rev. Microbiol. 19: 241-266.

Schroth, M.N., and J.G. Handcock. 1982. Disease-suppressive soil and root-colonizing bacteria. Science 216: 1.376-1.381.

Shah, S.J. Li, B.A. Moffatt, and B.R. Glick. 1997. ACC deaminase genes from plant growth promoting rhizobacteria. p. 320-324. *In* A. Ogoshi *et al*. (Ed.). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria, Present status

and Future Prospects. Proceedings of the Fourth International Workshop on PGPR. Japan-OECD Joint Workshop. Sapporo, Japan. October 5-10, 1997.

Sorensen, J. 1997. The rhizosphere as a habitat for soil microorganisms. p. 21-45. *In* J.E. Van Elsas, J.T Trevors, and E.M.H. Wellington (Eds.). Modern Soil Microbiology. Marcel Dekker, Inc. New York.

Subba-Rao, N.S. 1999. Soil Microbiology (Fourth Edition of Soil Microorganisms and Plant Growth). Science Publishers, Inc. USA.

Tenuta, M. 2006. Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Prospect for increasing nutrient acquisition and disease control. Available: http://www.umanitoba.ca/afs/agronomists_conf/2003/pdf/tenuta_rhizobacteria.pdf . [Accessed 22 July 2006].

Tien, T.M., M.H. Gaskins, and D.H. Hubell. 1979. Plant growth substances produced by *Azospirillum brasilense* and their effect on the growth of pearl millet (*Pennisetum americanum* L.). Appl. Environ. Microbiol. 37: 1.016-1.024.

Wall, L.G. 2006. Consequences of an overview on PGPR work in Argentina: The field should be wider. Auburn University Web Site, Available: http://www. ag.auburn.edu/argentina/pdfmanuscripts/ kloepper.pdf. [Accessed 30 June 2006].

Wang, C., E. Knill, B.R. Glick, and G. Défago. 2000. Effect of transferring 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid (ACC) deaminase gene into *Pseudomonas fluorescens* Strain CHA0 and its *gac*A derivative CHA96 on their growth-promoting and disease-suppressive capacities. Can. J. Microbiol. 46: 898-907.

Wang, C., E. Knill, B.R. Glick, and G. Défago. 2006. An ACC deaminase gene improves the growth-promoting and disease-suppressive capacities of *Pseudomonas fluorescens* Strain CHA0. Auburn University Web Site, Available: http://www.ag.auburn.edu/argentina/pdfmanuscripts/kloepper.pdf. [Accessed 30 June 2006].

10. ORGANISME PEROMBAK BAHAN ORGANIK

Rasti Saraswati, Edi Santosa, dan Erny Yuniarti

SUMMARY

Organic Matter-Decomposing Organisms. Limiting factors for microbial activities in soil environments is the availability of carbon substrate. Additonal carbon substrate into soils, for example, by incorporating plant residues would promote microbial regeneration, activities, and population. Therefore, addition of plant residues for the maintenance and increase of soil organic matter, particularly in dry lands, becomes very crucial. The fluctuation of microbial population is more related with plant residues, rather than soil management system. The relations between soil microbes as organic matter-decomposing agents and nutrient cycles in soils, and decomposition process are not quite understood. Better understanding of decomposition process and its implementation strategies for increasing organic matters, improving soil qualities and maintaining microbial diversity would lead us to agricultural sustainability. Utilization of organic matter-decomposing microorganisms suitable for particular soil conditions can become an inexpensive alternative to increase the efficiency of organic matter decomposition and fertilization, and soil fertility. Successful utilization is quite influenced by the quality of decomposed organic matter. The incompatability of inoculant with the organic matters inoculated and inefficient production technology system is one of the causes of the failure when applied in the field, so that quality decomposer is necessary. Contents of cellulose fibers on lignin in the residues of agricultural and plantation crops cause slow processes of decomposition and availability of soil organic matter. Decomposing process of organic matter in nature takes relatively longer time (3-4 months) quite impeding the efforts to sustain the use of organic matter in agricultural lands, especially when planting time to attain high production is pressing, often considering it not quite economical and inefficient. To overcome the problem, it is necessary to make alternative efforts to accelarate decomposition

process of organic matter. Utilization of organic matter-decomposing bioactivator (biodecomposer) suitable for particular organic matter sources, in addition to accelarating decomposing process and reducing volume of wastes, it is also suppressing spore germination, insect larvae, and weed seeds that inactivating pest and disease growth, even killing. By accelarating the decomposition of plant residues, increasing soil organic matter contents, and nutrient availability, it is hoped for shorter land preparation period, consequently increasing planting time, and subsequently increasing land productivity.

Di dalam ekosistem, organisme perombak bahan organik memegang peranan penting karena sisa organik yang telah mati diurai menjadi unsur-unsur yang dikembalikan ke dalam tanah (N, P, K, Ca, Mg, dan lain-lain) dan atmosfer (CH_4 atau CO_2) sebagai hara yang dapat digunakan kembali oleh tanaman, sehingga siklus hara berjalan sebagai-mana mestinya dan proses kehidupan di muka bumi dapat berlangsung, Adanya aktivitas organisme perombak bahan organik seperti mikroba dan mesofauna (hewan invertebrata) saling mendukung keberlangsungan proses siklus hara dalam tanah. Belakangan ini, mikroorganisme perombak bahan organik digunakan sebagai strategi untuk mempercepat proses dekomposisi sisa-sisa tanaman yang mengandung lignin dan selulosa, selain untuk meningkatkan biomassa dan aktivitas mikroba tanah, mengurangi penyakit, larva insek, biji gulma, volume bahan buangan, sehingga pemanfaatannya dapat meningkatkan kesuburan dan kesehatan tanah yang pada gilirannya merupakan kebutuhan pokok untuk meningkat-kan kandungan bahan organik dalam tanah.

Pengertian umum yang saat ini banyak dipakai untuk memahami organisme perombak bahan organik atau biodekomposer adalah organisme pengurai nitrogen dan karbon dari bahan organik (sisa-sisa organik dari jaringan tumbuhan atau hewan yang telah mati) yaitu bakteri, fungi, dan aktinomisetes. Perombak bahan organik terdiri atas perombak primer dan perombak sekunder. Perombak primer adalah mesofauna perombak bahan organik, seperti Colembolla, Acarina yang berfungsi meremah-remah bahan organik/serasah menjadi berukuran lebih kecil. Cacing tanah memakan sisa-sisa remah tadi yang lalu dikeluarkan sebagai faeces setelah melalui pencernaan dalam tubuh cacing. Perombak sekunder ialah mikroorganisme perombak bahan organik seperti *Trichoderma reesei, T. harzianum, T. koningii, Phanerochaeta crysosporium, Cellulomonas, Pseudomonas, Thermospora, Aspergillus niger, A. terreus, Penicillium, dan Streptomyces.* Adanya aktivitas fauna tanah, memudahkan mikroorganisme untuk memanfaatkan bahan organik, sehingga

proses mineralisasi berjalan lebih cepat dan penyediaan hara bagi tanaman lebih baik. Menurut Eriksson *et al*. (1989), umumnya kelompok fungi menunjukkan aktivitas biodekomposisi paling signifikan, dapat segera menjadikan bahan organik tanah terurai menjadi senyawa organik sederhana yang berfungsi sebagai penukar ion dasar yang menyimpan dan melepaskan nutrien di sekitar tanaman.

Mikroorganisme perombak bahan organik

Mikroorganisme perombak bahan organik merupakan aktivator biologis yang tumbuh alami atau sengaja diberikan untuk mempercepat pengomposan dan meningkatkan mutu kompos. Jumlah dan jenis mikroorganisme menentukan keberhasilan proses dekomposisi atau pengomposan. Proses dekomposisi bahan organik di alam tidak dilakukan oleh satu mikroorganisme monokultur tetapi dilakukan oleh konsorsia mikroorganisme. Beberapa jenis mikroorganisme yang umum ditemukan dalam tumpukan sampah tercantum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Mikroorganisme yang umum berasosiasi dalam tumpukan sampah

	Bakteri	Fungi
Mesofil		
	Pseudomonas spp.	*Alternaria* spp.
	Achromobacter spp.	*Cladosporium* spp.
	Bacillus spp.	*Aspergillus* spp.
	Flavobacterium spp.	*Mucor* spp.
	Clostridium spp.	*Humicola* spp.
	Streptomyces spp.	*Penicillium* spp.
Termofil		
	Bacillus spp.	*Aspergillus* dpp.
	Streptomyces spp.	*Mucor pusillus*
	Thermoactinomyces spp.	*Chaetomium thermophile*
	Thermus spp.	*Humicola lanuginosa*
	Thermonospora spp.	*Absidia ramosa*
	Microplyspora spp.	*Sprotricbum thermofphile*
		Torula thermophile (yeast)
		Thermoascus aureanticus

Beberapa jenis bakteri termasuk beberapa jenis aktinomiset juga mampu mendegradasi polimer selulosa, hemiselulosa, dan lignin, namun dengan kemampuan yang lebih rendah dibandingkan fungi. Bakteri terutama berperan pada degradasi polisakarida yang lebih sederhana.

Bakteri perombak bahan organik

Bakteri perombak bahan organik dapat ditemukan di tempat yang mengandung senyawa organik berasal dari sisa-sisa tanaman yang telah mati, baik di laut maupun di darat. Berbagai bentuk bakteri dari bentuk yang sederhana (bulat, batang, koma, dan lengkung), tunggal sampai bentuk koloni seperti filamen/spiral mendekomposisi sisa tumbuhan maupun hewan. Sebagian bakteri hidup secara aerob dan sebagian lagi anaerob, sel berukuran 1 µm - ≤ 1.000 µm. Dalam merombak bahan organik, biasanya bakteri hidup bebas di luar organisme lain, tetapi ada sebagian kecil yang hidup dalam saluran pencernaan hewan (mamalia, rayap, dan lain-lain). Bakteri yang berkemampuan tinggi dalam memutus ikatan rantai C penyusun senyawa lignin (pada bahan yang berkayu), selulosa (pada bahan yang berserat) dan hemiselulosa yang merupakan komponen penyusun bahan organik sisa tanaman, secara alami merombak lebih lambat dibandingkan pada senyawa polisakarida yang lebih sederhana (amilum, disakarida, dan monosakarida). Demikian pula proses peruraian senyawa organik yang banyak mengandung protein (misal daging), secara alami berjalan relatif cepat.

Fungi perombak bahan organik

Fungi terdapat di setiap tempat terutama di darat dalam berbagai bentuk, ukuran, dan warna. Pada umumnya mempunyai kemampuan yang lebih baik dibanding bakteri dalam mengurai sisa-sisa tanaman (hemiselulosa, selulosa, dan lignin). Umumnya mikroba yang mampu mendegradasi selulosa juga mampu mendegradasi hemiselulosa (Alexander, 1977).

Sebagian besar fungi bersifat mikroskopis (hanya bisa dilihat dengan memakai mikroskop); hanya kumpulan miselium atau spora yang dapat dilihat dengan mata. Tetapi fungi dari kelas Basidiomycetes dapat diamati dengan mata telanjang sehingga disebut makrofungi. Makrofungi menghasilkan spora dalam bangunan yang berbentuk seperti payung, kuping, koral atau bola, bahkan beberapa makrofungi tersebut sudah banyak dibudidayakan dan dimakan. Pertumbuhan hifa dari fungi kelas Basidiomycetes dan Ascomycetes (diameter hifa 5–20 µm) lebih mudah menembus dinding sel-sel tubular yang merupakan penyusun utama jaringan kayu. Pertumbuhan pucuk hifa maupun miselium (kumpulan hifa) menyebabkan tekanan fisik dibarengi dengan pengeluaran enzim yang melarutkan dinding sel jaringan kayu.

Residu tanaman terdiri atas kompleks polimer selulosa dan lignin. Perombakan komponen-komponen polimer pada tumbuhan erat kaitan-nya dengan peranan enzim ekstraseluler yang dihasilkan. Beberapa enzim yang

terlibat dalam perombakan bahan organik antara lain adalah β- glukosidase, lignin peroksidase (LiP), manganese peroksidase (MnP), dan lakase, selain kelompok enzim reduktase yang merupakan peng-gabungan dari LiP dan MnP yaitu enzim versatile peroksidase. Enzim-enzim ini dihasilkan oleh *Pleurotus eryngii*, *P. ostreatus*, dan *Bjekandera adusta* (Lankinen, 2004).

Selain mengurai bahan berkayu, sebagian besar fungi meng-hasilkan zat yang bersifat racun sehingga dapat dipakai untuk mengontrol pertumbuhan/perkembangan organisme pengganggu, seperti beberapa strain *Trichoderma harzianum* yang merupakan salah satu anggota dari Ascomycetes, bila kebutuhan C tidak tercukupi akan menghasilkan racun yang dapat menggagalkan penetasan telur nematoda *Meloidogyne javanica* (penyebab bengkak akar) sedangkan bila kebutuhan C tercukupi akan bersifat parasit pada telur atau anakan nematoda tersebut.

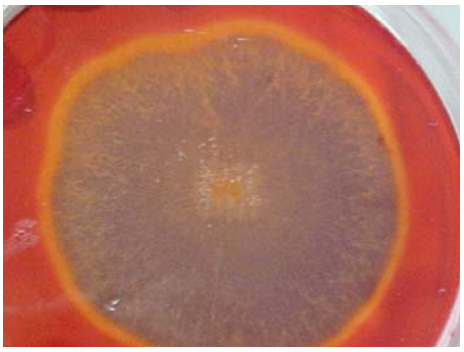
Residu tanaman mengandung sejumlah senyawa organik larut dalam air, seperti asam amino, asam organik, dan gula yang digunakan oleh mikroba untuk proses perombakan. Fungi dari kelas Zygomycetes (Mucorales) sebagian besar sebagai pengurai amilum, protein, dan lemak, hanya sebagian kecil yang mampu mengurai selulosa dan khitin. Beberapa Mucorales seperti *Mucor* spp. dan *Rhizopus* spp. mengurai karbohidrat tingkat rendah (monosakarida dan disakarida) yang dicirikan dengan perkecambahan spora, pertumbuhan, dan pembentukan spora yang cepat.

Aktivitas enzim selama proses pengomposan

Mikroorganisme di dalam tumpukan bahan organik tidak dapat langsung memetabolisme partikel bahan organik tidak larut. Mikroorganisme memproduksi dua sistem enzim ekstraselular; sistem hidrolitik, yang menghasilkan hidrolase dan berfungsi untuk degradasi selulosa dan hemiselulosa; dan sistem oksidatif, yang bersifat ligninolitik dan berfungsi mendepolimerasi lignin. Mikroorganisme memproduksi enzim ekstraseluler untuk depolimerisasi senyawa berukuran besar menjadi kecil dan larut dalam air (subtrat bagi mikroba). Pada saat itu mikroba mentransfer substrat tersebut ke dalam sel melalui membran sitoplasma untuk menyelesaikan proses dekomposisi bahan organik. Aktivitas enzim selulase menurunkan jumlah selulosa sekitar 25% selama sekitar tiga minggu. Aktivitas lipase, protease, dan amilase meningkat dan menurun selama tahapan pengomposan. Aktivitas semua enzim tersebut menurun tajam selama tahapan termofilik, yang kemungkinan disebabkan oleh inaktivasi panas. Denaturasi enzim sering dikorelasikan dengan kematian mikroba. Hal ini menunjukkan bahwa adanya mikroba dan aktivitas enzim dalam tumpukan kompos setelah tahapan termofilik disebabkan oleh introduksi ulang, pembalikan, ketahanan hidup mikroba di bagian luar, bagian dingin dari

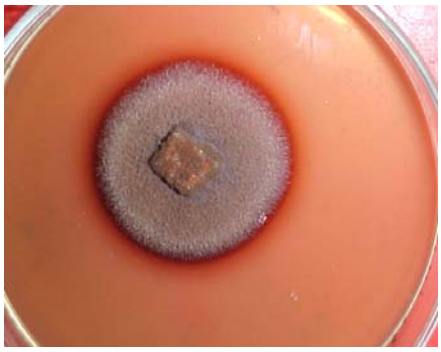
tumpukan kompos. Dari hal tersebut tampak pentingnya proses mikrobial dalam proses pengomposan, dan kecepatannya dapat diatur oleh berbagai faktor yang mempengaruhi keterlibatan mikroba dalam proses. Ketidakcocokan substrat, kelembapan, atau suhu kompos di luar rata-rata, dan problem difusi oksigen ke dalam kompos merupakan faktor pembatas dalam proses pengomposan.

Penampilan fungi perombak selulosa (selulolitik) pada medium carboxymethyl cellulose (CMC)-agar dan fungi perombak lignin (lignolitik) pada medium lignin-guaicol-benomyl-agar ditampilkan pada Gambar 1 dan 2. Enzim selulase sangat aktif memutuskan turunan selulosa dapat larut (selulosa amorf) seperti CMC menghasilkan selodekstrin (6 C), selobiosa (4 C) dan glukosa (2 C). CMC-ase merupakan salah satu komponen kompleks enzim selulase yang menyerang secara acak bagian dalam struktur selulosa. Aktivitas CMC-ase koloni fungi selulolitik pada media CMC-agar membentuk zona bening di bawah dan sekitar koloni. Koloni fungi yang menunjukkan aktivitas degradasi lignin membentuk zona berwarna merah di bawah dan sekitar koloni karena adanya quinon yang merupakan produk oksidasi guaicol akibat aktivitas lakase atau peroksidase (LiP, MnP) (Thorn *et al.,* 1996). Aktivitas enzim secara kualitatif dinilai dari intensitas warna merah dan semikuantitatif dinilai dari rasio diameter zona bening atau zona merah terhadap diameter koloni fungi uji dibandingkan fungi *reference*.



Gambar 1. Fungi perombak selulosa, *Chaetomium* sp.

Foto: Rasti Saraswati



Gambar 2. Fungi perombak lignin, *Trametes* sp.

Foto: Rasti Saraswati

Mesofauna perombak bahan organik

Sebagian invertebrata berperan dalam perombakan bahan organik tanah, merupakan hewan (fauna) yang tidak mempunyai tulang belakang yang seluruh atau sebagian siklus hidupnya berada dalam tanah. Hewan

tersebut meliputi kelas Gastropoda, Oligochaeta, dan Hexapoda (Insecta). Sebagian besar anggota subkelas Pterigota (bersayap) dari kelas Insecta, hanya stadium telur dan larva yang hidup dalam tanah, sedangkan pada stadium dewasa berada di luar lingkungan tanah. Sebaliknya anggota dari subkelas Apterigota (tidak bersayap) seluruh siklus hidupnya berada dalam tanah. Berdasarkan ukuran tubuh, fauna tanah dibedakan menjadi makrofauna (> 10,4 mm), mesofauna (0,2–10,4 mm), dan mikrofauna (< 0,2 mm) (Richards, 1974). Aktivitas makro-mesofauna tanah tertentu menyediakan nutrisi berupa koloid organik tanah yang dibutuhkan makro-mesofauna tanah lainnya (misal: cacing). Selain hal tersebut aktivitas fauna tanah menyebabkan fraksinasi bahan organik yang berukuran kasar menjadi serpihan yang lebih halus sehingga luas permukaan jenis bahan organik tersebut menjadi lebih besar yang berarti memberi kemungkinan mikroba tanah kontak dengan bahan organik tersebut lebih besar. Selain mendekomposisi bahan organik, fauna tanah juga berperan dalam mendistribusikan bahan organik dalam tanah, meningkatkan kesuburan dan memperbaiki sifat fisik tanah. Invertebrata dekomposer yang penting meliputi cacing tanah dan Collembola.

Cacing tanah. Cacing tanah tergolong dalam famili Lumbricidae dari ordo Oligochaeta, terdapat di berbagai ekosistem, ukuran tubuh 0,6–60 cm. Berdasarkan cara dan tempat hidupnya cacing tanah dibedakan atas: (1). Epigaesis: cacing tanah yang hidup dan hanya makan serasah organik di permukaan tanah, disebut pula sebagai *litter feeder* (pemakan serasah) (Gambar 3); (2). Anazeisis: cacing tanah yang hidup di dalam tanah (horizon A-C) tapi makan dipermukaan tanah (Gambar 4); dan (3). Endogaesis: cacing tanah yang hidup dan makan bahan organik di dalam tanah, cacing ini bersifat *geophagus*/pemakan tanah (Blakemore, 2000). Sedangkan cacing tanah yang hidup di tanah berlumpur sebagai *limiphagus* (pemakan tanah lumpur/subur).

Aristoteles menyebut cacing tanah sebagai *intestines of the earth* (usus bumi) (Tomlin, 2006) karena peranannya sangat penting dalam mencerna dan mendekomposisi sisa tanaman yang telah mati sehingga sisa tanaman atau limbah organik lainnya tidak menumpuk. Tanaman yang telah mati oleh cacing tanah dicerna dan diubah menjadi humus dan nutrisi alami. Humus sangat besar peranannya dalam memperbaiki sifat tanah dan nutrisi alami dapat memicu terjadinya berbagai aktivitas mikroba tanah. Kadar unsur hara dalam *casting* (kotoran cacing) segar setara dengan lima kali N-tersedia, tujuh kali P-tersedia dan 11 kali K-tersedia pada kadar hara yang sama kompos biasa (http://en.wikipedia.org/wiki/earthworm#benefit). Oleh karena itu dengan adanya cacing tanah pertumbuhan/hasil tanaman dan kualitas lingkungan meningkat karena tanah menjadi lebih subur dan siklus unsur hara dapat berlangsung dengan lebih baik.

Gambar 3. Cacing epigaesis, *Eisenia* sp.
Foto: Ea Kosman Anwar

Gambar 4. Cacing anazeisis, *Pheretima* sp.
Foto: Ea Kosman Anwar

Collembola. Collembola merupakan salah satu ordo dari kelas Hexapoda (hewan berkaki enam) filum Arthropoda, berukuran 0,2–10 mm, bentuk tubuh bulat memanjang, tidak bersayap, dan mempunyai *furca* (semacam ekor) sebagai alat untuk meloncat (jarak loncatan 50–100 kali panjang tubuh (Gambar 5) (http://www.earthlife.net/insects/ collembo. Html; http://www.collembola.org). Keberadaannya tersebar di seluruh daratan termasuk di daerah Antartika. Sebagian besar hidup di lapisan atas tanah, semakin ke lapisan bawah populasinya semakin menurun hingga sampai di kedalaman 2 m. *Collembola* berperan dalam penghalusan sisa organik, mengontrol populasi bakteri dan fungi serta berperan dalam rantai makanan pada ekosistem lahan (http://tolweb.org/ tree?group= collembola& contgroup=hexapoda).

Gambar 5. Collembolla
Foto: Ea Kosman Anwar

Proses perombakan bahan organik

Proses biologi untuk menguraikan bahan organik menjadi bahan humus oleh mikroorganisme dikenal sebagai dekomposisi atau pengomposan. Aktivitas dasar mikroorganisme tanah sama seperti kehidupan lainnya, bertahan hidup melalui reproduksi. Mikroorganisme tanah menggunakan komponen residu tanaman sebagai substrat untuk memperoleh energi yang dibentuk melalui oksidasi senyawa organik, dengan produk utama CO_2 yang dilepas kembali ke alam, dan sumber karbon untuk sintesis sel baru. Dekomposisi atau pengomposan disebut juga sebagai respirasi mikroba atau mineralisasi, yang merupakan salah satu bagian dari siklus karbon.

Mikroorganisme umumnya berumur pendek. Sel yang mati akan didekomposisi oleh populasi organisme lainnya untuk dijadikan substrat yang lebih cocok daripada residu tanaman itu sendiri. Secara keseluruhan proses dekomposisi umumnya meliputi spektrum yang luas dari mikroorganisme yang memanfaatkan substrat tersebut, yang dibedakan atas jenis enzim yang dihasilkannya. Upaya kombinasi tersebut dapat mengubah karbon yang berada dalam berbagai bentuk senyawa organik menjadi ke bentuk oksidasi, yaitu CO_2. Salah satu bentuk produk transformasi adalah bahan organik tanah (humus).

Proses perombakan bahan organik dapat berlangsung pada kondisi aerob dan anaerob (Gaur, 1982). Pengomposan aerob merupakan proses pengomposan bahan organik dengan menggunakan O_2. Hasil akhir dari pengomposan aerob merupakan produk metabolisme biologi berupa CO_2, H_2O, panas, unsur hara, dan sebagian humus. Hasil akhir dari pengomposan anaerob terutama berupa CH_4 dan CO_2 dan sejumlah hasil antara; timbul bau busuk karena adanya H_2S dan sulfur organik seperti merkaptan (Haug, 1980).

Reaksi yang terjadi pada perombakan sistem aerobik:

Gula $(CH_2O)x + O_2 \longrightarrow x\,CO_2 + H_2O + E$
(Selulosa, hemiselulosa)

N-organik (protein) $\longrightarrow NH_4^+ \longrightarrow NO_2^- \longrightarrow NO_3^- + E$

Sulfur organik (S) $+ x\,O_2 \longrightarrow SO_4^{-2} + E$

Fosfor organik $\longrightarrow H_3BO_3 \longrightarrow Ca(HPO4)$
(Fitin, lesitin)

Reaksi utuh:

$$\text{Bahan organik} \xrightarrow{\text{aktivitas mikroorganisme}} CO_2 + H_2O + \text{hara} + \text{humus} + E \ (484\text{-}674 \text{ kcal/mol glukosa})$$

Pengomposan anaerob diartikan sebagai proses dekomposisi bahan organik tanpa menggunakan O_2. Reaksi yang terjadi pada perombakan sistem anaerobik:

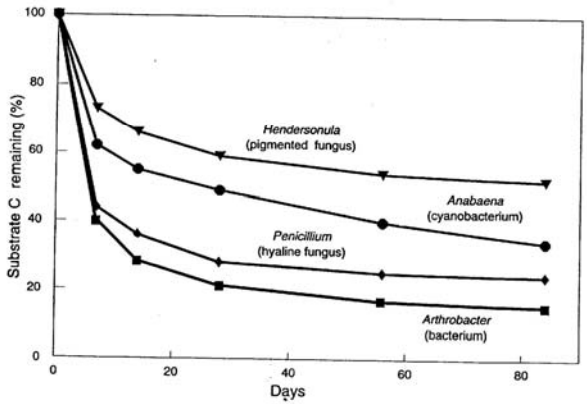
$$(CH_2O)\,x \xrightarrow{\text{bakteri penghasil asam}} x\,CH_3COOH \xrightarrow{\text{Methanomonas}} CH_4 + CO_2$$

$$\text{N-organik} \longrightarrow NH_3$$

$$2H_2S + CO_2 \longrightarrow (CH_2O)\,x + S + H_2O + E \ (26 \text{ kcal/mol glukosa})$$

Proses pengomposan terdiri atas tiga tahapan dalam kaitannya dengan suhu, yaitu mesofilik, termofilik, dan pendinginan. Tahap awal mesofilik, suhu proses naik ke sekitar 40^oC karena adanya fungi dan bakteri pembentuk asam. Suhu proses akan terus naik ke tahap termofilik antara 40-70^oC, bakteri termofilik Actinomisetes dan fungi termophilik. Pada kisaran suhu termofilik, proses degradasi dan stabilisasi akan berlangsung secara maksimal. Pada tahapan pendinginan terjadi penurunan aktivitas mikroba, penggantian mikroba termofilik dengan bakteria dan fungi mesofilik. Selama tahapan pendinginan, proses penguapan air dari material yang telah dikomposkan akan masih terus berlangsung, demikian pula stabilisasi pH dan penyempurnaan pembentukan asam humat (**http://www.std.ryu.titech.ac.jp**). Bahan akhir yang terbentuk bersifat stabil dan merupakan sumber pupuk organik.

Dalam proses perombakan bahan organik, sel mikroba yang mati merupakan sumber hara bagi tanaman dan substrat mikroorganisme yang hidup. Dinding sel fungi yang terdiri selulosa, khitin, dan khitosan, dan dinding sel bakteri yang terdiri atas asam N-acetylglucosamin dan N-acetylmuramic yang terkandung dalam peptidoglikan bersama dengan material polisakharida lainnya di degradasi dan merupakan substrat yang sangat baik bagi pertumbuhan mikroba. Kurva dekomposisi beberapa jenis mikroba ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva dekomposisi beberapa jenis mikroba

Proses perombakan bahan organik secara alami membutuhkan waktu relatif lama (3-4 bulan) sehingga sangat menghambat upaya pelestarian penggunaan bahan organik untuk lahan-lahan pertanian, apalagi jika dihadapkan dengan masa tanam yang mendesak untuk menghasilkan produksi tinggi, sehingga sering dianggap kurang ekonomis dan tidak efisien. Bahan dasar serasah tanaman, secara alami adalah selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Sebagian besar materi limbah organik Gumnospermae dan Angiospermae merupakan lignoselulosa dan hampir setengah materi lignoselulose merupakan senyawa selulose dan 15-36% adalah senyawa lignin (Eriksson *et al.*, 1989), serta hemiselulosa 25-30% dari total berat kering kayu (Perez *et al*., 2002). Degradasi lignin merupakan tahapan pembatas bagi kecepatan dan efisiensi dekomposisi yang berhubungan dengan selulosa (Thorn *et al*., 1996). Lignin berikatan dengan hemiselulosa dan selulosa membentuk segel fisik di antara keduanya, yang merupakan barier yang mencegah penetrasi larutan dan enzim (Howard *et al*., 2003). Kompleksitas struktur, bobot molekul yang tinggi, dan sifat ketidaklarutannya dalam air membuat degradasi lignin sangat sulit (Perez *et al*., 2002). Oleh karena itu lignin menjadi penghalang akses enzim selulolitik pada degradasi bahan berligno-selulose. Hal ini menghambat proses dekomposisi, yang pada akhirnya menyebabkan penumpukan limbah organik yang berdampak negatif bagi lingkungan. Polimer tersebut dapat didegradasi oleh beberapa macam mikroorganisme yang mampu memproduksi enzim yang relevan. Strategi untuk mempercepat proses biodekomposisi bahan organik dengan memanfaatkan mikroba lignoselulotik (dekomposer).

Pembuatan kompos dengan mikroba perombak bahan organik dapat dilakukan pada berbagai sumber bahan organik (Gambar 7).

Gambar 7. Berbagai bahan kompos dari residu tanaman pertanian
Foto: Rasti Saraswati

Penggunaan mikroba perombak bahan organik (dekomposer) pada jerami dapat mempercepat proses pengomposan hingga 2 minggu (Tabel 1). Percepatan perombakan sisa hasil tanaman meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan ketersediaan hara, sehingga masa penyiapan lahan dapat lebih singkat dan dapat memperbanyak masa tanam, yang pada akhirnya akan meningkatkan produksi tanaman.

Tabel 1. Kemampuan biodekomposer (BioDek) dalam merombak jerami

Hari ke-	C/N rasio
0	70,00
6	21,77
12	16,85
18	13,41
24	11,57

Gambar 8, 9, dan 10 menunjukkan proses pengomposan jerami dan sampah organik hasil pemilahan sampah kota Bantar Gebang. Hasil kompos dapat digunakan setelah proses pengomposan selama 2 minggu (C/N rasio 14).

Gambar 8. Proses pembuatan kompos jerami dengan menggunakan mikroba perombak bahan organik (BioDek) (Sukamandi, 2006)

Foto: Rasti Saraswati

Gambar 9. Pengomposan jerami, 2 minggu setelah inokulasi dengan BioDek (Sukamandi, 2006)

Gambar 10. Proses pembuatan kompos asal sampah organik-sampah kota dengan menggunakan BioDek (Bantar Gebang, 2005)

Foto: Rasti Saraswati

Teknik produksi inokulan perombak bahan organik

Isolasi mikroorganisme perombak bahan organik pada umumnya ditujukan terhadap bakteri atau fungi yang mempunyai kemampuan tinggi dalam peruraian lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Bakteri/fungi aerob diisolasi dari limbah pertanian yang sedang mengalami proses pembusukan.

Perbanyakan bakteri perombak lignin

Limbah organik yang membusuk diencerkan hingga 10^{-4}, setelah itu larutan pada pengenceran 10^{-4} tersebut digoreskan pada media indulin agar yang diberi fungisida (misal: xyclohexamide), kemudian diinkubasi pada suhu kamar selama 4–7 hari. Koloni yang tumbuh pada media tersebut diamati. Koloni yang tumbuh merupakan koloni bakteri yang mampu menggunakan senyawa lignin sebagai sumber enersi dan C. Warna merah tua ini disebabkan adanya lignase (ensim pemecah lignin) yang dihasilkan bakteri. Biakan murni dari isolat bakteri yang membentuk zona merah paling besar ditumbuhkan pada agar miring. Bakteri tersebut dipilih karena bakteri mempunyai kemampuan tinggi dalam menguraikan lignin. Masing-masing koloni yang tumbuh dimurnikan dan disimpan pada *refrigerator* bersuhu 5^{o}C sebagai sumber inokulum bakteri pengurai lignin. Untuk perbanyakannya bakteri ditumbuhkan dalam media indulin cair sebagai biakan pemula

(starter). Dalam perbanyakan skala besar, dapat dilakukan penerapan bioproses agar diperoleh inokulan yang bermutu dalam jumlah banyak. Inokulasikan starter pada fermentor sampai mencapai jumlah populasi di fase logaritmik.

Perbanyakan bakteri perombak selulosa

Limbah organik yang membusuk diencerkan hingga 10^{-4}, setelah itu larutan pada pengenceran 10^{-4} tersebut digoreskan pada media CMC-agar yang diberi fungisida (misal: xyclohe-xamide), kemudian diinkubasi pada suhu kamar selama 4-7 hari. Koloni yang tumbuh pada kedua media tersebut diamati. Koloni yang tumbuh di media CMC merupakan koloni bakteri yang mampu menggunakan senyawa selulosa sebagai sumber enersi (C-selulosa sebagai sumber C). Masing-masing koloni yang tumbuh dimurnikan dan ditumbuhkan di media CMC cair. Masing-masing biakan murni tersebut diencerkan menjadi 10^{-3}-10^{-5} dan kemudian ditanam pada media CMC agar dan diinkubasikan pada suhu kamar selama $\pm$ 4 hari. Setelah koloni tumbuh, cawan Petri digenangi *congo red* 1% beberapa saat, lalu setelah sisa pewarna yang tidak diserap media dibuang, dicuci dengan NaCl 1%. Zona bening (daerah yang tidak menyerap *congo red*) yang terbentuk di sekitar koloni diukur diameternya. Zona bening ini terbentuk disebabkan adanya selulosa (ensim pemecah selulosa) yang dihasilkan bakteri. Biakan murni dari isolat bakteri yang membentuk zona bening paling besar ditumbuhkan pada agar miring. Bakteri tersebut dipilih karena bakteri mempunyai kemampuan tinggi dalam menguraikan selulosa. Masing-masing koloni yang tumbuh dimurnikan dan simpan pada refrigerator bersuhu 5^oC sebagai sumber inokulum bakteri pengurai selulosa. Untuk perbanyakannya bakteri ditumbuhkan dalam media cair yang sesuai (misal: King's B atau *nutrient broth*) sebagai biakan pemula (starter). Dalam perbanyakan skala besar, dapat dilakukan penerapan bioproses agar diperoleh inokulan yang bermutu dalam jumlah banyak. Inokulasikan starter pada fermentor sampai mencapai jumlah populasi di fase logaritmik.

Perbanyakan fungi perombak lignin dan selulosa

Inokulan fungi dapat diperbanyak dalam bentuk miselium atau spora. Produk miselium diperoleh dengan menumbuhkan fungi pada media *potato dextrose agar* (PDA) kemudian diinkubasi pada suhu ruang (sekitar 28ºC) selama 5 hari hingga spora banyak. Stok ini kemudian disimpan dalam pendingin agar pertumbuhan terhenti, dan stok ini dapat dipakai sewaktu-waktu untuk pembuatan starter. Starter ditumbuhkan pada media PDA, agar didapatkan inokulum yang sehat, aktif, tersedia spora dalam jumlah yang mencukupi dan mampu berproduksi seperti yang diharapkan.

Kultur tersebut kemudian diinkubasikan pada suhu ruang selama ± 5 hari sampai spora mencukupi. Kemudian propagul (miselium beserta konidia/spora) yang telah banyak tersebut dilarutkan dalam air steril secara aseptik hingga mencapai jumlah 0,5-1 x 10^7 propagul per liter. Starter inokulan fungi sebanyak 5% ditumbuhkan dalam fermentor *airlift* 30 l dengan volume kerja 10 l dan kultivasi dengan sistem *batch.* Produk inokulan spora diencerkan dengan air steril dengan jumlah spora tertentu sesuai dengan kebutuhan.

Pembuatan produk inokulan mikroba perombak bahan organik

Inokulasi mikroba pada bahan pembawa merupakan salah satu tahap akhir yang penting dalam keseluruhan proses produksi. Produk inokulan bakteri dan fungi akan dikemas dalam bahan pembawa, seperti gambut, arang atau batu bara yang dihaluskan (lolos saring 500 μm). pH media pembawa tersebut dibuat mendekati netral, dengan jalan jika pH agak masam diberi kapur. Kemudian media pembawa tersebut diisikan ke dalam kantong plastik tahan panas sebanyak 100, 200, 250, atau 500 g (sesuai yang diinginkan) dan ditutup dengan rapat. Kemudian bahan tersebut disterilisasi dengan cara: (1) otoklaf bertekanan 2 lb dan suhu ± 120^o C, lalu diamkan selama 24 jam dan sekali lagi disterilisasi dengan cara yang sama dan (2) radiasi sinar γ setara 50 kGy (pekerjaan ini bisa dilakukan hanya di BATAN). Setelah bahan pembawa steril siap, inokulasikan dengan inokulan perombak bahan organik dengan memakai alat penyuntik steril secara aseptik dengan kelembapan bahan pembawa 30%. Lubang yang terbentuk dari alat suntik tersebut ditutup dengan selotip, dengan demikian maka pembuatan inokulan telah selesai. Inokulan baru bisa dipakai setelah diinkubasi ± 2 minggu. Hal ini untuk memberi kesempatan pada bakteri untuk penyesuaian dan berkembang biak dalam media pembawa.

Cacing tanah

Pemeliharaan cacing tanah biasanya ditujukan untuk menghasil-kan cacing sebagai sumber protein maupun keperluan lain ataupun untuk mengatasi masalah pemanfaatan limbah pertanian. Cara pembibitan, pemeliharaan dan pemanenan hasil produksi cacing tanah tergantung dari jenis dan cara hidupnya, bisa skala kecil (rumah tangga) maupun skala besar (pabrikan).

Cacing epigaesis

Sebagai contoh: *Eisenia foetida:* Cacing ini bertubuh silindris, panjang tubuh 35–130 mm dengan diameter 3-5 mm, berwarna merah atau merah kecoklatan-kehitaman, aktif bergerak, hidup pada suhu 8-48^o C,

produksi kokon ± 900 kokon tahun^{-1} ekor^{-1}, setiap kokon berisi 5-15 ekor anakan, umur mencapai 4-5 tahun (http://www.sarep.ucdavis.edu/worms/profile5.htm).

Mula-mula dibuat nampan/kotak plastik atau kotak kayu ukuran 60 cm x 40 cm x 30 cm. Kotak-kotak pemeliharaan diletakkan di tempat yang terlindung dari gangguan semut, cicak maupun tikus tanah. Kotak tersebut diisi dengan campuran kotoran ternak dengan serasah daun setebal ± 15 cm, disirami sehingga cukup lembap dan dibiarkan 2–3 hari. Bibit cacing *Eisenia foetidas* dimasukkan sebanyak 150–200 ekor. Untuk menghindari penguapan dan terlalu banyak sinar yang masuk, kotak ditutup dengan kain/kertas berwarna gelap. Pemberian pakan berupa limbah dapur (sisa nasi, roti, sayur, kulit buah selain jeruk, dan lain-lain), limbah pertanian (potongan rumput, jerami, batang jagung, serasah daun, dan lain-lain), ataupun kotoran ternak (sapi, kambing, ayam, dan lain-lain) dilakukan setiap hari sebanyak 0,5 berat cacing (1 kg ~ ± 2.000 ekor) yang dipelihara. Apabila terjadi ketidaksesuaian antara kondisi media pemeliharaan dengan kebutuhan cacing maka cacing akan berusaha untuk keluar dari kotak pemeliharaan. Kelembapan terlalu tinggi, disebabkan kadar air pada pakan yang biasa diberikan terlalu tinggi sehingga kadar air pakan perlu dikurangi (pakan dianginkan). Sebaliknya jika kelembapan terlalu rendah maka pakan yang diberikan dibasahi lebih dahulu. pH terlalu asam biasanya disebabkan sumber makanan terlalu banyak mengandung gas (atsiri) misalnya kulit jeruk, daun cengkeh, daun kayu putih, dan lain-lain. Oleh karena itu pakan dari bahan-bahan tersebut perlu dihindari. Biasanya jika terlalu banyak pemberian pakan maka banyak pakan yang tersisa dan media pemeliharaan menjadi terlalu basah, menyebabkan kadar O_2 dalam media berkurang. Jika hal ini terjadi maka pemberian pakan dihentikan dan kotak pemeliharaan dianginkan hingga bau tak sedap berkurang/hilang. Pemberian pakan dari daging, makanan berlemak/-berminyak, biji-bijian yang utuh, lilin, dan plastik harus dihindari. Pemanenan cacing dapat dilakukan setelah kotak pemeliharaan sudah penuh, dengan jalan menumpuk/meninggikan bagian vermikompos yang telah jadi sedemikian rupa sehingga cacing akan bergerak ke bawah. Setelah vermi-kompos dan cacing terpisah maka vermikompos diambil dan dipindahkan ke tempat yang telah disiapkan lebih dahulu. Dengan mengulangi cara tersebut, sedikit demi sedikit maka vermikompos atau cacing dapat dipanen

Cacing anazeisis

Sebagai contoh adalah: *Pheretima hupiensis*: Cacing ini bertubuh silindris, panjang tubuh 45–150 mm dengan diameter 3-6 mm, berwarna hitam kemerahan-kecoklatan, kurang aktif bergerak, hidup pada suhu 27-33^{o}C, produksi kokon ± 100 kokon tahun^{-1} ekor^{-1}, setiap kokon berisi 1-3 ekor anakan, umur mencapai 4-5 tahun (Anwar *et al*., 2004).

Mula-mula dibuat kotak ukuran: 100 cm x 60 cm x 45 cm atau drum bekas berdiameter 60 cm dengan tinggi 45 cm. Dinding di sebelah dalam dilumuri aspal atau plinkut. Kotak-kotak pemeliharaan diletakkan di tempat yang terlindung dari gangguan semut, cecak maupun tikus tanah. Tanah berlempung atau tanah porus ditambah bahan organik (sisa tanaman atau kotoran ternak) dengan perbandingan berat tanah: bahan organik = 3:1 atau 4:1 dicampur merata. Penggunaan tanah pasir atau tanah liat harus dihindari. Kemudian media tanah tersebut dimasukkan ke dalam kotak hingga ketebalan 25-30 cm, dibasahi hingga rata tetapi jangan sampai becek (kelembapan tanah 60-70%). Setelah didiamkan selama 5-7 hari dimasukkan bibit cacing *Pheretima hupiensis* sebanyak 150–200 ekor. Untuk menghindari penguapan dan terlalu banyak sinar yang masuk, kotak ditutup dengan kain/kertas berwarna gelap. Pemberian pakan berupa limbah dapur (sisa nasi, roti, sayur, kulit buah selain jeruk, dan lain-lain) atau campuran limbah pertanian (potongan rumput, jerami, batang jagung, serasah daun, dan lain-lain) dengan kotoran ternak (sapi, kambing, ayam, dan lain-lain) sebanyak 0,5-1 kg dilakukan secara periodik 1-2 kali/minggu. Pemberian pakan terlalu banyak akan menyebabkan media cacing terkontaminasi, sehingga akan menghambat pertumbuhan dan perkembangan cacing. Melalui pemberian pakan, kelembapan media tanah dipertahankan yaitu jika media kurang lembap maka pakan yang diberikan dibasahi dulu hingga serupa bubur tetapi jika media terlalu basah maka pakan yang diberikan relatif lebih kering (buangan dapur yang terlalu basah ditiriskan lebih dahulu). Tempat pemeliharaan sebaiknya bersuhu 28-32^{o} C. Kokon dan cacing anakan lahir setelah 5-6 minggu. Pemanenan dapat dilakukan dengan membongkar lapisan atas media pemeliharan, pisahkan antara cacing dan vermikompos yang terbentuk, upayakan lapisan bawah ($\pm$ 20 cm) tetap utuh.

Collembolla

Pengambilan Collembola dapat dilakukan dari berbagai agro-ekosistem (pertanian lahan kering, lahan sawah, padang penggembalaan, pekarangan, dan lain-lain) di tempat yang banyak serasah. Kotak berukuran 25 cm x 15 cm x 10 cm disiapkan, diisi gipsum ($CaSO_4.2H_2O$) yang telah dipanaskan setebal $\pm$ 5 mm dan ditambahkan butiran arang, dicampur tanah hingga ketebalannya mencapai $\pm$15 mm. Kemudian diperciki air sedemikian rupa sehingga media pembibitan/pemeliharaan tersebut cukup lembap tetapi tidak tergenang. Individu Collembola diambil satu per satu dengan memakai alat hisap, kemudian dimasukkan ke dalam botol koleksi yang telah disiapkan lebih dahulu. Hewan yang telah terkumpul dibawa ke laboratorium dan dengan mikroskop binokuler, spesies yang sama (Collembola yang

mempunyai morfologi sama) disatukan pada tempat (botol bekas selai) yang telah disiapkan sebelumnya. Pemberian pakan dilakukan 1-2 kali/minggu berupa campuran butiran ragi dan serasah daun/sisa tanaman. Kelembapan selalu dipertahankan dengan cara memerciki air secara berkala 2–3 kali/minggu.

DAFTAR PUSTAKA

Anwar, E.K., P. Kabar, A. Kentjanasari, dan E. Somantri 2004. Pemanfaatan Cacing Tanah untuk Meningkatkan Produktivitas Tanah Lahan Kering. Laporan Akhir. Bagian Proyek Peneltitian Sumberdaya Tanah. Proyek Pengkajian Teknologi Partisipatif. Balai Peneltian Tanah. Puslitbang Tanah dan Agroklimat. Badan Litbang Pertanian (Tidak dipublikasikan).

Alexander, M. 1977. Introduction to Soil Microbiology. New York: John Wiley and Sons.

Blakemore, R. 2000. Vermicology I. Ecological considerations of the earth worms used in vermiculture-a review of the species. http://bio-eco.eis.ynu.ac.jp/eng/database/earthworm/A%20series%20of%20 searchable%20texts/vermillennium%202000/vermicology%20I.pdf#search='vermicology'.

Eriksson, K.E.L., R.A. Blanchette, and P. Ander. 1989. Microbial and Enzymatic Degradation of Wood and Wood Components. Springer-Verlag Heildeberg. New York.

Gaur, A.C. 1982. A Manual of rural composting. *In* Improving Soil Ferftility Through Organic Recycling. Project Field Document No. 15. Food and Agricultural Organization of The United Nation, Rome.

Haug, R.T. 1980. Composting Engineering. Ann Arbor Science, Michigan.

Howard, R.L., E. Abotsi, J.V. Rensburg, and Howards. 2003. Lignocellulose biotechnology: issues of bioconversion and enzyme production. African Journal of Biotechnology 2: 602-619. http://www.vtt.fi/inf/pdf (25 Oktober 2005).

http://en.wikipedia.org/wiki/earthworm =benefit

http://tolweb.org/tree?group=collembola&contgroup=hexapoda

http://www.collembola.org

http://www.earthlife.net/insects/collembo.html

http://www.sarep.ucdavis.edu/worms/profile5.htm

http://www.std.ryu.titech.ac.jp

Lankinen, P. 2004. Ligninolytic enzymes of the basidiomycetous fungi *Agaricus bisporus* and *Phlebia radiata* on lignocellulose-containing media. Academic Dissertation in Microbiology. http://www.u.arizona.edu/~leam/lankinen.pdf [10 Desember 2005]

Perez, J., J. Munoz-Dorado, T. de la Rubia, and J. Martinez. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemi cellulose, and lignin: an overview. Int. Microbiol. 5: 53-63.

Richards, B.N. 1974. Introduction to the Soil Ecosystem. Longman. London and New York.

Thorn, R.G., C.A. Reddy, D. Harris, and E.A. Paul. 1996. Isolation of Saprophytic Basidiomycetes from soil. Appl. Environ. Microbiol. 62: 4.288-4.292.

Tomlin, D.A. 2006. Earthworm biology. http://www.wormdigest.org/index.php?option= com_content&task=view&id=200&Itemid=2

11. BAKU MUTU PUPUK ORGANIK

Didi Ardi Suriadikarta dan Diah Setyorini

SUMMARY

Quality standards of organic fertilizer. Current commercial organic fertilizers in Indonesia vary widely in their quality. Therefore, there is a strong need to have their quality standards in order to make benefits from their use.Through long and hard discussions between government institutions and private sectors, the concept of quality standard of organic fertilizer and soil amendment has finally led to the issuance of Peraturan Menteri Pertanian No. 02/Pert/HK.060/2/2006 on minimum technical requirements (quality standards) for organic fertilizer and soil amendment. These regulations include registration procedures, quality control system, testing laboratory, quality standards, and certification. Quality standards for solid organic fertilizers are as follows: organic C $\geq$ 12%, C/N ratio 10–25, inert materials $\leq$ 2% (gravel, splinter, and plastic), water contents (granule: 4-12%, curah 13–20%), heavy metal concentrations (As $\leq$ 10 mg kg^{-1},Hg $\leq$ 1 mg $kg^{-}1$, Pb < 50 mg kg^{-1}, and Cd $\leq$ 10 mg kg^{-1}), pH 4-8, P_2O_5 < 5%, K_2O <5%, and micronutrients (Zn max. 0,5%, Cu max 0,5%, Mn max. 0,5%, Co max. 0,002%, B max. 0,25%, Mo max. 0,001% , Fe 0,4%). The numbers of pathogens such as *E.coli,* and *Salmonella* sp. are just indicated on labels. For liquid organic fertilizer organic C should be less than $\geq$ 4,5%, no requirement for C/N ratio, inert materials and water contents remain the same as requirements for solid organic fertilizers, while the values for micronutrient concentrations are lower than those of solid organic fertilizers as follows: Zn max. 0,25%, Cu 0,25%, Mn 0,25%, Co 0,0005%, B max. 0,125%, Mo 0,0001%, and Fe 0,04%). Organic soil conditioners are distinguished from natural, organic, synthetic soil conditioners. Active ingredients as requirements are used for synthetic soil conditioners, cation exchange capacity (CEC) for mineral materials such as zeolit; pH and heavy metal concentrations.for organic soil conditioners.

Ketahanan pangan menduduki posisi penting dan strategis dalam menjaga stabilitas dan ketahanan nasional, oleh karena itu sektor pertanian berperan penting guna membangun sistem ketahanan pangan nasional yang tangguh berwawasan agribisnis. Upaya memenuhi kecukupan dan perbaikan kualitas pangan ditempuh melalui berbagai cara antara lain melalui perbaikan aksesibilitas petani terhadap pupuk, benih, dan permodalan.

Keberhasilan produksi pertanian melalui kegiatan intensifikasi tidak lepas dari kontribusi dan peranan sarana produksi pertanian, khususnya pupuk. Penerapan program pemupukan berimbang, selain meningkatkan produksi pangan dan produktivitas lahan pertanian dapat menghemat pupuk dan devisa negara.

Selama ini untuk mendukung pengembangan sektor pertanian khususnya subsektor tanaman pangan dan hortikultura pemerintah menyediakan dana untuk subsidi pupuk tunggal (urea, SP-36, ZA, dan KCl). Namun dengan memburuknya situasi perekonomian di Indonesia, pemerintah akhirnya menerapkan kebijakan penghapusan subsidi pupuk secara bertahap mulai tahun 1998. Akibat langsung setelah kebijakan subsidi pupuk dicabut adalah melonjaknya harga pupuk secara tidak terkendali, serta terjadinya kelangkaan pupuk saat awal musim tanam. Kondisi ini menyebabkan pemerintah melakukan upaya pengamanan dengan cara membuka keran impor bagi masuknya pupuk dari luar negeri, serta peluang bagi produsen pupuk untuk membuat pupuk pengganti. Langkah antisipasi ini ternyata berdampak sangat luas terhadap pengguna/petani dan distribusi pupuk di Indonesia. Sejak dicanangkannya kebijakan pintu terbuka bagi pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk selain urea, SP-36 dan KCl, telah banyak beredar berbagai jenis dan komposisi pupuk lokal dan impor yang dikenal dengan nama pupuk alternatif. Berdasarkan kandungan haranya, dikelompokkan menjadi: (1) pupuk anorganik; (2) pupuk organik; (3) bahan pembenah tanah; (4) pupuk pelengkap; dan (5) pupuk mikroba.

Menurut Yang (2001), pupuk organik dapat dibuat dari berbagai jenis bahan, antara lain sisa panen (jerami, brangkasan, tongkol jagung, bagas tebu, dan sabut kelapa), serbuk gergaji, kotoran hewan, limbah media jamur, limbah pasar, rumah tangga, dan pabrik, serta pupuk hijau. Oleh karena bahan dasar pembuatan pupuk organik sangat bervariasi, maka kualitas pupuk yang dihasilkannya beragam sesuai dengan kualitas bahan asal. Saat ini telah beredar berbagai jenis pupuk baru hasil rekayasa teknologi yang mutu dan kualitasnya sangat beragam dan belum teruji keefektifannya, oleh karena itu pengguna perlu teliti dan hati-hati dalam memilih jenis pupuk yang akan dipakai sesuai dengan komoditas yang akan ditanam.

Tabel 1. Sumber bahan dan bentuk pupuk organik yang umum digunakan di Indonesia

Sumber	Asal bahan	Bentuk
Pertanian	- Pangkasan tanaman legum	- Padat
	- Sisa hasil panen tanaman	- Padat
	- Limbah ternak besar	- Padat dan cair
	- Limbah ternak unggas	- Padat
	- Kompos	- Padat
Nonpertanian	- Limbah organik kota	- Padat dan cair
	- Limbah penggilingan padi	- Padat dan cair
	- Limbah organik pabrik gula	- Padat dan cair
	- Limbah organik pabrik kayu (serbuk gergaji)	- Padat
	- Gambut (abu bakar gambut)	- Padat
	- Limbah pabrik bumbu masak	Padat dan cair

Sumber: Kurnia *et al*., 2001

Komposisi hara dalam pupuk organik sangat tergantung dari sumbernya. Menurut sumbernya, pupuk organik dapat diidentifikasi berasal dari pertanian dan nonpertanian. Dari pertanian dapat berupa sisa panen dan kotoran ternak. Sedangkan dari nonpertanian dapat berasal dari sampah organik kota, limbah industri dan sebagainya. Pembagian sumber bahan dasar kompos secara lebih detail disajikan dalam Tabel 1. Bahan organik dari berbagai sumber ini sering dikomposkan terlebih dahulu untuk meningkatkan mutu gizinya.

Penggunaan pupuk organik yang dikomposkan dapat menimbulkan beberapa permasalahan, yaitu:

1. Harga kompos yang mahal. Di Korea, jika dibandingkan dengan harga nitrogen, harga kompos dapat mencapai 20 kali lebih mahal dibandingkan pupuk kimia. Meskipun petani tertarik dan mau menggunakan kompos, namun mereka tetap mencari kompos yang harganya murah meskipun kualitas juga rendah.
2. Ketidakseimbangan hara dalam kompos. Penggunaan bahan dasar tertentu mengakibatkan kandungan hara dalam kompos tidak seimbang. Contohnya di Korea banyak produsen menggunakan pupuk kandang yang dicampur dengan limbah cair dari industri, sehingga kompos ini mengandung P yang tinggi.
3. Penjualan kompos yang belum matang. Pemakaian kompos yang belum matang akan merusak pertumbuhan tanaman. Oleh karena itu indikator kematangan kompos harus menjadi salah satu kriteria.

4. Akumulasi garam dan pencemaran lingkungan. Akibat kadar hara yang tidak seimbang dalam kompos, maka terjadi akumulasi hara tertentu yang dapat berakibat buruk bagi tanaman dan lingkungan.
5. Pengawasan kualitas kompos. Untuk memonitor kualitas kompos, sejauh ini beberapa negara hanya menggunakan syarat kandungan logam berat dalam kompos, sedangkan kadar hara dalam kompos diabaikan.
6. Di Indonesia yang tergolong daerah tropis dengan curah hujan tinggi, memungkinkan perombakan bahan organik berjalan relatif cepat, sehingga pupuk organik diperlukan dalam jumlah besar. Hal ini menimbulkan kesulitan dalam pengangkutan dan penggunaannya, terlebih bila pupuk organik harus didatangkan dari tempat yang cukup jauh dari lahan usahanya, sehingga penggunaan pupuk organik ditingkat petani tanaman pangan masih sangat rendah.
7. Komposisi fisik, kimia dan biologi pupuk organik sangat bervariasi sehingga manfaatnya tidak konsisten dan umumnya tidak langsung. Penggunaan pupuk organik dengan bahan yang sama terus-menerus akan menimbulkan ketidakseimbangan hara, sehingga sering terjadi akumulasi hara K dan defisiensi Mg (Koshino, 1990). Penggunaan pupuk organik dengan C/N rasio tinggi dan belum matang dapat menimbulkan defisiensi N (Paje, 1990).

Pentingnya baku mutu pupuk organik

Pupuk organik merupakan pupuk yang berasal dari sisa tanaman, hewan atau manusia seperti pupuk kandang, pupuk hijau, dan kompos yang berbentuk cair maupun padat. Pupuk organik bersifat *bulky* dengan kandungan hara makro dan mikro rendah sehingga diperlukan dalam jumlah banyak. Keuntungan utama menggunakan pupuk organik adalah dapat memperbaiki kesuburan kimia, fisik dan biologis tanah, selain sumber hara bagi tanaman

Saat ini, pembuatan pupuk organik banyak dilakukan dalam skala industri karena minimnya tenaga kerja di pedesaan. Hanya sedikit petani yang dapat memproduksi kompos untuk memenuhi kebutuhannya. Sebagian petani membeli kompos dari pabrik lokal maupun kompos impor. Pemakaian pupuk organik akan semakin meningkat dari tahun ke tahun, maka sangat diperlukan regulasi atau peraturan mengenai persyaratan yang harus dipenuhi oleh pupuk organik agar memberikan manfaat maksimal bagi pertumbuhan tanaman dan disisi lain tetap menjaga kelestarian lingkungan.

Komposisi hara dalam sisa tanaman sangat spesifik dan bervariasi, tergantung dari jenis tanaman. Pada umumnya rasio C/N sisa tanaman bervariasi dari 80:1 pada jerami, gandum hingga 20:1 pada tanaman legum.

Sekam padi dan jerami mempunyai kandungan silika sangat tinggi namun berkadar nitrogen rendah. Sisa tanaman legum seperti kacang kedelai, kacang tanah, dan serbuk kayu mengandung nitrogen cukup tinggi. Sedangkan batang gandum, jagung mengandung kalium yang tinggi. Kandungan Ca tanaman yang tinggi dijumpai pada tanaman kedelai dan serbuk kayu (Tabel 2).

Tabel 2. Komposisi hara dalam tanaman

Tanaman	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Zn	Mn	B
			%					mg kg^{-1}		
Gandum	2,80	0,36	2,26	0,61	0,58	155	28	45	108	23
Jagung	2,97	0,30	2,39	0,41	0,16	132	12	21	117	17
Kc. tanah	4,59	0,25	2,03	1,24	0,37	198	23	27	170	28
Kedelai	5,55	0,34	2,41	0,88	0,37	190	11	41	143	39
Kentang	3,25	0,20	7,50	0,43	0,20	165	19	65	160	28
Ubi jalar	3,76	0,38	4,01	0,78	0,68	126	26	40	86	53
Jerami padi	0,66	0,07	0,93	0,29	0,64	427	9	67	365	-
Sekam	0,49	0,05	0,49	0,06	0,04	173	7	36	109	-
Bt. jagung	0,81	0,15	1,42	0,24	0,30	186	7	30	38	-
Bt.gandum	0,74	0,10	1,41	0,35	0,28	260	10	34	28	-
Serbuk kayu	1,33	0,07	0,60	1,44	0,20	999	3	41	259	-

Sumber Tan (1994)

Di Korea telah dibuat suatu peraturan mengenai kriteria kandungan logam berat dalam bahan dasar kompos yang akan digunakan, yaitu: (dalam mg kg^{-1}) As (<50), Hg (<2), Pb (<150), Cd (<5), Cu (<500), Cr (<300), Zn (<900), dan Ni (<50) (Myung and Lee, 2001). Seleksi ini penting dilakukan terutama untuk material kompos yang berasal dari sampah kota, industri makanan, tekstil, pembuatan oli, aki, dan lain-lain. Hasil yang dicapai dengan adanya peraturan ini sangat signifikan, karena saat itu banyak produsen pupuk organik yang ingin mencari keuntungan maksimal dengan menggunakan bahan dasar kompos yang kurang baik.

Kotoran hewan yang berasal dari usaha tani pertanian antara lain adalah ayam, sapi, kerbau, kambing, dan sebagainya. Komposisi hara pada masing-masing kotoran hewan sangat bervariasi tergantung pada jumlah dan jenis makanannya (Tabel 3). Secara umum, kandungan hara dalam kotoran hewan lebih rendah daripada pupuk kimia. Oleh karena itu aplikasi dari pemberian pupuk kandang ini lebih besar daripada pupuk anorganik.

Kandungan unsur kimia dan logam berat dari limbah cair industri sangat bervariasi tergantung jenis industri (Tabel 4). Limbah dari industri makanan relatif rendah logam beratnya, namun analisis kimia tetap perlu dilakukan untuk menjamin kualitas limbah. Limbah dari peternakan

mengandung sedikit logam berat sehingga dapat digunakan secara pupuk organik. Limbah dari industri oli dan minuman (beverages) mengandung logam berat cukup tinggi sehingga tidak direkomendasikan sebagai pupuk organik. Limbah dari industri alkohol mengandung N, P, K cukup tinggi dan sedikit logam berat sehingga sesuai untuk pupuk.

Tabel 3. Kandungan hara beberapa pupuk kandang

Sumber	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe
				%			
Sapi perah	0,53	0,35	0,41	0,28	0,11	0,05	0,004
Sapi daging	0,65	0,15	0,30	0,12	0,10	0,09	0,004
Kuda	0,70	0,10	0,58	0,79	0,14	0,07	0,010
Unggas	1,50	0,77	0,89	0,30	0,88	0,00	0,100
Domba	1,28	0,19	0,93	0,59	0,19	0,09	0,020

Sumber: Tan (1994)

Tabel 4. Kandungan beberapa unsur kimia pada beberapa limbah industri cair (*sludge*) dan limbah kotoran manusia

Sumber	Total-C	Total-N	P_2O_5	K_2O	Cu	Cr	Cd	Pb
	%				mg kg^{-1}			
Tekstil	30,83	3,73	1,51	0,29	269	411	1	35
Makanan	49,98	3,51	1,52	0,54	103	49	8	65
Peternakan	43,29	5,86	4,68	0,55	72	28	0,4	9
Kertas	30,67	0,48	0,17	0,30	111	42	3	42
Alkohol	38,43	4,28	1,18	0,99	128	24	0,4	67
Beverage	41,75	4,05	2,03	0,56	163	89	17	148
Oli	37,14	1,47	0,70	0,23	43	117	19	191
Kotoran manusia	32,26	2,27	7,31	0,35	138	43	3	67

Sumber: Myung dan Lee, 2001

Dalam rangka standarisasi mutu pupuk organik telah dilaksanakan survei pupuk organik di Jawa Tengah dan Jawa Timur untuk melihat proses produksi dan mengambil contoh pupuk. Contoh pupuk telah dianalisis di laboratorium penguji Balai Penelitian Tanah Bogor. Dalam rangka standarisasi pupuk organik ini telah diambil sebanyak 21 contoh pupuk organik, yang terdiri atas 19 contoh pupuk organik padat dan dua contoh pupuk organik cair. Hasil analisis sifat kimia pupuk organik disajikan pada Tabel 5 dan Tabel 6.

Tabel 5. Kandungan hara makro, C-organik, dan kadar air beberapa contoh pupuk organik

No	Jenis pupuk	N-total	P_2O_5	K_2O	C-organik	C/N rasio	Kadar air
				%			%
1.	Sp organik	0,06	10,96	0,06	5,06	84	13,28
2.	Kotoran ayam	1,17	1,87	0,38	7,16	6,1	13,01
3.	Pupuk organik KJD	0.97	2,08	1,21	9,85	10,1	25,34
4.	P-organik OCP	9,07	8,58	6,13	15,82	1,7	16,23
5.	Kompos AU	2,03	0,34	3,25	17,83	8,8	13,10
6.	Pelet	2,69	8,25	7,02	12,25	4,7	9,23
7.	Sipramin miwon	4,57	0,17	1,73	6,94	2,0	-
8.	PO semigrup	0,63	1,86	1,08	9,21	14,26	42,98
9.	P. raya cair	4,07	0,18	1,03	4,80	1,2	-
10.	Alfinase	0,81	4,47	1,09	19,02	23,5	22,54
11.	*Fine compost*	0,68	1,40	1,09	5,04	7,4	46,43
12.	P.raya padat	2,25	0,46	0,57	11,9	5,3	37,96
13.	Bokasi	0,73	0,62	1,0	9,39	12,9	43,86
14.	PO granula 1	6,57	4,76	3,9	20,2	3,1	13,79
15.	PO granula 2	6,08	4,9	4,3	21,2	4,3	11,25
16	Organik 3	0,18	11,04	0,39	4,56	25	31,84
17	Organik 4	1,54	7,34	0,41	10,3	7	40,9
18	Organik 5	1,89	1,9	0,27	12,89	7	57,1
19	Organik 6	0,61	0,3	0,09	4,11	7	26,58
20	Organik 7	1,38	0,2	0,09	6,28	5	34,24
21	Kompos	0.37	0,77	8,95	8,95	14	62,86

Sumber: Suriadikarta dan Setyorini (2005)

Tabel 6. Kadar hara mikro dan logam berat

No	Jenis pupuk	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Pb	Cd
					ppm			
1.	Sp organik	3.572	157	16	48	38	3	11
2.	Kotoran ayam	8.054	670	78	245	16	5	0,5
3.	Pupuk organik KJDP	5.420	396	181	185	24,3	3,2	1,2
4.	P-organik OCF	651	979	106	209	19,2	5,3	0,6
5.	Kompos AU	6.518	703	84	196	4,1	7,9	td
6.	Pelet	9.525	1.837	149	122	9,5	5,5	1,0
7.	Sipramin miwon	215	17	3	10	15,3	0,8	td
8.	PO semigrup	13.275	805	137	46	20,4	1,2	0,8
9.	P. raya cair	217	22	4	13	19,2	td	td
10.	Alfinase	11.496	154	99	42	24,6	7,6	0,7
11.	*Fine compost*	8.927	678	50	145	35,7	5,4	td
12.	P. raya	4.083	148	11	124	21,4	td	td
13.	Bokashi	8.837	427	137	137	31,2	td	0,1
14.	Granula organik 1	5.316	357	78	107	32	6,2	1,3
15.	Granula organik 2	6.113	372	80	110	39	5,7	1,0
16.	Organik 3	39.228	3.457	990	565	23	18,5	1,5
17.	Organik 4	8.456	1.823	654	841	48	4,8	1,6
18.	Organik 5	6.762	896	110	215	38	4,3	0.1
19.	Organik 6	24.116	191	20	38	25	4,2	td
20.	Organik 7	3.682	24	23	33	18	1,5	td
21.	Kompos	5.569	301	18	41	22	2,2	td

Sumber: Suriadikarta dan Setyorini (2005)

Dari hasil survei tersebut (Tabel 5 dan Tabel 6) ada tujuh jenis pupuk yang mempunyai kadar C tinggi (>2%), tetapi C/N rasio rendah <10, dengan nilai terendah 1,7 dan tertinggi 8,8. Begitu pula kadar air sangat bervariasi dan banyak yang kadar airnya >25%. Bila dihubungkan dengan persyaratan minimal pupuk organik di Departemen Pertanian maka pupuk organik hasil survei hampir semuanya tidak masuk ke dalam kriteria pupuk organik, dan hanya satu jenis pupuk yang masuk ke dalam persyaratan itu. Pupuk lainnya akan lebih tepat digolongkan ke dalam pembenah tanah organik. Kualitas pupuk organik banyak ditentukan oleh bahan asalnya, sebagai contoh pupuk organik yang berasal dari guano kadar C rendah, C/N rasio juga rendah, tetapi kadar hara P dan kadar air bisa tinggi.

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembuatan pupuk organik yang dikomposkan adalah:

1. Kandungan air. Bila dibandingkan dengan pupuk anorganik, kadar air dalam pupuk organik sangat tinggi, oleh karena itu diperlukan proses pengeringan hingga mencapai kadar air 30-35%.
2. Bentuk pupuk. Bentuk pupuk kompos berkaitan dengan cara aplikasinya. Kompos berbentuk tepung akan sulit diaplikasikan karena mudah hilang menjadi debu. Banyak petani di Taiwan tertarik pada bentuk granular, sedangkan peneliti di Jepang mengembangkan formula baru dalam bentuk pelet untuk mempermudah penanganannya.
3. Kematangan kompos. Ada beberapa indikator kematangan kompos, antara lain C/N rasio, pH, KTK, warna, suhu, dan aroma kompos. Selama proses pengomposan bahan organik mentah mengalami proses perombakan oleh mikroorganisme berupa fungi dan bakteri. Suhu dalam tumpukan kompos (*hip*) akan meningkat sejalan dengan aktivitas dekomposisi, demikian pula kadar total karbon akan menurun sementara kandungan nitrogen meningkat. Pada akhir proses pengomposan dimana telah terbentuk kompos yang matang, suhu akan menurun, dan C/N rasio menurun. Pemakaian kompos yang kurang matang akan merugikan pertumbuhan tanaman karena pengaruh panas yang tinggi serta adanya senyawa yang bersifat fitotoksik.
4. Kombinasi bahan dasar kompos. Pabrik kompos di Asia pada umumnya memproduksi kompos dari beberapa macam bahan dasar seperti kombinasi antara limbah agroindustri dan kotoran ternak. Akibatnya, tipe dan kualitas kompos yang dihasilkan sering berubah-ubah sehingga menyulitkan produsen menstandarisasi produknya dan pemberian informasi dalam label yang tepat.

5. Bahan beracun. Masalah utama dalam produksi kompos adalah hadirnya logam/bahan beracun berbahaya bagi kesehatan manusia dan pertumbuhan tanaman. Bahan dasar kompos yang banyak digunakan dan mengandung bahan berbahaya adalah sampah kota dan limbah cair (sewage sludge). Logam berat yang sering terdapat dalam bahan tersebut adalah Cd, Pb, dan Cr (Tabel 6). Unsur-unsur ini akan terserap oleh tanaman dan termakan manusia dan akhirnya mengkontaminasi seluruh rantai makanan. Untuk kondisi di Indonesia kriteria tentang kandungan logam berat dalam pupuk organik ditentukan dalam Surat Keputusan Menteri Pertanian, Nomor 2, bulan Februari 2006.
6. Pupuk organik dapat membawa patogen dan telur serta serangga yang mengganggu tanaman. Pupuk kandang seringkali mengandung benih gulma atau bibit penyakit bagi manusia. Pupuk kandang juga mempunyai bau yang tidak enak bagi lingkungan, meskipun tidak beracun. Sedangkan pupuk hijau mungkin menimbulkan allelopati bagi tanaman pokok.
7. Kotoran ternak. Kotoran ternak yang dikomposkan menimbulkan masalah keracunan spesifik. Senyawa fitotoksik seperti asam lemak yang mudah menguap (volatile fatty acid) yang terbentuk bila kotoran ternak disimpan dalam kondisi anaerob. Aerasi yang baik serta pembalikan kompos secara teratur merupakan tindakan yang sangat penting. Kotoran ternak banyak mengandung bahan aditif yang berasal dari pakan ternak terutama jenis unggas.

Berdasarkan hal-hal tersebut, maka perlu dibuat suatu kriteria untuk menstandarisasi baku mutu dan pengawasannya. Pupuk organik yang dikomposkan dan digunakan secara *in situ* di lahan pertanian tidak memerlukan pengawasan dan pengaturan tertentu. Namun apabila kompos tersebut diproduksi dan diedarkan secara luas untuk dijual secara komersial, maka diperlukan suatu regulasi agar kompos yang diperjualbelikan tersebut memenuhi standar mutu yang dapat diterima. Negara-negara di Asia, masing-masing mempunyai peraturan pengawasan yang berbeda-beda.

Di Jepang, peraturan pemerintah hanya membatasi kadar maksimum yang diperbolehkan untuk logam berbahaya seperti Cd, Hg, dan As. Sedangkan untuk kualitas yang lain, pemerintah Jepang mengadopsi peraturan dari negara lain. Peraturan pemerintah di Filipina mensyaratkan kandungan hara dalam pupuk organik sebagai kriteria utama dimana pupuk organik harus mengandung minimum 7% nitrogen. Kompos yang mengandung N <7% digolongkan menjadi pembenah tanah dan bukan sebagai pupuk.

Di Amerika Serikat (AS), kriteria yang digunakan didasarkan pada risiko yang ditimbulkan bahan berbahaya terhadap kesehatan manusia. Nilai yang ditetapkan antar negara bagian di AS berbeda sesuai kondisi setempat, misalnya di Florida maksimum kadar Cd dalam kompos adalah 15 mg kg^{-1} dan Pb 500 mg kg^{-1}. Untuk logam yang sama, di Canada ditetapkan 3 mg kg^{-1} Cd dan 150 mg kg^{-1} Pb sedangkan di Korea 5 mg kg^{-1} Cd dan 150 mg kg^{-1} Pb (Prihatini, 2001).

Peraturan pemerintah tentang pupuk organik di Korea dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan bahan dasarnya, yaitu pupuk organik yang berasal dari residu tanaman dan hewan serta pupuk organik yang berasal dari produk samping suatu industri (by-product fertilizer). Kriteria yang ditetapkan untuk pupuk organik asli adalah total kandungan hara dalam pupuk, yang harus memenuhi syarat kadar N >6%, P_2O_5 >2%, dan K_2O >1%. Sedangkan untuk pupuk organik hasil samping, lebih menitikberat-kan pada kandungan bahan organik, dimana kompos harus mengandung bahan organik >25% dan maksimal logam dalam pupuk (dalam mg kg^{-1}) adalah As=50, Cd=5, Hg=2, Pb=150, Cr=300, dan Cu=500 (Myung and Lee, 2001).

Di Australia, *quality assurance services*, yaitu suatu lembaga yang berwenang untuk mengeluarkan standarisasi pupuk organik, juga mempunyai standar kualitas pupuk sebagai berikut: (1) kematangan kompos dengan C/N rasio $\leq$25; (2) bebas patogen; (3) bebas residu kimia seperti pestisida dan herbisida; (4) kadar logam berat; dan (5) mengandung hara makro dan mikro.

Food and Fertilizer Technology Center/FFTC (1997) secara umum telah mengusulkan persyaratan minimal untuk pupuk organik, yaitu:

1. Mencantumkan kadar kandungan hara, pH, EC
2. C/N rasio maksimal 20
3. Kandungan bahan organik maksimal 60%
4. Kandungan air maksimal 35%
5. Persentase bahan inert, seperti batu dan plastik
6. Dalam label harus dicantumkan lama pengomposan, kandungan logam berat, *germination test*, serta stabilitas suhu.

Sedangkan PERMI (2001, *dalam* Prihatini, 2001) mengusulkan persyaratan minimal pupuk organik yang beredar di Indonesia adalah:

1. Label kemasan harus mencantumkan jenis dan jumlah logam berat As, Cr, Cd, Pb, dan Hg.
2. Khusus pupuk organik dari sampah kota harus memperhatikan adanya bakteri *Bacillus, Escherichia coli,* dan *Salmonella.*
3. Pada penentuan *germination test*, menggunakan tanaman indikator jenis bayam yang tumbuhnya cepat dan berbiji kecil.
4. Mencantumkan kadar air pupuk, rasio C/N.

5. Mencantumkan informasi apakah pupuk organik tersebut pupuk organik murni atau semiorganik (diperkaya pupuk kimia), serta mencantumkan hasil analisis kimia dari pupuk tersebut.

Baku mutu pupuk organik

Upaya perlindungan terhadap konsumen/petani perlu dilaksanakan melalui mekanisme sistem pengawasan mutu di lapangan. Pengawasan dilakukan sejak tahap perencanaan formula pupuk, pengadaan hingga penyaluran pupuk di tingkat pusat maupun daerah. Hal ini dilakukan untuk menghindari penipuan dan pemalsuan pupuk serta menjamin mutu pupuk sesuai dengan yang tertera dalam label. Mengingat jenis dan mutu pupuk alternatif yang beredar dipasaran baik yang sudah terdaftar maupun yang tidak terdaftar jumlahnya sangat banyak, maka diperlukan persyaratan atau kriteria yang mengatur mutu dan kualitas pupuk anorganik, organik dan pembenah tanah. Untuk menjamin baku mutu pupuk organik dan pembenah tanah maka perlu ditetapkan baku mutu pupuk organik. Usaha pemerintah dalam melindungi konsumen/petani dari peredaran pupuk palsu maka pemerintah telah mengeluarkan PP No. 8 tahun 2001, tentang Pupuk Budidaya Tanaman. Dalam PP No. 8 tahun 2001, diatur standar mutu atau baku mutu pupuk dan uji keefektifan pupuk anorganik yang diproduksi di dalam negeri maupun impor dari luar negeri. Yang dimaksud pupuk anorganik adalah pupuk hasil proses rekayasa secara kimia, fisik dan atau biologis, dan merupakan hasil industri atau pabrik pembuat pupuk. Untuk mengatur Persyaratan dan Tata Cara Pendaftaran Pupuk Anorganik Menteri Pertanian telah mengeluarkan SK Mentan No. 9 tahun 2001. Dalam SK telah diatur mengenai: (1) persyaratan teknis minimal dan metode uji pupuk anorganik padat dan cair; (2) metode pengujian keefektifan pupuk anorganik; (3) ketentuan lulus uji keefektifan; (4) tata cara pelaporan uji keefektifan; serta (5) lembaga yang ditunjuk untuk melaksanakan pengujian mutu dan keefektifan pupuk. Permohonan pendaftaran pupuk anorganik disampaikan secara tertulis kepada Pusat Perizinan dan Industri Departemen Pertanian dengan menggunakan fomulir yang telah ditetapkan. Pengujian mutu pupuk di laboratorium dan uji keefektifan pupuk anorganik di lapangan dilakukan oleh lembaga penguji yang ditunjuk oleh Menteri Pertanian sebagaimana telah ditetapkan dalam SK Mentan No. 9 tahun 2001.

a. Pupuk organik

Pupuk organik adalah pupuk yang sebagian besar atau seluruh-nya terdiri atas bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, dan atau hewan yang telah mengalami rekayasa berbentuk padat atau cair yang digunakan

untuk memasok bahan organik, memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah (Peraturan Mentan, No. 2/Pert/HK.060/2/2006).

Berdasarkan hasil pembahasan para pakar lingkup Puslitbangtanak, Direktorat Pupuk dan Pestisida, IPB Jurusan Tanah, Depperindag, serta Asosiasi Pengusaha Pupuk dan Pengguna maka telah disepakati persyaratan teknis minimal pupuk organik seperti tercantum dalam Tabel 7.

Tabel 7. Persyaratan teknis minimal pupuk organik

No.	Parameter	Kandungan	
		Padat	Cair
1.	C-organik (%)	≥ 12	≥ 4,5
2.	C/N rasio	10 – 25	-
3.	Bahan ikutan (%) (krikil, beling, dan plastik)	≤ 2	-
4.	Kadar air (%):		
	-Granula	4 – 12	-
	-Curah	13 – 20	-
5.	Kadar logam berat		
	As (ppm)	≤ 10	≤ 10
	Hg (ppm)	≤ 1	≤ 1
	Pb (ppm)	≤ 50	≤ 50
	Cd (ppm)	≤ 10	≤ 10
6.	pH	4 - 8	4 - 8
7.	Kadar total		
	- P_2O_5 (%)	< 5	< 5
	-K_2O (%)	< 5	< 5
8.	Mikroba patogen (*E.coli, Salmonella*)	Dicantumkan	Dicantumkan
9.	Kadar unsur mikro (%)		
	Zn, Cu, Mn,	Maks 0,500	Maks 0.2500
	Co,	Maks 0,002	Maks 0,0005
	B	Maks 0,250	Maks 0.1250
	Mo	Maks 0.001	Maks 0,0010
	Fe	Maks 0,400	Maks 0,0400

* C-organik 7–12% dimasukkan sebagai pembenah tanah

Untuk mengetahui kesesuaian komposisi pupuk organik dengan persyaratan teknis minimal, perlu dilakukan pengujian mutu pupuk organik di laboratorium yang terakreditasi dan atau yang ditunjuk oleh Menteri Pertanian melalui SK Mentan. Seperti yang telah dilakukan dengan pupuk anorganik, maka syarat dan tata cara pendaftaran pupuk organik telah dituangkan dalam SK Mentan No. 2, tahun 2006.

Dalam persyaratan pendaftaran pupuk organik, dan pembenah tanah selain diperlukan pengujian mutu pupuk, juga diperlukan uji keefektifan yang dapat dilakukan di laboratorium, atau rumah kaca, dan atau di lapangan, walaupun peranan pupuk organik atau pembenah tanah

terhadap produktivitas tanah dan tanaman tidak bisa terlihat dalam waktu yang pendek (satu semusim) tetapi memerlukan waktu jangka panjang (2–3 musim tanam).

b. Pembenah tanah

Pembenah tanah didefinisikan sebagai bahan-bahan sintetis atau alami, organik atau mineral, berbentuk padat maupun cair yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah. Pembenah tanah sintetis adalah bahan pembenah tanah yang diproduksi secara rekayasa kimia dari bahan-bahan organik atau mineral yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah. Sedangkan pembenah tanah alami adalah pembenah tanah yang berasal dari bahan-bahan organik atau mineral yang diproduksi tidak dengan rekayasa kimia yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah. Pembenah tanah organik adalah pembenah tanah sintetis atau alami yang sebagian besar dari bahan organik yang berasal dari sisa tanaman, dan atau hewan yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah Selanjutnya pembenah tanah/mineral adalah pembenah tanah sintetis atau alami yang sebagian besar berasal dari bahan anorganik (mineral) yang dapat digunakan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah. Persyaratan ini telah dibahas oleh para pakar dari Puslitbangtanak, IPB dan Direktorat Pupuk dan Pestisida (Tabel 8), dan telah dicantumkan dalam SK Mentan, No. 2, Februari 2006.

Tabel 8. Persyaratan teknis minimal pembenah tanah

No.	Parameter	Kandungan
1.	Bahan aktif* (%) (sintetis)	Dicantumkan
2.	KTK** (cmol (+) kg^{-1})	≥ 80
3.	pH	4 – 8
4.	Kadar logam berat (ppm):	
	As (ppm)	< 10
	Hg (ppm)	< 1
	Pb (ppm)	< 50
	Cd (ppm)	< 10

* Khusus bahan yang direkayasa kimia

** KTK khusus zeolit

Baku mutu pembenah tanah telah dituangkan dalam SK Mentan Pertanian supaya mempunyai kekuatan hukum seperti yang telah dilakukan terhadap pupuk anorganik. Pembenah tanah perlu diuji standar mutunya dengan melakukan analisis contoh pembenah tanah tersebut pada

laboratorium tanah yang telah terakreditasi atau yang ditunjuk oleh Menteri Pertanian. Pembenah tanah tidak perlu uji keefektifannya di lapangan mengingat dampak terhadap produktivitas tanah dan tanaman tidak langsung, dan untuk mengetahui pengaruhnya diperlukan waktu jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

Food Fertilizer Technology Center (FFTC). 1997. Quality control for organic fertilizer. News Letter 117. Food and Fertilizer Technology Center, Taiwan, ROC.

Koshino, M. 1990. Present status of supply and demand of chemical fertilizers and organic amendments in Japan. Paper Presented at Seminar on the Use of Organic Fertilizers in Crop production, at Suweon, South Korea, 18-24 June 1990 (Unpublished).

Kurnia, U., D. Setyorini, T. Prihatini, S. Rochayati, Sutono, dan H. Suganda. 2001. Perkembangan dan Penggunaan Pupuk Organik di Indonesia. Rapat Koordinasi Penerapan Penggunaan Pupuk Berimbang dan Peningkatan Penggunaan Pupuk Organik. Direktorat Pupuk dan Pestisida, Direktorat Jendral Bina Sarana Pertanian, Jakarta, Nopember 2001 (Tidak dipublikasikan).

Myung Ho Un and Youn Lee. 2001. Evaluation of organic waste for composting and quality control of commercial composts in Korea. International Workshop on Recent Technologies of Composting and their Application (Unpublished).

Prihatini, 2001. Menuju “Quality Control” Pupuk Organik. 2001. Seminar Berkala PERMI di Balai Penelitian Tanaman Rempah dan Obat, Juli 2001 (Tidak dipublikasikan).

Paje, M.M. 1990. Organic fertilizers and crop production in the Philippines. Paper Presented at Seminar on the use of Organic fertilizers in crop production, at Suweon, South Korea, 18-24 June 1990 (Unpublished).

Suriadikarta, D.A. dan D. Setyorini. 2005. Laporan Hasil Penelitian Standar Mutu Pupuk Organik. Balai Penelitian Tanah, Bogor.

Tan, K.H. 1994. Environmental Soil Science. Manual Dekker INC. New York 10016. USA.

Yang, S.S. 2001. Recent advances in composting. *In* the Proceeding of Issues in the Management of Agricultural Resources. Food & Fertilizer Technology Center, Taiwan, ROC.

12. BAKU MUTU PUPUK HAYATI DAN SISTEM PENGAWASANNYA

R.D.M. Simanungkalit, Edi Husen, dan Rasti Saraswati

SUMMARY

Quality standards and control of biofertilizers. Quality standards are generally available now in the world only for single biofertilizer rhizobia, while those for compound biofertilizer are not available yet. At the beginning only single biofertilizers were available in Indonesia, however, in the last few years it tends to produce compound biofertilizers. Basically quality control is designed to protect the users (farmers) from inferior inoculants. Quality controI for biofertilizers in several countries is reviewed and quality control for single and compound biofertilizers in Indonesia is proposed. In some countries mother cultures are supplied by a central institution, however, in Indonesia they are provided by the respective producers. Proposed internal quality control is carried out by the respective producers in the course of inoculant production, while proposed external quality control is carried out by an independent institution to guarantee that an inoculant has met the quality standards before distribution and application.

Baku mutu pupuk hayati merupakan syarat-syarat mutu yang harus dipenuhi oleh suatu pupuk hayati agar fungsi mikroba yang terkandung dalam pupuk hayati yang bersangkutan dapat memberikan pengaruh positif terhadap tanaman yang diinokulasi. Beberapa karakteristik mikroba yang menentukan mutu suatu pupuk hayati antara lain adalah:

1) **Jumlah populasi**. Jumlah minimal populasi mikroba yang hidup pada waktu produksi dan sebelum kedaluwarsa yang dapat memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman. Artinya ada jumlah populasi mikroba hidup yang minimum dalam inokulan diperlukan untuk dapat memberikan pengaruh pertumbuhan terhadap tanaman.
2) **Keefektifan**. Mikroba dalam inokulan merupakan mikroba pilihan (unggul) hasil seleksi, pengujian secara sistematis baik di laboratorium, rumah kaca, maupun di lapangan.

3) **Bahan pembawa**. Bahan pembawa harus dapat memberikan lingkungan hidup yang baik bagi mikroba atau campuran berbagai mikroba selama produksi, transportasi, dan penyimpanan sebelum inokulan tersebut digunakan.

4) **Masa kedaluwarsa.** Ini menyangkut umur inokulan apakah masih dapat digunakan. Bila masa kedaluwarsa ini lewat, mutu (keefektifan) inokulan tidak dijamin lagi, karena jumlah mikroba sudah tidak memenuhi syarat minimal lagi.

Baku mutu pupuk hayati yang paling umum di dunia saat ini adalah baku mutu untuk inokulan rhizobia. Baku mutu ini terdapat di berbagai negara termasuk Indonesia. Pupuk hayati jenis mikroba lain seperti kelompok pelarut fosfat, pemacu tumbuh dan perombak, baku mutunya baru berkembang beberapa tahun terakhir ini, setelah pemanfaatannya mulai mendapat perhatian. Baku mutu yang sudah adapun baru menyangkut pupuk hayati tunggal, sedangkan untuk pupuk hayati majemuk belum ada. Pada kenyataannya hampir semua pupuk hayati yang beredar sekarang di Indonesia merupakan pupuk hayati majemuk.

Pupuk hayati belum diperlakukan sebagaimana seharusnya pupuk hayati. Bahkan menurut Kep. Mentan No.09/Kpts/TP.260/1/2003 tentang Syarat dan Tatacara Pendaftaran Pupuk Anorganik, pupuk hayati seolah-olah diperlakukan sebagai pupuk anorganik (lihat Lampiran). Dalam Kep. Mentan ini pengertian pupuk anorganik merupakan pupuk hasil proses rekayasa secara kimia, fisika atau biologis dan merupakan hasil industri atau pabrik pembuat pupuk, sehingga pupuk hayati yang terdaftar sampai saat ini diperlakukan sebagai pupuk anorganik. Pendaftaran pupuk anorganik menurut peraturan ini berlaku 5 tahun sejak diterbitkannya nomor pendaftaran (pada hal khusus bagi pupuk yang mengandung mikroba harus ada masa kedaluwarsa). Ini berarti uji mutu dan uji keefektifan hanya diperlukan pada waktu pendaftaran pertama. Mutu *batch* (seri produksi) produksi selanjutnya diserahkan pada produsen pupuk yang bersangkutan. Seharusnya setiap *batch* yang mengandung mikroba harus melalui uji mutu, karena setiap *batch* produksi bisa berbeda mutunya.

Berdasarkan pupuk yang terdaftar pada Direktorat Pupuk dan Pestisida (2002) sekurang-kurangnya ada 15 jenis pupuk yang dapat digolongkan sebagai pupuk hayati. Pada tahun 2003 jumlah ini meningkat menjadi 35 jenis. Jumlah ini diperkirakan akan meningkat pada tahun-tahun mendatang, baik produk dalam negeri maupun produk impor. Perdagangan bebas memungkinkan lebih banyak lagi jenis produk pupuk hayati asal luar negeri (selain asal dalam negeri) masuk ke Indonesia. Cina telah berhasil mengembangkan apa yang disebut *biological potassium fertilizer* (BPF) sebagai pupuk kalium hayati dan telah berhasil diekspor ke Malaysia, India,

Thailand, Nigeria, dan Afrika Selatan. Pupuk kalium hayati ini berfungsi untuk meningkatkan serapan kalium dari tanah. Cina telah mempromosikan jenis pupuk ini melalui *International Training on Biological Fertilizer Technology* yang diadakan setiap tahun pada beberapa tahun terakhir ini. Untuk melindungi pengguna pupuk hayati di tanah air, adanya sistem pengawasan mutu yang baik, dapat mengawasi mutu dari setiap inokulan impor.

Dari informasi yang ada pada brosur/leaflet dan kemasan produk pupuk hayati komersial dewasa ini dapat diketahui bahwa selain mengandung unsur-unsur anorganik, juga mengandung beberapa jenis mikroba (umumnya >5), dan bahan-bahan organik lain protein dan enzim. Produsen-produsen pupuk hayati umumnya cenderung mempromosikan pupuk hayati seakan-akan sebagai *panacea* (obat mujarab) untuk memecahkan semua masalah nutrisi tanaman dan kesuburan tanah. Pada hal sebenarnya tidak sesederhana itu, karena mutu pupuk hayati terutama sangat tergantung pada keefektifan mikroba dan jumlah sel hidup dalam inokulan tersebut, kesesuaiannya dengan tanaman inang, dan kondisi lingkungan tempat mikroba tersebut tumbuh dan berkembang.

Pengalaman beberapa peneliti Balitbiogen yang turun ke lapangan kira-kira 10 tahun setelah proyek intensifikasi kedelai pada tahun 80-an menunjukkan bahwa tingkat adopsi petani rendah. Setelah proyek selesai petani tidak lagi menggunakan inokulan tersebut. Rendahnya adopsi oleh petani mungkin disebabkan antara lain oleh hasil produksi yang diperoleh tidak konsisten dan bukti kenaikan hasil tidak meyakinkan.

Dilihat dari aspek kemajuan teknologi produksi inokulan, potensi pupuk hayati di Indonesia belum sepenuhnya dimanfaatkan. Untuk meningkatkan kualitas dan keefektifan pupuk hayati di Indonesia perlu adanya baku mutu untuk pupuk hayati tunggal lain dan pupuk hayati majemuk, dan sistem pengawasan mutu pupuk, sehingga petani tidak dirugikan.

Di Indonesia sistem pengawasan mutu pupuk hayati baru tersedia untuk rhizobia yang digunakan untuk kedelai. Dengan banyaknya jenis pupuk hayati yang beredar, baik tunggal maupun majemuk, diperlukan adanya suatu sistem pengawasan mutu, sehingga menjamin bahwa mutu inokulan yang digunakan petani telah memenuhi persyaratan mutu. Mutu inokulan tertentu dapat saja memenuhi mutu baku pada waktu tahapan produksi, akan tetapi kualitasnya dapat berubah (kedaluwarsa) dan sudah tidak memenuhi baku mutu pada waktu akan digunakan petani. Oleh karena itu pengawasan mutu haruslah dilaksanakan baik di tingkat produksi maupun di tingkat pasar sebelum digunakan petani.

Pengawasan mutu sebaiknya dilakukan oleh suatu badan (lembaga) yang independen sehingga terjamin kenetralannya. Semua inokulan yang akan diperdagangkan harus memenuhi baku mutu. Badan inilah yang akan menguji semua inokulan dan mengeluarkan sertifikat yang menyatakan bahwa inokulan yang bersangkutan lulus dan dapat diperdagangkan.

Kendali mutu inokulan di berbagai negara

Standar inokulan rhizobia adalah standar yang umum ada di berbagai negara dan regulasinya berbeda antara negara. Banyak negara memiliki bentuk pengawasan mutu yang didukung oleh perundang-undangan yang tepat seperti misalnya Kanada, Perancis, dan Uruguai, maupun secara sukarela oleh perusahaan inokulan itu sendiri, misalnya Australia, Thailand, Selandia Baru, dan Afrika Selatan.

Australia adalah contoh negara yang sudah punya pengalaman dan sejarah panjang dalam penerapan baku mutu inokulan. Negara ini sangat keras dalam pengawasan mutunya dan hanya memproduksi inokulan monostrain, dimana dipilih strain yang paling efektif dan efisien. Negara ini juga menunjukkan contoh yang baik dimana institusi pemerintah berperanan dalam pengawasan mutu inokulan legum yang diproduksi oleh sektor swasta. Peranan dari kedua pihak ini dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Peranan sektor pemerintah dan swasta dalam pengembangan dan produksi/pemasaran inokulan rhizobia

Sektor pemerintah	Sektor swasta
Evaluasi strain rhizobia dan perbaikan *strain*	Produksi inokulan
Pengawasan mutu eksternal (sertifikasi)	Pengembangan produk
Pemasok biakan induk (*mother culture*) kepada perusahaan inokulan	Pengembangan pasar
Pemeliharaan biakan rhizobia	Pengawasan mutu internal
Rekomendasi *strain* rhizobia yang dipakai pada semua inokulan yang diproduksi dan dijual di Australia	Pemasaran/distribusi
Penelitian terapan	
Bantuan teknis	
Pelatihan/penyuluhan	

Sumber: Herridge *et al*. (2002)

Inokulan memainkan peranan yang penting dalam pertanian Australia. Petani Australia menginokulasi kira-kira 1,5 juta ha legum setiap tahunnya, dengan biaya US$ 3 juta. Keuntungan inokulasi kira-kira US$ 50

juta setiap tahunnya dengan rasio B/C 17 (Herridge *et al.*, 2002). Saat ini ada 39 jenis inokulan rhizobia yang dihasilkan dan dijual di Australia. Inokulan-inokulan ini digunakan untuk menginokulasi 100 spesies legum.

Di Australia sejak tahun 2000 pengawasan mutu dilakukan oleh *Australian Legume Inoculant Research Unit* (ALIRU), yang kedudukannya di Gosford. Sebelumnya bernama *Australian Inoculant Research Control Service* (AIRCS), yang menggantikan University of Sydney-*Department of Agriculture Laboratory Service* (U-DALS) pada tahun 1971. U-DALS sendiri didirikan pada tahun 1953, merupakan kerjasama antara Departemen Pertanian New South Wales dan Universitas Sydney. Biaya operasi dan gaji tenaga teknis didanai oleh sumber eksternal, sedangkan infrastruktur dan gaji tenaga ilmuwan disediakan oleh Departemen Pertanian negara bagian New South Wales. ALIRU mempunyai mandat nasional untuk menjamin petani-petani Australia memperoleh inokulan legum (rhizobia) yang paling bermutu. ALIRU merekomendasikan melalui Komisi Pengarah Nasional semua strain rhizobia yang dipakai pada semua inokulan yang diproduksi dan dijual Australia dan memasok kultur induk (mother cultures) rhizobia kepada produsen. Lembaga inipun berhak mengganti strain yang dipakai pada inokulan komersial berdasarkan hasil penelitian. Sejak tahun 1996 sudah 12 strain rhizobia pada inokulan komersial yang diganti (Herridge *et al*., 2002)

Untuk dapat lolos dalam pengujian contoh-contoh inokulan yang dikirimkan ke ALIRU oleh perusahaan inokulan bersangkutan, inokulan-inokulan tersebut harus memenuhi baku mutu seperti diringkaskan pada Tabel 2.

Tabel 2. Baku mutu inokulan rhizobia Australia

Variabel	Jumlah/karakteristik yang diinginkan	Metode uji/prosedur
Jumlah bakteri hidup	10^9 rhizobia/g gambut lembap (kecuali untuk inokulan *Lotononis* $2x10^8$	Jumlah koloni (plate count) dan MPN (plant count)
Reaksi Gram	Negatif	Uji gram
Reaksi aglutinasi	Positif dengan antiserum strain yang bersangkutan	Uji serologi
Kontaminasi (kemurnian)	Bebas kontaminan pada pengenceran 10^{-6}	Agar pepton glukosa

Sumber: Roughley *et al*. (1990)

Perancis juga memiliki legislasi tentang inokulan (Wardoux, 1991). Inokulan harus terdaftar untuk penjualan di Perancis. Produk ini juga harus sudah terbukti efikasinya dan tidak merugikan bagi tanaman, hewan dan manusia yang bukan target dan lingkungan. Semua inokulan diproduksi dalam bahan pembawa yang steril. Inokulan harus dapat menghasilkan

$1x10^6$ rhizobia/biji kedelai. Strain-strain untuk legum tertentu juga diatur dengan legislasi. Pengujian mutu inokulan dilakukan oleh INRA Dijon. *Batch* ini akan diberikan sertikat bila memenuhi standar. Pengujian kembali inokulan tersebut dilakukan bila akan digunakan pada musim tanam berikutnya.

Keberhasilan produksi inokulan rhizobia memerlukan adanya program pengawasan mutu yang efektif. Mutu inokulan yang jelek umumnya tidak menghasilkan jumlah rhizobia yang cukup dari rhizobia yang cocok untuk mendorong terjadinya nodulasi pada tanaman inang yang bersangkutan. Oleh karena itulah perlu adanya baku mutu untuk setiap jenis inokulan.

Jumlah minimal rhizobia yang diperlukan untuk menjamin terjadinya nodulasi yang baik adalah $2x10^7$ sel g^{-1} inokulan atau 300 sel $biji^{-1}$. Tetapi jumlah sampai 10^4-10^6 rhizobia $biji^{-1}$ lebih disukai, terutama bila ada kompetisi yang besar dengan *strain* asli dalam tanah (Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1988). Baku mutu yang diperlukan untuk inokulan yang menggunakan bahan pembawa gambut steril di Australia, Selandia Baru, dan Kanada adalah 10^9 rhizobia g^{-1}, dengan kontaminasi <0,1% (Roughley, 1982; Thompson, 1980). Bahan pembawa yang tidak steril hanya digunakan di Amerika Serikat dengan inokulan yang bermutu paling baik mengandung 10^8-10^9 rhizobia g^{-1}. Tidak adanya regulasi pengawasan mutu memungkinkan dijualnya produk yang mutunya sangat jelek (Hiltbold *et al.*, 1980).

Baku mutu di Kanada dilindungi dengan Undang-Undang Pupuk (Fertilisers Act). Perusahaan yang ingin menjual inokulannya di Kanada harus mengajukan pendaftaran kepada Departemen Pertanian Kanada dengan data yang menunjukkan keefektifan produknya. Inokulan harus mengandung jumlah sel hidup dari spesies yang mampu membentuk bintil sehingga menghasilkan jumlah sel hidup per biji seperti ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Kelompok legum dan jumlah sel $biji^{-1}$

Kelompok legum	Contoh	Jumlah sel per biji
Berbiji kecil	Alfalfa, birdsfoot trefoil, clover	1.000
Berbiji sedang	Sainfoin	10.000
Berbiji besar	Bean, pea dan kedelai	100.000

Sumber: Lacombe Research Centre (2000)

Kendali mutu pupuk hayati di India pada dasarnya bersifat sukarela. India memiliki apa yang disebut dengan spesifikasi baku ISI untuk *Rhizobium* dan *Azotobacter* seperti disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Spesifikasi baku mutu ISI untuk *Rhizobium* dan *Azotobacter*

No.	Parameter	*Rhizobium*	*Azotobacter*
1.	Basis	Berbasis bahan pembawa	Berbasis bahan pembawa
2.	Jumlah sel pada waktu produksi	10^8/g bahan pembawa	10^7/g bahan pembawa
3.	Jumlah sel pada waktu kedaluwarsa	10^7/g bahan pembawa	10^6/g bahan pembawa
4.	Masa kedaluwarsa	6 bulan setelah tanggal produksi	6 bulan dari tanggal produksi
5.	Kontaminan	Tidak ada kontaminan pada pengenceran10^{-5}	Tidak ada kontaminan pada pengenceran10^{-5}
6.	pH	6.0-7.5	6.5-7.5
7.	Strain	Harus dicek secara serologi	-
8.	Bahan pembawa	Harus lolos saringan 150-212 mikron (IS-72 to 100 mesh)	Harus lolos saringan 106 mikron IS
9.	Uji nodulasi	Harus positif	-
10.	Fiksasi nitrogen	> 20 mg per g glukosa	Tidak kurang dari 10 mg per g sukrosa

Sumber: Ghosh *et al*. (2001)

Ghosh *et al*. (2001) meriviu kendali mutu pupuk hayati di India. Kendali mutu ini meliputi pengujian fisiko-kimia, biokimia, jumlah mikroba pada inokulan atau kultur cair, penandaan morfologi, serologi, dan antibiotik (Tabel 5a, 5b, dan 5c). Pengujian fisiko-kimia meliputi pH, ukuran bahan pembawa, dan kelembapan bahan pembawa. Pengujian biokimia meliputi pertumbuhan kultur pada medium agar pepton glukosa (glucose peptone agar = GPA), medium agar brom timol biru (bromthymol blue = BTB) dan medium agar khamir manitol merah Kongo (Congo red yeast mannitol agar = CRYMA). Jumlah mikroba yang hidup pada inokulan atau kultur cair ditetapkan dengan penumbuhan pada medium agar khamir manitol merah Kongo dengan berbagai pengenceran, dan pengujian MPN dengan penumbuhan biji tanaman indikator pada berbagai tingkat pengenceran. Reaksi Gram dilakukan untuk menetapkan adanya mikroba yang diinginkan pada inokulan tersebut. Uji kemurnian untuk menetapkan adanya kontaminasi dilakukan pada medium agar pepton glukosa. Uji serologi dilakukan dengan uji aglutinasi untuk menentukan adanya strain mikroba yang diinginkan pada inokulan tersebut. Uji antibiotik dilakukan dengan mengunakan penanda antibiotika tertentu pada medium. Adanya pertumbuhan pada medium berpenanda tertentu menunjukkan adanya strain spesifik.

Tabel 5a. Uji fisiko-kimia

Uji	Prosedur	Optimal standar ISI	Catatan
pH	Inokulan didestilasi Suspensi air (1:2.5) diukur dengan pH meter.	6.5 to 7.5	pH rendah menyatakan kontaminasi banyak secara kualitatif. Uji ini dapat dilakukan untuk memeriksa kontaminasi pada kultur cair
Ukuran mesh	Harus lolos melalui saringan 100 mesh	>100	Ukuran mesh yang lebih tinggi sangat disukai
Kelembapan	10 g contoh inokulan dikeringan semalam pada suhu 80^0C	45 – 50%	Kelembapan < 25% dan > 75 % merugikan daya hidup mikroba

Sumber: Ghosh *et al*. (2001)

Tabel 5b. Uji biokimia

Uji	Prosedur	Karakteristik yang diinginkan
Reaksi GPA	Kultur yang diencerkan ditumbuh-kan medium GPA dan diinkubasi pada suhu (28±1) ^{0}C	Pertumbuhan positif menunjukkan kontaminasi banyak
Reaksi BTB	Kultur yang diencerkan ditumbuh-kan pada medium BTB dan diinkubasi pada suhu (28±1) ^{0}C	Pertumbuhan positif menunjukkan kontaminasi banyak
Reaksi congo red	Kultur yang diencerkan ditumbuh-kan pada media CRYMA dan diinkubasi pada suhu (28±1) ^{0}C	Pertumbuhan positif menunjukkan kontaminasi banyak

Sumber: Ghosh *et al*. (2001)

Tabel 5c. Jumlah mikroba pada inokulan atau kultur cair

Uji	Prosedur	Standar ISI	Catatan
Jumlah sel hidup	Pengenceran inokulan atau kultur cair dengan air steril (10^{-1} - 10^{-9}) ditumbuhkan pada medium CRYMA dan disimpan untuk inokulasi selama 3-7 hari pada suhu 28 ^{0}C	10^8 per g bahan pembawa	Yang terhitung jumlah mikroba yang efektif dan yang tidak efektif
Infeksi tanaman	Setiap biji yang disteril permukaan diberi perlakuan dengan satu ml dari setiap seri pengenceran kultur dengan ulangan 4x dan dipelihara pada ruang tumbuh selama 15-20 hari	10^7 per g bahan pembawa	Hanya rhizobia yang efektif

Sumber: Ghosh *et al*. (2001)

Penelitian kendali mutu

Gambut merupakan bahan pembawa yang paling umum digunakan sebagai bahan pembawa mikroba pupuk hayati. Tetapi tidak semua jenis gambut sesuai sebagai bahan pembawa (Roughley and Vincent, 1967; Höflich and Wolf, 1987). Kandungan air pada gambut umumnya dinyatakan sebagai persentase berat basah, tetapi karena gambut yang berbeda asalnya berbeda pula kapasitas menahan airnya. Karena itu penggunaan istilah kandungan airnya bisa mengelirukan (Roughley, 1982). Penelitian untuk menetapkan pengaruh lima sumber gambut Indonesia dan potensi kelembapannya terhadap mutu inokulan menunjukkan bahwa kecuali gambut Lakbok, keempat sumber gambut lain (Rawa Pening, Dieng, Rawa Jitu, dan Rawa Sragi sesuai sebagai bahan pembawa untuk inokulan bradyrhizobia (Simanungkalit *et al*., 1999). Hasil penelitian ini menekankan pentingnya membuat kurva karakteristik kelembapan dari setiap gambut yang diuji.

Jumlah kelembapan yang dibutuhkan untuk membawa suatu bahan pembawa ke suatu potential kelembapan tertentu dan derajat potential untuk perubahan karena kehilangan merupakan pertimbangan penting untuk memilih suatu bahan pembawa. Makin besar kapasitas menahan air makin besar penyimpanan air yang tersedia ketika inokulan disimpan pada kondisi kering. Untuk memenuhi kriteria kedua, makin rata kurva karakteristik kelembapan makin baik bahan pembawa itu, perubahan kandungan kelembapan yang relatif besar menyebabkan perubahan potensial kelembapan yang relatif kecil sehingga energi yang dibutuhkan rhizobia untuk menggunakan air tidak akan bertambah dengan besar.

Tabel 5d. Uji morfologi, serologi, dan penandaan antibiotika

Uji	Prosedur	Karakterik yang diinginkan
Reaksi Gram	Olesan tipis kultur yang difiksasi dengan panas, diwarnai dengan crystal violet, kemudian dicuci dengan alkohol dan diwarnai dengan safranin	Gram negatif (berwarna merah) menandakan adanya rhizobia atau *Pseudomonas,* sedangkan gram positif (berwarna biru) menandakan adanya *Bacillus*
Reaksi aglutinasi	Kultur cair yang diencerkan dibiarkan bereaksi dengan antiserum specifiknya di atas kaca objek di bawah mikroskop dengan pembesaran rendah	Uji aglutinasi spesifik dapat meng identifikasi adanya *strain* yang diperlukan.
Penandaan antibiotika	Kultur cair yang diencerkan, digoreskan pada medium YEMA yang mengandung antibiotika penanda dengan kekuatan spesifik dan diinkubasi selama 3-5 hari pada suhu (28±1) ^{0}C	Pertumbuhan pada medium yang diberi antibiotika penanda yang spesifik menandakan adanya adanya strain spesifik

Sumber: Ghosh *et al*. (2001)

Persentase kelembapan untuk mencapai potential -$\log_{10}$ 4.0; 4.5; dan 6.0 pada lima gambut Indonesia dan dua gambut Australia disajikan pada Tabel 6. Kedua gambut Australia, *Bio-care and Inoculant Services* membutuhkan % kelembapan masing-masing 160% dan 150% untuk memperoleh potential -$\log_{10}$ 4.0 Pa. Pada -$\log_{10}$ 4.5 dan -$\log_{10}$ 6.0 kedua gambut Australia membutuhkan % kelembapan masing-masing 125% dan 115%, 62% dan 55%. Kelima gambut Indonesia membutuhkan % kelembapan dalam kisaran 100-130% pada -$\log_{10}$ 4.0 Pa, 78-100% pada -$\log_{10}$ 4.5 Pa, ada 35-47% pada -$\log_{10}$ 6.0 Pa. Gambut *Bio-care and Inoculant Services* membutuhkan kehilangan air masing-masing 98% dan 95% untuk mengubah potensial dari -$\log_{10}$ 4.0 menjadi -$\log_{10}$ 6.0 Pa, sedangkan gambut Indonesia membutuhkan kehilangan air pada kisaran 65-84%. Gambut Australia memiliki karakteristik kelembapan yang baik yang ditunjukkan oleh kapasitas menahan air yang tinggi dan kehilangan air yang lebih besar dibutuhkan untuk mengubah potential, dibandingkan dengan gambut dari Indonesia. Terkecuali gambut Lakbok, gambut-gambut dari Indonesia memiliki karakteristik kelembapan yang serupa dan secara subjektif dianggap sebagai bahan pembawa yang cocok untuk inokulan rhizobia.

Tabel 6. Karakteristik kelembapan gambut dari Indonesia dan Australia

Sumber gambut	% kelembapan untuk mencapai potential (Pa)			Perbedaan dalam % kelembapan antara -$\log_{10}$ 4.0 dan -$\log_{10}$ 6.0
	-$\log_{10}$ 4.0	-$\log_{10}$ 4.5	-$\log_{10}$ 6.0	
Dieng	122	90	38	84
Lakbok	100	78	35	65
Rawa Jitu	118	88	37	81
Rawa Pening	117	90	42	75
Rawa Sragi	130	100	47	83
Bio-care	160	125	62	98
Inoculant Services	150	115	55	95

Sumber: Simanungkalit *et al.* (1999)

Strain CB 1809 tumbuh baik pada ketujuh sumber gambut (Tabel 7) yang melampaui standar minimum Indonesia atau Australia -$\log_{10}$ 9,00 g^{-1} pada semua kasus. Jumlah ini berkisar dari -$\log_{10}$ 9,717 sampai -$\log_{10}$ 9,991 setelah 14 hari dan dari -$\log_{10}$ 9.658 sampai -$\log_{10}$ 10,140 setelah 28 hari. Rasio jumlah yang berkembang pada gambut dari Indonesia setelah 28 hari menurut standar minimum Indonesia dan juga Australia bervariasi antara 1:13,8 sampai 1:4,5 (Tabel 7).

Tabel 7. Jumlah bradyrhizobia strain CB 1809 pada tujuh sumber gambut dengan potensial kelembapan $-\log_{10}$ 4.5 dan disimpan pada suhu 25^0C selama 28 hari

Sumber gambut	Jumlah rata-rata $\log_{10}$ CB 1809 g^{-1} gambut setelah		Rasio jumlah pada 28 hari terhadap standar Indonesia dan
	14 hari	28 hari	Australia
Dieng	9,926	9,958	1 : 9,1
Lakbok	9,897	9,658	1 : 4,5
Rawa Jitu	9,847	10,140	1 : 13,8
Rawa Pening	9,717	9,714	1 : 5,2
Rawa Sragi	9,837	9,926	1 : 8,5
Bio-care	9,991	9,800	1 : 6,3
Inoculant Services	9.808	10.019	1 : 10.4
Bio-care	9.991	9.756	1 : 5.7

Minimum Indonesian and Australia standard $-\log_{10}$ 9,00 g^{-1} *peat*
SD (P=0,05) *peat* x *time* = 0,169
Sumber: Simanungkalit *et al.* (1999)

Faktor lain yang dapat mempengaruhi mutu pupuk hayati dalam penyimpanan dan pengangkutan adalah faktor suhu. Suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan mutu melalui penurunan jumlah miroba yang terkandung dalam inokulan tersebut. Roughley *et al.* (1995) meneliti pengaruh suhu maksimal terhadap inokulan legum yang terpapar kepada suhu 36-39 ^{0}C selama pengiriman ke lima lokasi di Australia dan suhu 29-42 ^{0}C selama pengiriman ke sembilan lokasi di Indonesia, yang digunakan sebagai kondisi percobaan penyimpanan untuk mempelajari ketahanan hidup (survival) bakteri bintil akar pada kultur gambut. Mereka mendapatkan pada percobaan penyimpanan kultur 3 strain *Bradyrhizobium* dan 2 strain *Rhizobium* dalam gambut steril dengan potensial kelembapan $-\log_{10}$ 4,5 Pa dan diinkubasi pada suhu 25 ^{0}C selama 14 hari. Selanjutnya masing-masing disimpan pada suhu 25, 30, 35, dan 40 ^{0}C selama 28 hari. Mereka mendapatkan suhu 40 ^{0}C selama 42 hari tidak mempengaruhi infektivitas strain. Selama ini ada kekhawatiran di negara kepulauan seperti Indonesia, akan terjadi penurunan mutu (penurunan jumlah populasi mikroba) pupuk hayati kalau perjalanan dari lokasi produsen selama beberapa waktu dan terpapar kepada suhu panas sebelum mencapai tempat tujuan. Hasil penelitian ini mengindikasi-kan bahwa pupuk hayati dapat dikirim dengan aman dari suatu pusat produksi yang disentralisir. Reinkubasi inokulan pada suhu 25 ^{0}C selama 7 hari setelah sampai di daerah dianjurkan bila suhu di luar kemasan 35 ^{0}C.

Pertanyaan yang timbul tentang pupuk hayati majemuk apakah tiap mikroba yang terkandung dalam inokulan tersebut kompatibel satu sama lain. Rice *et al*. (1995) berhasil menumbuhkan secara bersama (co-culturing) *Rhizobium meliloti* dan satu cendawan pelarut fosfat (*Penicillium bilaii*) dengan jalan mencampur proporsi yang sama kedua kultur cair sari khamir mannitol dengan gambut yang sudah disterilisasi sinar gamma.

Kendali mutu pupuk hayati majemuk di Indonesia belum ada, namun perdagangan pupuk hayati majemuk sudah berlangsung beberapa tahun. Kondisi inilah sebetulnya yang sangat mengkhawatirkan manfaat dari penggunaan pupuk hayati oleh petani.

Tabel 8. Kandungan mikroba dan ciri umum lainnya beberapa pupuk hayati komersial di Indonesia

No. PH[*)]	Kandungan mikroba (cfu/g atau cfu/mL)	Fungsi	Bentuk/ warna	Masa kedaluwarsa
1	- *Azospirillum lipoverum* ($1.2x10^8$) - *Aspergillus niger* ($5.0x10^7$) - *Aeromonas punctata* ($5.0x10^8$) - *Azotobacter beijerinckii* ($1.9x10^8$)	Penambat N, pelarut P, pemantap agregat tanah	Padat (butiran), abu-abu putih	- [**)]
2	- *Rhizobium* ($1.75x10^8$) - Bakteri pelarut P ($2.7x10^8$)	Penambat N, pelarut P	Padat (gambut), hitam abu-abu	Tercantum
3	- Bakteri pelarut P ($5.7x10^7$) - *Lactobacillus* ($3.7x10^7$) - *Rhizobium* ($1.33x10^8$) - *Azotobacter* ($1.7x10^7$) - *Actinomycetes* ($5.8x10^7$)	Pelarut P, penambat N, perombak bahan organik	Cair coklat	-
4.	- *Bacillus* ($2.37x10^8$) - Ragi ($3.62x10^6$) - *Azotobacter* ($1.08x10^7$) - *Acetobacter* ($2.13x10^7$) - *Lactobacillus* ($4.15x10^7$)	Penyubur tanah, pembaik truktur tanah, pengendali penyakit	Cair coklat	-
5	Bakteri, aktinomiset, ragi, jamur	Perombak bahan organik	Padat (gambut), hitam-coklat	-
6	*Trichoderma* sp., *Aspergillus niger, Azotobacter* sp., *Azospirillum* sp.	Perombak bahan organik	Padat (gambut), hitam-coklat	-
7	*Trichoderma pseudokoningii* *Cytophaga* sp.	Perombak bahan organik	Padat (gambut), coklat-hitam	-

Keterangan:
[*)] PH = pupuk hayati (nama dagang pupuk hayati sengaja tidak dicantumkan)
[**)] - = tidak ada data masa kedaluwarsa pupuk dalam kemasan
Sumber: Balai Penelitian Tanah (2005)

Data pada Tabel 8 menyajikan kandungan dan ciri umum beberapa pupuk hayati yang diperdagangkan di Indonesia. Sebagian besar pupuk hayati mengandung lebih dari satu kelompok fungsional (pupuk hayati majemuk). Namun sebagian besar produsen pupuk hayati tersebut tidak mencantumkan masa kedaluwarsa pupuk, sehingga ada kemungkinan pupuk hayati yang dijual tidak efektif lagi. Hasil pengujian di laboratorium (jumlah populasi dan karakter fungsional) dan keefektifan beberapa jenis pupuk hayati mengindikasikan bahwa pupuk hayati komersial yang sudah beredar memiliki mutu yang beragam. Pada beberapa jenis diantaranya tidak terdeteksi mengandung mikroba (Balai Penelitian Tanah, 2005 dan 2006). Hasil ini menjadi justifikasi perlunya penetapan syarat mutu dan sistem pengendaliannya.

Syarat-syarat mutu pupuk hayati di Indonesia

Baku mutu pupuk hayati yang ada di Indonesia baru ada baku mutu pupuk tunggal khususnya untuk inokulan *Rhizobium* untuk kedelai yang diatur berdasarkan Surat Keputusan Direktorat Jenderal Tanaman Pangan No.SK.I.A.5.84.5 tanggal 17 Januari 1984, yang kemudian disempurnakan dengan SK.I.HK.050.91.7A tanggal 12 Maret 1991. Surat Keputusan (SK) ini dikeluarkan dalam rangka intensifikasi kedelai yang berlangsung pada waktu itu.

Inokulan diuji di laboratorium pengawasan mutu benih (PMB) untuk menentukan apakah inokulan tersebut memenuhi syarat mutu sesuai standar yang telah ditetapkan. Bagi seri produksi (lot) yang memenuhi syarat mutu akan dikeluarkan surat layak diedarkan, sedang bagi lot yang tidak memenuhi syarat tidak boleh diedarkan dan seri produksi itu dianjurkan untuk dimusnahkan. Balai Pengawasan Sertifikasi Benih (BPSB) membantu pengambilan contoh dan pengiriman-nya ke laboratorium PMB di Jakarta. Pengambilan contoh inokulan diambil secara acak. Jumlah contoh yang diambil 0,1-1%, maksimum 30 bungkus. Pengambilan contoh dilakukan berdasar garis diagonal, bila inokulan tersebut disusun dalam tumpukan. Bila inokulan tersebut dikemas lagi dalam kotak karton atau wadah lain, maka untuk wadah <5, contoh diambil dari tiap wadah. Untuk wadah 6-30, contoh diambil dari lima wadah. Sedangkan untuk jumlah wadah >31, contoh diambil dari 10 wadah. Pengujian dilakukan dengan metode penghitungan koloni pada media CRYMA (congo red yeast mannitol agar) dalam cawan (plate count) secara duplo dengan 3-4 ulangan untuk tiap pengeceran. Penghitungan jumlah koloni dilakukan setelah inkubasi selama 7-10 hari di tempat gelap pada suhu kamar (28-31 ^{0}C). Sejak tahun anggaran 1990/1991-1994-1995 telah dilakukan pengujian inokulan

Rhizobium seperti disajikan pada Tabel 10. Dari 675 contoh yang diuji, sebanyak 70 seri produksi (lot) atau sebanyak 4.367,74 kg tidak memenuhi syarat (Wirjosentono dan Nuswantoro, 1995).

Tabel 9. Syarat mutu inokulan kedelai (SK.I.HK.050.91.7A tanggal 12 Maret 1991)

Peubah	Syarat mutu
Jumlah bakteri waktu meninggalkan pabrik	10^9/g atau ml
Jumlah bakteri waktu masa kedaluwarsa	10^7/g atau ml
Kemasan	Kedap cahaya/kedap air (tidak mudah pecah/koyak); bobot kemasan 30; 37,5; 75; dan 150 g neto. Kemasan terbuat dari aluminium foil atau polietilen; kedap cahaya minimal 40%
Masa berlaku	Minimal 3 bulan untuk kemasan dari bahan polietilen kedap cahaya; minimal 6 bulan untuk kemasan dari bahan aluminium foil
Label	Harus ada label berisi keterangan: - Macam inokulan (untuk tanah atau biji) - Nama/jenistanaman yang dapat diinokulasi - Nama/jenis jasad renik - Bobot bersih (neto) inokulan - Nomor seri produksi - Jumlah jasad renik yang hidup per g atau ml inokulan - Cara penyimpanan - Masa kedaluwarsa - Petunjuk penggunaan inokulan - Nama dan alamat produsen

Tabel 10. Pengujian inokulan Rhizobium 1990/1991-1994/1995

Tahun anggaran	Jumlah contoh	Bobot inokulan (kg)
1990/1991	255	28.147,69
1991/1992	275	101.511,89
1992/1993	127	27.569,36
1993/1994	14	28.933,95
1994/1995	4	3.738,86

Sumber: Wirjosentono dan Nuswantoro (1995)

Baku mutu yang disebutkan dalam SK ini hanya menyangkut satu jenis fungsional mikroba saja, yaitu penambat nitrogen yang simbiotik, yaitu *Rhizobium*. Kenyataan menunjukkan bahwa inokulan komersial tidak hanya mengandung satu kelompok fungsional mikroba saja, tetapi lebih. Misalnya ada kelompok penambat nitrogen simbiotik dicampur dengan kelompok penambat nitrogen nonsimbiotik (hidup bebas), atau dengan mikroba pelarut fosfat. Kombinasi

mikroba seperti ini tentu menimbulkan pertanyaan apakah campuran dengan strain atau kelompok fungsional lain tidak menyebabkan kompetisi, sehingga pada akhirnya hanya mikroba yang tumbuh lebih cepat saja terkandung dalam inokulan yang bersangkutan. Adanya suatu sistem pengawasan baku mutu yang handal dapat menentukan berdasarkan analisis baku mutu apakah inokulan tersebut mengandung kelompok-kelompok fungsional mikroba seperti tersebut dalam dokumen permohonan izin pemasaran.

Syarat mutu pupuk hayati majemuk dan pengawasan mutunya

Kesulitan utama yang dihadapi untuk mengendalikan mutu pupuk hayati di Indonesia dapat digariskan sebagai berikut:

(a) Belum adanya baku mutu pupuk hayati majemuk secara global yang dapat digunakan sebagai pembanding.
(b) Sangat sedikitnya penelitian tentang mutu pupuk hayati majemuk yang sudah dilakukan, terlihat dari terbatasnya publikasi yang ada. Kebanyakan penelitian yang ada adalah mengenai pupuk hayati tunggal.
(c) Belum adanya metode produksi pupuk hayati majemuk yang baku.
(d) Kultur induk yang digunakan dalam memproduksi pupuk hayati pada dasarnya dikelola oleh produsen itu sendiri, bukan dari suatu lembaga pengawasan mutu eksternal.

Mutu pupuk hayati adalah salah satu faktor paling penting yang mempengaruhi keberhasilan suatu inokulasi. Dasar pemikiran yang menentukan jumlah mikroba sekitar 10^9 per g atau ml bahan pembawa adalah dari pupuk hayati rhizobia dengan pertimbangan untuk terjadinya nodulasi diperlukan 10^3-10^6 bakteri per biji, tergantung besar kecilnya biji dan jumlah kebutuhan benih per satuan luas. Penggunaan pupuk hayati majemuk di Indonesia tentunya harus mempertimbangkan dasar pemikiran di atas. Apakah pupuk hayati majemuk masih dapat menyediakan jumlah populasi mikroba tertentu sekalipun jenis mikroba yang menjadi bahan aktif suatu inokulan lebih dari satu. Inilah sebetulnya yang menjadi kekhawatiran pada pupuk hayati majemuk, bahwa jumlah populasi menjadi berkurang dan fungsi penambatan dan fasilitasi hara tidak dapat berlangsung.

Beberapa pertimbangan yang harus diperhatikan dalam menetapkan mutu pupuk hayati majemuk dan pengawasannya adalah:

(a) Metode produksi yang digunakan untuk menghasilkan pupuk hayati majemuk haruslah distandardisasi.
(b) Bahan pembawa yang digunakan haruslah steril.
(c) Penentuan jumlah populasi/propagul, walaupun ada beberapa jenis/strain dalam satu kelompok fungsional, jumlah total kelompok fungsional yang bersangkutan yang diperhitungkan.

(d) Metode yang dipergunakan untuk uji mutu sebaiknya juga merupakan metode yang sama. Perbedaan hasil yang diperoleh dapat disebabkan oleh perbedaan metode yang digunakan selain oleh faktor-faktor lain.
(e) Metode yang sama ini digunakan baik untuk pengawasan mutu internal maupun eksternal.
(f) Pengawasan mutu pupuk hayati eksternal dilakukan sebelum pupuk tersebut diperdagangkan dan selama diperdagangkan sebelum kedaluwarsa. Sebelum pupuk hayati boleh diperdagang-kan, pupuk tersebut harus memenuhi baku mutu. Pupuk hayati yang tidak memenuhi baku mutu tidak boleh diperdagangkan. Bagi pupuk hayati yang memenuhi syarat mutu, diberi izin. Pemberian izin itu hanya berlaku untuk setiap *batch* (seri produksi) pupuk hayati. Pengawasan mutu pupuk hayati yang beredar dilakukan 1-2 bulan (tergantung pada jenis mikroba) sebelum masa kedaluwarsa. Pengambilan contoh pupuk sebelum kedaluwarsa dilakukan dii tempat penyimpanan (stok) produsen tempat penjualan. Pupuk hayati yang masih memenuhi syarat mutu, boleh diperdagangkan sampai tiba masa kedaluwarsa seperti tercantum pada kemasan.
(g) Pupuk hayati yang masih memenuhi syarat mutu masih dapat diperdagangkan sampai masa kedaluwarsa seperti tercantum pada kemasan.
(h) Pengujian mutu dilakukan terhadap setiap *batch* produksi (seri produksi). Izin juga diberikan terhadap setiap *batch* produksi.
(i) Setiap kemasan pupuk hayati harus diberi informasi tentang produk, yang meliputi: no. *batch*, tanggal produksi, komposisi mikroba dan bahan lain yang mungkin terkandung, jumlah populasi setiap mikroba fungsional yang terkandung, tanaman target produk, cara meng-gunakan, tanggal/bulan kedaluwarsa produk, manfaat produk, dan informasi-informasi lain yang dianggap perlu.
(j) Pupuk hayati majemuk komersial tidak hanya mengandung mikroba pupuk hayati saja tetapi juga mengandung bahan tambahan (suplemen) seperti hara mineral dan asam amino. Banyaknya suplemen hara mineral dalam inokulan haruslah dalam jumlah yang tidak menekan pertumbuhan mikroba yang terkandung. Pengaruh utama mikroba ini dipakai sebagai indikator pupuk hayati.
(k) Contoh-contoh pupuk hayati akan diuji oleh lembaga pengawasan mutu eksternal haruslah betul-betul mewakili satu *batch* (seri produksi). Pengambilan contoh sebaiknya dilakukan oleh petugas dari lembaga pengawasan mutu untuk menghindari kemungkinan terjadi-nya bias. Di negara seperti Australia misalnya, contoh inokulan

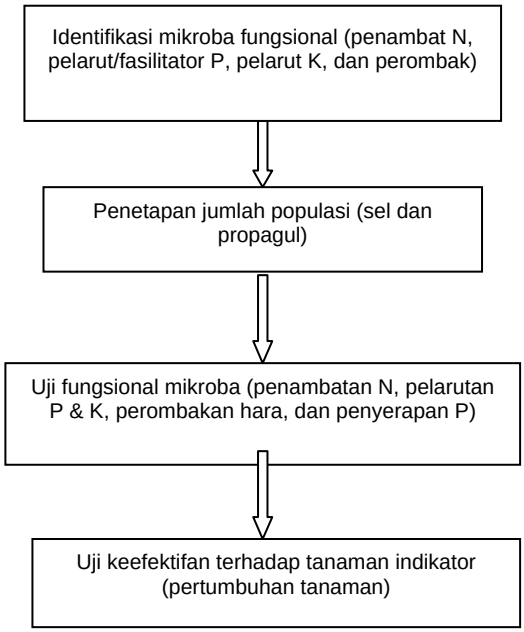
dikirimkan langsung oleh produsen yang bersangkutan sebanyak 7 paket dari tiap *batch* yang diproduksi sesuai dengan regulasi negara tersebut (Roughley *et al*, 1990)

(l) Suatu sistem pengawasan baku mutu yang handal dapat menentukan berdasarkan analisis baku mutu apakah inokulan tersebut mengandung kelompok-kelompok fungsional mikroba seperti tersebut dalam dokumen permohonan izin pemasaran.

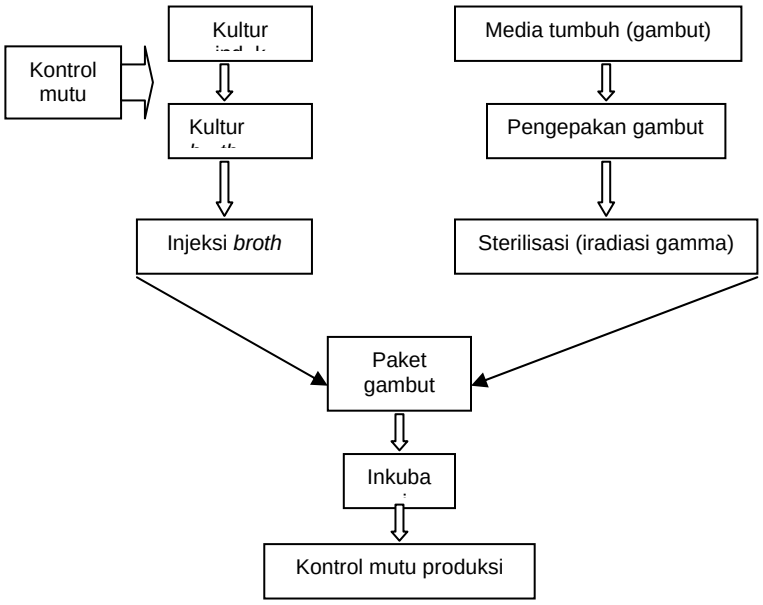
(m) Uji mutu sebaiknya dilakukan pada satu laboratorium uji mutu yang sudah terakreditasi atau pada berbagai laboratorium uji mutu yang sudah terakreditasi dan dalam pelaksanaannya menggunakan metode-metode uji yang sama.

Alur sistem uji mutu pupuk hayati majemuk ditunjukkan pada Gambar 1. Pupuk hayati majemuk yang akan diuji mutunya terlebih dahulu diidentifikasi apakah inokulan tersebut mengandung mikroba fungsional seperti dicantumkan pada label. Setelah inokulan tersebut mengandung mikroba yang disebutkan, lalu ditetapkan jumlah populasinya. Bila inokulan tersebut mengandung strain-strain dari satu fungsional (misalnya penambat N_2 simbiotik atau penambat N_2 hidup bebas), ditetapkan jumlah totalnya saja. Demikian juga kalau satu fungsional yang sama tetapi berbeda kelompoknya (misalnya antara bakteri pelarut fosfat dan fungi pelarut fosfat), penetapan berdasarkan jumlah total kelompoknya. Selanjutnya diikuti dengan tahapan uji fungsional dari kelompok mikroba yang bersangkutan, misalnya kemampuan penambatan N_2 untuk bakteri rhizobia. Terakhir adalah tahapan uji keefektifan pupuk hayati bersangkutan terhadap tanaman indikator tertentu, misalnya pengaruh terhadap pertumbuhan sebagai parameternya. Inokulan tersebut dinyatakan lulus sertifikasi bila telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, dan selanjutnya diizinkan untuk dijual.

Tahapan-tahapan yang harus dilalui dalam memproduksi pupuk hayati dan pengendalian mutunya dapat dilihat pada Gambar 2. Pengendalian mutu sudah harus dilakukan pada berbagai tahapan, mulai dari penyiapan kultur induk, kultur *broth* yang akan diinjeksikan pada paket gambut steril. Demikian pula pada tahapan bahan pembawa (misalnya gambut), pengendalian mutunya harus dilakukan selama pemrosesan gambut sampai pengantongan gambut dalam kantong-kantong. Pengendalian mutu sebelum inokulan tersebut didistribusikan ke kios-kios tani atau kepada petani merupakan pengendalian mutu internal yang menjadi tanggung jawab produsen inokulan bersangkutan.



Gambar 1. Sistem uji mutu pupuk hayati majemuk



Gambar 2. Tahapan produksi pupuk hayati dan pengendalian mutunya

DAFTAR PUSTAKA

Balai Penelitian Tanah. 2005. Inventarisasi dan Pengelolaan Tanah. Laporan Tahunan 2004. Balai Penelitian Tanah, Bogor.

Balai Penelitian Tanah. 2006. Inventarisasi dan Pengelolaan Tanah. Laporan Tahunan 2005. Balai Penelitian Tanah, Bogor.

Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1988. The Legume-*Rhizobium* Symbiosis: Evaluation, Selection and Agronomic Management. CIAT, Cali, Columbia.

Ghosh, T.K. 2001. A Review on quality control of biofertilizer in India Fertiliser Marketing News 32(8): 1-9.

Herridge, D., G. Gemell, and E. Hartley. 2002. Legume inoculants and quality control. p. 105-115. *In* D. Herridge (Ed.), Inoculants and Nitrogen Fixation of Legumes in Vietnam. ACIAR Proc. No 109e.

Hiltbold, A.E., D.L. Thurlow, and H.D. Skipper. 1980. Evaluation of commercial soybean inoculants by various techniques. Agron.J. 72: 675-681.

Höflich, G. and H.J. Wolf. 1987. Bereitstellung und sterilisation von torf als trägersubstrat für Rhizobium-Präparate. Zentralbl. Mikrobiol. 142: 581-586

Lacombe Research Centre. 2000. Canadian fertilizer Act facts. Research Highlights 2(1): 2.

Rice, W.A., P.E. Olsen, and M.E. Leggett. 1995. Co-culture of *Rhizobium meliloti* and a phosphorus-solubilizing fungus *Penicillium bilaii* in sterile peat. Soil Biol. Biochem. 27: 703-705.

Roughley, R.J. 1982. The storage, quality control, and use of legume seed inoculants. pp. 115-126. *In* P.H. Graham and S.C. Harris (Eds.). Biological Nitrogen Fixation Technology for Tropical Agriculture. CIAT, Cali, Columbia.

Roughley, R.J. and J.M. Vincent. 1967. Growth and survival of *Rhizobium* spp. in peat culture. J. Appl. Bacteriol. 30: 362-376.

Roughley, R.J., G.W. Griffith, and L.G. Gemell. 1990. The Australian Inoculants Research and Control Service (AIRCS). Procedures 1990. NSW Agriculture & Fisheries, Gosford NSW, Australia.

Roughley, R.J., R.D.M. Simanungkalit, L.G. Gemell, E.J. Hartley, and P. Cain. 1995. Growth and survival of root- nodule bacteria in legume inoculants stored at high temperatures. Soil Biol.Biochem. 27: 707-712.

Simanungkalit, R.D.M., R.J. Roughley, and A. Indrasumunar. 1999. The effect of carrier material and moisture potential on the quality of legume inoculants. Penelitian Pertanian Tanaman Pangan 18(1): 64-70.

Thompson, J.A. 1980. Production and quality control of legume inoculants. pp. 489-533. *In* F.J. Bergersen (Ed.). Methods for Evaluating Biological Nitrogen Fixation. John Wiley & Sons, New York.

Wardoux, P. 1991. Inoculant production I industry using sterile carriers. pp. 33-42. *In* Report on the Expert Consultation on Legume Inoculant Production and Quality Control. FAO, Rome.

Wirjosentono, M. dan Naniek W. Nuswantoro. 1995. Pengawasan mutu dan penggunaan inokulan Rhizobium pada proses intensifikasi kedelai di Indonesia. Makalah pada Seminar Hasil Penelitian Biological Nitrogen Fixation by Soybeans in Rotation with Rice Bogor on September 28, 1995 (Tidak dipublikasikan).

13. PROSPEK PUPUK ORGANIK DAN PUPUK HAYATI DI INDONESIA

R.D.M. Simanungkalit

SUMMARY

Prospects for organic fertilizer and biofertilizer in Indonesia. Quality organic fertilizers and biofertilizers are needed to sustain soil productivity. In fact, there is at present a decline in soil productivity in Indonesia. The quality of both types of currently commercialized fertilizers is needed to improve in order to increase their role in improving soil productivity. Since most of the commercial biofertilizers are compound biofertilizers, there is a strong need for the establishment of their quality standards. The regulation on organic fertilizers and soil conditioners (Permentan 02/Pert/HK.060/2/2006) has been issued, but what is more important, how to monitor it well. There is a number of organic matter sources in rural areas, as well as in municipal areas, which can be utilized to produce composts. The government should encourage farmers to use both organic fertilizers and biofertilizers, so that they fianally consider the use of both fertilizers as important as anorganic fertilizers. Potensial hazards when using municipal wastes as compost-making material should be considered. Compound biofertilizers are a new phenomenon in the fertilizer technology, therefore experience of production techniques is still lacking. Mixing different functional groups of microbes in order to produce the designed quality should guarantee that all microbes are still alive and in sufficient amounts when applied in the field.

Melihat pada kandungan bahan organik tanah di Indonesia yang rata-rata <2% sebagai indikasi, seyogianya permintaan terhadap pupuk organik menjadi banyak, tetapi pada kenyataannya tidak demikian. Ada beberapa alasan yang dapat dikemukakan penyebab kenyataan ini. Pupuk organik dianggap belum merupakan kebutuhan pokok dalam produksi tanaman dibandingkan dengan pupuk anorganik (sintetis). Sebelum revolusi hijau pada tahun 1960-an petani di Indonesia banyak menggunakan pupuk

organik. Pada saat ini petani lebih suka menggunakan pupuk anorganik dibandingkan dengan pupuk organik. Pupuk organik bersifat *voluminous* karena kandungan haranya rendah, sehingga memerlukan biaya tambahan untuk transportasi dan aplikasi kalau mendatangkan dari tempat lain. Memang sebaiknya bahan organik itu bila tersedia *in situ* diolah dulu menjadi kompas oleh petani bersangkutan. Efek dari penggunaan pupuk organik lambat, tidak seperti, pupuk anorganik yang respon tanaman berlangsung cepat.

Peristiwa kelangkaan pupuk anorganik yang sering terjadi beberapa tahun terakhir ini pada setiap musim tanam menyebabkan banyak petani harus mencari ke kota lain dan berani membeli mahal demi kelanjutan produksi tanamannya. Ini merupakan indikasi bagaimana pupuk anorganik sudah merupakan kebutuhan dasar, apalagi petani sudah menggunakan bibit unggul yang membutuhkan takaran pupuk yang tinggi untuk dapat mencapai potensi hasil bibit unggul tersebut. Petani menyadari kalau kebutuhan hara tanaman ini tidak dipenuhi hasil yang diperoleh akan menurun, oleh karena itu tidak heran kalau petani menjadi panik kalau terjadi kelangkaan pupuk.

Petani lebih memperhatikan kepentingan sesaat daripada kepentingan jangka panjang. Pemakaian pupuk anorganik terutama dalam jumlah berlebihan di atas takaran rekomendasi selama ini sudah mulai memberikan dampak lingkungan yang negatif seperti menurunnya kandungan bahan organik tanah, rentannya tanah terhadap erosi, menurunnya permeabilitas tanah, menurunnya populasi mikroba tanah, dan sebagainya. Memang sering penggunaan pupuk organik tidak memberikan manfaat jangka pendek tetapi jangka panjang melalui pelestarian sumber daya lahan dan produktivitasnya. Akibat dari kemiskinan petani, mereka lebih mengutamakan hasil panen yang tinggi setiap musim tanam daripada keletarian sumber daya lahan dan keberlanjutan produksi untuk kepentingan generasi mereka berikutnya.

Data produksi pupuk organik di Indonesia sulit diperoleh Kebanyakan produsen pupuk organik di Indonesia digolongkan sebagai usaha kecil menengah (UKM). Kalau banyaknya merek-merek pupuk organik yang beredar (baik yang terdaftar maupun yang tidak) digunakan sebagai indikasi maka potensi memproduksi pupuk organik cukup besar. Pupuk komersial ini dalam jumlah besar diproduksi di luar daerah produksi (ex situ), kemudian diangkut ke daerah yang membutuhkan. Karena kebutuhan pupuk organik ini per satuan luasnya sangat besar (5-20 t ha^{-1}), maka biaya transportasi akan membuat harga pupuk organik ini menjadi cukup mahal. Sebenarnya potensi untuk memproduksi sendiri pupuk organik (kompos) *in situ* cukup besar, mengingat banyak sisa-sisa tanaman di lahan-lahan petani atau disekitarnya yang dapat diolah menjadi kompos. Kotoran-

kotoran ternak yang dapat dikumpulkan dari peternak-peternak yang mungkin ada di sekitar usaha taninya dapat menjadi sumber pupuk organik yang penting. Kebiasaan untuk menanam tanaman pupuk hijau atau legum penutup tanah di sekitar lahannya perlu digalakkan, karena ini dapat menjadi sumber bahan organik yang murah.

Pupuk organik adalah salah satu komponen dalam pertanian organik, tetapi bukan monopoli pertanian organik. Pupuk organik juga dibutuhkan oleh pertanian konvensional untuk memelihara kelestarian lahan, memperbaiki kesuburan fisik, kimia, dan biologis tanah yang bersangkutan.

Sudah saatnya pemerintah lebih mendorong pemakaian pupuk organik pada pertanian di Indonesia melalui kebijaksanaan yang mendorong petani untuk menggunakan pupuk organik selain pupuk anorganik yang sudah digunakan selama ini.

Pengelolaan pupuk terpadu

Pengelolaan pupuk terpadu merupakan sistem yang mencoba mengkombinasikan penggunaan pupuk anorganik dengan pupuk organik dan atau pupuk hayati. Penurunan kualitas tanah sebagai akibat dari penggunaan pupuk anorganik secara terus-menerus dan dalam jumlah besar tanpa pemberian bahan organik yang cukup pada pertanian konvensional sudah mulai dirasakan. Penggunaan pupuk organik dan pupuk hayati yang bermutu akan membantu upaya untuk melestarikan produktivitas lahan dan produksi tanaman.

Hasil penelitian untuk melihat pengaruh penggunaan pupuk anorganik dan pupuk organik/pupuk hayati menunjukkan bahwa kombinasi ini dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk anorganik. Pupuk organik yang diberikan haruslah dalam jumlah yang cukup. Pupuk anorganik yang diberikan haruslah dalam jumlah yang tidak menekan pertumbuhan mikroba pupuk hayati. Jumlah populasi mikroba bersangkutan dapat menurun kalau takaran pupuk anorganik yang diberikan tinggi. Penelitian untuk menentukan kombinasi ini belum banyak dilakukan baik dilihat dari jenis tanamannya, jenis pupuk hayatinya, maupun agroekosistemnya. Karena itu penelitian ke arah ini perlu dilakukan agar pemanfaatan pupuk hayati dapat dilakukan secara optimal.

Pupuk hayati tunggal versus pupuk hayati majemuk

Kecenderungan perkembangan pupuk hayati yang beredar sekarang di Indonesia adalah ke arah produksi pupuk hayati majemuk. Dasar pemikiran ke arah ini tidak jelas. Kalau memang hasil penelitian yang menjadi dasar, tentunya kita dapat merujuk kepada publikasi hasil

penelitiannya. Tetapi kenyataannya sulit untuk mendapatkan publikasi tentang pupuk hayati majemuk. Barangkali yang menjadi dasar pertimbangannya adalah kemungkinan untuk mendapatkan manfaat dari setiap kelompok fungsional mikroba yang terkandung dalam satu pupuk hayati majemuk tersebut. Kalaupun itu dapat terjadi, tentunya diperlukan peneltian yang mendalam, sejauh mana mikroba-mikroba tersebut bersinergi satu sama lain.

Pupuk hayati majemuk adalah fenomena baru dibandingkan dengan pupuk hayati tunggal yang sudah mempunyai sejarah yang lama. Penelitian tentang pupuk hayati tunggal ini sudah banyak dilakukan. Sejarahnya dimulai dengan penggunaan *Rhizobium* sebagai inokulan pada kacang-kacangan. Jumlah populasi bakteri per biji harus berkisar 10^3–10^6 (tergantung pada besarnya) biji agar terjadi nodulasi pada akar kacang-kacangan bersangkutan. Pada negara tertentu seperti Australia tetap memproduksi inokulan monostrain, mereka beranggapan kalau mereka menggunakan multistrain maka jumlah bakteri dari strain yang dominan akan kurang dari jumlah yang diperlukan untuk menodulasi akar.

Pada pupuk hayati majemuk terdapat berbagai mikroba (kebanyakan lebih dari tiga jenis), tapi belum diketahui berapa jumlah minimal populasi masing-masing mikroba fungsional pada pupuk hayati majemuk tersebut agar dapat menjalankan fungsinya masing-masing setelah berada dalam tanah. Pada pupuk hayati tunggal seperti dicontohkan di atas, jumlah ini sudah jelas. Karena itu penelitian mengenai jumlah masing-masing mikroba fungsional itu diperlukan agar manfaat pupuk hayati majemuk tersebut betul-betul dapat diperoleh. Apa yang jelas pada pupuk hayati majemuk adalah jumlah masing-masing mikroba fungsional dalam bahan pembawa akan berkurang. Dalam bahan pembawa mikroba-mikroba ini akan berkompetisi, sehingga pada akhirnya hanya mikroba-mikroba tertentu yang akan dominan. Tidak mungkin diharapkan semua kelompok fungsional ini diharapkan hidup berdampingan secara damai. Secara teoritis mikroba-mikroba ini memainkan peranannya masing-masing. Kalau demikian terjadi maka dari suatu pupuk hayati majemuk diperoleh nitrogen hasil penambatan secara hayati, fosfat dan kalium hasil pelarutan, dan manfaat-manfaat lain.

Mutu pupuk organik dan pupuk hayati

Mutu pupuk organik

Berdasarkan analisis mutu pupuk organik komersial yang pernah dilakukan, mutunya tidak ada yang memenuhi syarat mutu berdasarkan Peraturan Mentan No. 02/Pert/HK.060/2/2006 tentang pupuk organik dan pembenah tanah (lihat Bab 11). Dengan sudah dikeluarkannya peraturan ini,

diharapkan perkembangan pupuk organik di Indonesia akan lebih maju. Pupuk organik akan betul-betul berfungsi sebagaimana seharusnya, karena melalui baku mutu yang ditetapkan diharapkan mutu pupuk organik komersial akan lebih baik, sehingga para konsumen (pengguna) pupuk organik dapat membeli pupuk organik yang bermutu. Selain itu adanya peraturan ini akan menciptakan iklim untuk memproduksi pupuk organik bermutu di antara produsen juga tumbuh.

Kompos adalah salah satu jenis pupuk organik yang dewasa ini banyak dikomersialkan. Petani menghasilkan sendiri komposnya dari bahan-bahan yang ada di sekitar usahataninya, seperti sisa tanaman, kotoran ternak, dan limbah-limbah pertanian lainnya. Karena kompos ini untuk dipakai sendiri, tidak perlu memenuhi peraturan baku mutu pupuk organik seperti yang disebutkan di atas. Hanya kompos komersial yang perlu memenuhi peraturan tersebut. Petani yang membuat komposnya sendiri hanya perlu diberi penyuluhan bagaimana membuat kompos yang baik.

Mutu pupuk hayati

Baku mutu pupuk hayati yang sudah umum ada di berbagai negara di dunia adalah adalah baku mutu pupuk hayati tunggal khususnya untuk inokulan rhizobia (lihat Bab 12), sehingga baku mutu ini dapat diperbandingkan satu sama lain. Tidak demikian halnya dengan pupuk hayati majemuk, informasi tentang baku mutunya tidak tersedia. Hal ini dapat dipahami karena di negara-negara maju sendiri yang dikembangkan adalah pupuk hayati tunggal.

Salah satu faktor yang menentukan mutu suatu pupuk hayati adalah keefektifan strain-strain/spesies-spesies mikroba yang tekandung dalam pupuk hayati tersebut. Mikroba tersebut pada dasarnya diisolasi dari tanah, kemudian diskrining berdasarkan sifat tertentu yang diinginkan (apakah tahan masam, kering, dan sebagainya), selanjutnya diformulasi sebagai inokulan. Mikroba pupuk hayati hasil rekayasa genetik tidak dapat digunakan untuk formulasi inokulan.

Strain/spesies yang terkandung dalam inokulan dapat diganti, bila berdasarkan hasil penelitian ditemukan *strain*/spesies yang lebih unggul, seperti yang dilakukan di Australia (lihat Bab 12). Mikroba ini sebelum dijadikan kandungan dari inokulan yang dikomersialkan, terlebih dahulu diuji keefektifannya terhadap jenis tanaman yang diinginkan tidak hanya di laboratorium, tetapi juga di lapangan pada berbagai agroekosistem. Oleh karena tidak jarang, pengujiannya hanya sampai pada percobaan pot di kamar kaca. Sehinga ketika diuji di lapangan mikroba tersebut tidak menunjukkan keunggulannya, mungkin karena tidak mampu bersaing dengan mikroba sejenis, tidak mampu beradaptasi dengan lingkungan atau sebab-sebab lain.

Pada tahun 1980-an inokulan rhizobia digunakan pada intensifikasi kedelai di berbagai provinsi di Indonesia. Ketika itu inokulan rhizobia yang sama digunakan untuk berbagai daerah pertanaman kedelai, pada hal strain-strain dalam inokulan tersebut belum tentu sesuai untuk lokasi-lokasi tersebut, belum lagi inokulan yang digunakan adalah multistrain sehingga populasi mikroba tiap *strain* menjadi berkurang, dan karena kompetisi hanya strain-strain tertentu yang bertahan hidup dan berkembang. Salah satu penyebab kurangnya adopsi teknologi inokulan pada masa itu adalah ketidak-konsistenan hasil kedelai yang diperoleh karena inokulasi. Ketidak-konsistenan ini berkaitan dengan mutu inokulan yang kurang memadai.

Sejak lama berbagai institusi (lembaga penelitian dan universitas) telah melakukan koleksi berbagai mikroba pupuk hayati di berbagai lokasi di Indonesia, tetapi koleksi ini belum dimanfaatkan sepenuhnya. Sebenarnya koleksi-koleksi ini merupakan sumber potensial untuk mikroba pupuk hayati unggul yang selanjutnya dapat diformulasi menjadi inokulan, asal saja mikroba ini diteliti secara sistematis sehingga akhirnya ditemukan mikroba-mikroba unggul yang diperlukan. Strain/spesies yang terkandung dalam inokulan dapat saja diganti, kalau memang ada yang lebih unggul. Sepert di Australia misalnya, sejumlah strain baru yang lebih unggul menggantikan strain-strain yang lama (lihat Bab 12).

Kebanyakan informasi yang tersedia tentang kemampuan kompetisi adalah pada pupuk hayati tunggal, khususnya rhizobia. Oleh karena kecenderungan di Indonesia saat ini adalah memproduksi pupuk hayati majemuk, maka perlu diteliti kemampuan kompetisi dari masing-masing mikroba tersebut di dalam inokulan dan setelah berada dan berkembang dalam tanah. Ini merupakan salah satu cara untuk dapat meningkatkan mutu dari pupuk hayati tersebut.

Sampai saat ini baku mutu pupuk hayati majemuk di Indonesia belum ada, pada hal komersialisasinya sudah lama berlangsung. Untuk melindungi pengguna dari menggunakan pupuk hayati yang tidak bermutu (substandar), perlu adanya baku mutu ini. Hanya pupuk hayati bermutu yang dapat membantu upaya pelestarian produktivitas lahan dan produksi tanaman

Sistem pengawasan mutu pupuk organik dan pupuk hayati

Pada dasarnya peraturan tentang baku mutu pupuk organik dan pupuk hayati itu hanyalah merupakan pedoman yang akan terlaksana kalau ada pengawasan. Tanpa pengawasan yang ketat, peraturan itu akan sedikit sekali artinya.

Perizinan harus betul-betul diberikan setelah memang uji mutu dan uji keefektifan memenuhi syarat. Selain itu pengawasan di lapangan juga harus dilakukan secara teratur, apakah pupuk organik dan pupuk hayati yang beredar sudah memenuhi syarat mutu.

Pengelolaan sampah kota

Sampah kota merupakan salah satu sumber bahan organik yang penting**.** Banyaknya timbunan sampah di berbagai kota besar telah menimbulkan masalah pembuangan bagi kota-kota yang bersangkutan. Sebagian besar dari sampah ini masih dapat dimanfaatkan untuk dibuat menjadi kompos, terutama sampah organik dari pasar maupun. rumah tangga (domestik) Nilai dari sampah organik ini sebagai sumber hara tanaman ditingkatkan melalui proses pengomposan.

Sampah rumah tangga yang dibuang sering masih tercampur antara sampah yang dapat didaur ulang dan sampah yang dapat diolah menjadi kompos. Agar pengumpulan sampah ini lebih efisien, sebaiknya pemerintah kota menyediakan bak-bak tempat pembuangan yang berbeda untuk sampah-sampah yang dapat diolah menjadi kompos dan tidak seperti plastik, pecahan gelas, dan sebagainya. Sistem pengelolaan sampah seperti ini berjalan baik di berbagai negara industri. Fasilitas seperti ini disediakan di daerah-daerah perumahan, sehingga kalau penghuni akan membuang sampahnya, ia sudah memisahkan sampahnya yang akan dibuang. Tentunya cara ini akan membantu para pemulung dalam mengumpulkan sampah-sampah anorganik yang dapat didaurulang.

Masalah utama dalam memproduksi kompos adalah terdapatnya unsur-unsur berbahaya yang mungkin berbahaya bagi pertumbuhan tanaman dan/atau kesehatan manusia. Sumber utama unsur-unsur berbahaya ini adalah sampah dan limbah kota yang sering mengandung logam berat arsenat, timbal, dan kadmium yang tinggi. Oleh karena itu perlu kehati-hatian kalau menggunakan sampah dan limbah kota sebagai pupuk organik.

GLOSARIUM

Acarina: Sebangsa kutu/tungau yang hidup di antara serasah yang lembap.

Acetylglucosamin: Unit monomer dari peptidoglikan, suatu turunan monosakarida glukosa, secara kimia merupakan suatu amida di antara glucosamine dan asam asetat.

Acetylmuramic: Unit monomer dari peptidoglikan.

Aerob: Kondisi tersedia oksigen.

Airlift: Pengaduk medium dalam fermentor yang menggunakan udara.

Aktivator*:* Sesuatu yang bisa menyebabkan mulainya suatu proses.

Allelopati: Pelepasan suatu unsur hara oleh suatu tanaman yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman lain.

Amilase: Enzim pengurai amilum.

Amilum: Pati, tersusun dari beberapa molekul monosakarida.

Amorf: Tidak berbentuk/beraturan.

Anaerob: Kondisi tanpa oksigen.

Aporrechtodea caligonosa*:* Sering disebut juga cacing abu-abu atau cacing selatan (*southern worm*), merupakan salah satu spesies endogeik yang terluas penyebarannya. Sering terdapat pada akar tanaman. Seperti namanya memang cacing ini berwarna abu-abu atau sedikit *pink* dengan panjang dua atau tiga inci.

Arbuskel: Merupakan struktur dalam akar berbentuk seperti-pohon berasal dari cabang-cabang hifa intraradikal cendawan mikoriza arbuskuler setelah hifa cabang menembus dinding sel korteks, dan terbentuk antara dinding sel dan membran plasma. Struktur ini dianggap sebagai tempat transfer hara mineral dari cendawan ke tanaman inang.

Bahan organik: Merupakan semua residu tanaman, binatang, dan senyawa-senyawa organik lain yang sudah terombak atau baru sebagian terombak yang disintesis oleh mikroba tanah ketika perombakan terjadi.

Bakteri bintil akar: Merupakan bakteri penambat nitrogen yang membentuk bintil pada akar, sebagai indikasi telah terjadinya simbiosis.

Bakteri kemoautotrof: Bakteri yang mendapatkan energi dari molekul anorganik seperti H_2S atau NH_4 melalui proses oksidasi untuk mereduksi CO_2 yang merupakan sumber energinya satu-satunya.

Bakteri heterotrof: Bakteri yang menggunakan bentuk organik sebagai sumber karbonnya.

Biodekomposer: Pengurai hayati

Bioaktivator: Merupakan pupuk hayati yang mengandung mikroba perombak yang dipakai dalam proses pengomposan.

Cacing anesik (***anecic worms***): Merupakan cacing yang biasanya lebih besar yang membangun lubang-lubang permanen dalam tanah dan muncul di permukaan tanah hanya untuk menarik daun-daunan atau bahan organik lain ke dalam lubang.

Cacing epigeik (***epigeic worms***): Merupakan cacing tanah yang hidup pada bahan organik yang sedang membusuk, tidak dalam tanah.

Cacing endogeik (***endogeic worms***): Merupakan cacing tanah yang jarang muncul di permukaan tanah. Beberapa jenis cacing endogeik menghuni rhizosfir, daerah yang dekat dengan akar tanaman, tempat dimana cacing tersebut makan tanah yang sudah diperkaya dengan akar, bakteri dan fungi yang membusuk.

Carboxymethylcellulose: Turunan selulosa yang dapat larut (selulosa *amorf*).

Casting: Merupakan istilah untuk menyebutkan ekskresi cacing tanah.

Cendawan mikoriza arbuskuler: Merupakan satu kelompok cendawan tanah yang simbion obligat yang tidak dapat melestarikan pertumbuhan dan reproduksinya bila terpisah dari tanaman inang. Hifa cendawan ini menembus dinding sel korteks.

CPO (c**rude palm oil**): Minyak kelapa sawit mentah (belum diproses lebih lanjut).

Denaturasi: Pelepasan sebagian atau seluruh pelipatan (konformasi) spesifik rantai polipeptida protein asli.

Disakarida: Karbohidrat yang terdiri atas dua unit monosakarida yang berikatan kovalen.

Eisenia foetida: Cacing merah, merupakan cacing epigeik yang kecil, mempunyai panjang tubuh sekitar tiga inci atau kurang, berkembang dengan pesat di dalam kotak pemeliharaan. Beberapa jenis cacing ini mempunyai garis kuning antara segmen-segmennya dan yang lain tidak.

Ektomikoriza: Merupakan kelompok cendawan mikoriza yang hifanya menembus akar dan berkembang di sekitar sel korteks membentuk mantel tetapi tidak menembus dinding sel.

Endomikoriza: Merupakan kelompok cendawan mikoriza yang hifanya menembus dinding sel akar, masuk ke dalam sel akar dan membentuk masa hifa dalam sel.

Enzim: Protein yang dikhususkan untuk mengkatalisis reaksi metabolik tertentu.

Epigeik: Merupakan cacing tanah yang hidup pada bahan organik yang sedang membusuk, tidak dalam tanah.

Fermentasi sistem batch: Fermentasi sistem tumpak. Pada sistem ini setelah inokulasi tidak ada pengaturan konsentrasi substrat atau metabolit padat dan cair yang dihasilkan

***Frankia**:* Merupakan satu genus aktinomisetes yang bersimbiosis dengan tanaman kehutanan yang bukan kacang-kacangan, membentuk bintil akar dan menambat nitrogen.

Fungi: Salah satu Kingdom organisme eukariot, bersifat hetrotrofik, fase asimilatif berupa miselium, mencerna makanan secara eksternal (di luar sel) dengan mengeluarkan enzim-enzim, cara makannya dengan mengabsorbsi nutrisi. Hidup sebagai saprob (hidup dari bahan organik mati) atau parasit.

Glomalin: Zat berlendir yang merupakan glikoprotein yang dikeluarkan oleh hifa cendawan mikoriza arbuskuler di dalam tanah dan menjadi zat perekat partikel-partikel tanah sehingga meningkatkan stabilitas tanah.

Glucosidase: Komponen enzim selulosa yang dapat menghidrolisis selobiosa dan selooligomer-selooligmer pendek menjadi glukosa.

Gnobiotik: menyatakan lingkungan tumbuh yang dimonitor secara mikrobiologis; identitas mikrobanya dikenal, biasanya ditumbuhkan pada lingkungan yang bebas mikroba dan diinfeksi dengan organisme tertentu (spesifik)

Gram negatif*:* Hasil pewarnaan gram, bila zat warna violet kristal tidak melekat pada olesan bakteri setelah dibilas dengan alkohol, dan zat warna safranin yang melekat, sehingga olesan bakteri berwarna merah.

Gram positif: Hasil pewarnaan gram, bila zat warna violet kristal yang dioleskan tetap menempel ketika dibilas dengan alkohol, sedangkan zat warna sfranin yang dioleskan tidak menempel, sehingga olesan berwarna violet.

Guaiacol: Suatu subtrat chromogenik dari lakase dan peroksidase yang digunakan dalam suatu medium yang mengandung lignin. Produk oksidasinya berupa quinon yang berwarna merah di bawah dan sekitar koloni fungi/bakteri ligninolitik.

Hemiselulosa: Suatu polisakarida pada tanaman yang berfungsi sebagai bahan cadangan atau penguat. Disebut juga xilan, paling banyak dan tersebar luas di alam.

Hifa: Salah satu dari filamen-filamen suatu miselium.

Hiperparasit: Suatu parasit yang memparasitir suatu parasit lain.

Humus *F*: Fraksi bahan organik tanah yang kurang lebih stabil yang tersisa sesudah bagian terbesar dari residu tanaman dan hewan yang ditambahkan sudah dirombak. Biasanya humus ini berwarna gelap.

Humifikasi: Proses yang terlibat pada dekomposisi bahan organik dan menyebabkan terbentuknya humus.

Imobilisasi: Perubahan suatu unsur dari bahan anorganik menjadi organik pada jaringan mikroba atau pada jaringan tanaman, sehingga menyebabkan unsur tersebut menjadi tidak tersedia bagi organisme lain atau bagi tanaman.

Inaktivasi: Membuat sesuatu menjadi tidak aktif.

Inokulan: Kultur murni atau campuran mikroba yang diformulasi pada suatu bahan pembawa tertentu dan diberikan ke tanah atau ke tanaman.

Introduksi: Memberikan mikroorganisme tertentu pertama kali pada suatu tempat.

Kascing*:* Kompos cacing; terdiri atas kotoran cacing dan sisa-sisa bahan organik yang tidak termakan oleh cacing.

Keprasan: Pertanaman tebu yang berasal dari tunggul tebu yang tumbuh kembali.

Khitosan: Turunan kitin yang lebih larut air.

Kitin: Polisakarida yang tersusun dari unit ~-acetyl glucosa (N-asetyl-D-glukosa-2-amine) melalui ikatan ß-1.4

Kompos: Bahan organik, seperti daun-daunan, jerami, alang-alang, rumput-rumputan, dedak padi, batang jagung, sulur, carang-carang serta kotoran hewan yang telah mengalami dekomposisi oleh mikroorganisme pengurai sehingga dapat dimanfaatkan untuk memperbaiki sifat-sifat tanah, selain itu di dalam kompos terkandung hara-hara mineral yang berfungsi sebagai penyedia makanan bagi tanaman.

Konidia: Spora aseksual pada fungi.

Lakase: Salah satu enzim perombak lignin, umumnya pada fungi..

Lignin: Heteropolimer tak beraturan yang tersusun dari tiga subunit phenylpropana (coniferyl, sinapyl, dan p-coumaryl alkohol). Konstituen organik kompleks yang menyusun serat kayu pada jaringan tanaman, bersama dengan selulosa mengikat sel-sel bersama dan memberi kekuatan pada jaringan. Lignin tahan terhadap serangan mikroba dan sesudah berbagai modifikasi menjadi bagian dari bahan organik tanah

Lignoselulosa: Bahan organik yang mengandung sebagian besar lignin dan selulosa.

Ligninoselulolitik: Fungi/bakteri yang memiliki aktivitas lignase

Limbah asli: Limbah cair yang keluar langsung dari pabrik biasanya dialirkan melalu saluran (*outlet*).

Limbah kolam: Limbah asli yang sudah ditampung dalam kolam penampungan limbah, sebelum dialirkan ke perairan umum.

Lipase: Enzim pengurai lemak.

***Lumbricus terrestris**:* Cacing anesik yang besar dengan ekor yang datar, bergerak perlahan sekali pada malam hari. Badannya sangat besar, sehingg tidak bisa bertahan hidup dalam tanah pada kotak kompos tertutup.

Makrofauna: Bagian dari populasi hewan yang terdiri atas individu-individu yang dapat dilihat dengan jelas dengan mata terbuka.

Megaplasmid: Plasmid yang berukuran besar; istilah ini mula-mula digunakan pada plasmid *Rhizobium meliloti.*

Mikroba aerob: Mikroba yang dapat tumbuh bila ada oksigen.

Mikroba anaerob: Mikroba yang tumbuh tanpa oksigen.

Mikroba kemoorganotrof: Merupakan mikroba yang memperoleh energinya dari hasil oksidasi senyawa-senyawa organik

Mikroba pelarut fosfat: Mikroba tanah yang mampu melarutkan ikatan fosfat melalui asam organik yang dikeluarkan.

Mikroflora: Bagian dari populasi tanaman yang terdiri atas individu-individu yang terlalu kecil untuk dapat dibedakan dengan jelas tanpa bantuan mikroskop.

Mikroorganisme thermofilik: Mikroorganisme yang tumbuh baik pada suhu lebih dari 45 ^{0}C.

Miselium: Kumpulan hifa.

Moisture-holding capacity: Adalah kemampuan tanah menahan dan memegang air.

Monosakarida: Karbohidrat yang terdiri atas satu jenis gula.

Mulsa: Bahan penutup lapisan tanah dari bahan tanaman atau bahan-bahan kering organik, pasir, batu atau bahan sintetis untuk mencegah penguapan air, mengatur suhu, dan mengendalikan gulma.

Nodul: Pembesaran atau pembengkakan akar tanaman kacang-kacangan karena diinfeksi oleh bakteri penambat nitrogen, dan akar tanaman yang bukan kacang-kacangan (tanaman kehutanan) oleh aktinomisetes *Frankia.*

Organisme: Makhluk hidup.

Otoklaf: Alat sterilisasi yang mensterilkan bahan dan alat dengan uap panas bertekanan.

PC *(Plant cane)*: Pertanaman tebu yang ditanam berasal dari stek.

Pembenah tanah: Bahan sintetik atau alami, organik atau mineral, berbentuk padat atau cair yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.

Penambatan nitrogen secara biologis: Transformasi nitrogen udara oleh bakteri simbiotik dan bakteri hidup bebas menjadi senyawa nitrogen yang dapat digunakan tanaman sebagai hara.

Pengelolaan hara terpadu: Sistem pengelolaan hara untuk mempertahankan atau meningkatkan kesuburan tanah untuk kelangsungan produktivitas tanaman melalui optimalisasi penggunaan pupuk organik, pupuk hayati, dan anorganik.

Pengomposan aerob: Pengomposan yang berlangsung dengan bantuan mikroorganisme aerob, misalnya fungi.

Pengomposan anaerob: Pengomposan yang berlangsung dengan bantuan mikroorganisme anaerob seperti *Clostridium*, *Bacillus*, dan *Cytophaga.*

Penukar ion dasar: Humus, senyawa karbon organik yang mempunyai kemampuan mengikat dan melepaskan kembali ion-ion dalam tanah.

Peptidoglikan: Komponen struktur dinding sel bakteri, yang tersusun oleh unit secara bergantian acetylglucosamine dan N-acetylmuramic acid, yang

berikatan silang dengan oligopeptida pada residu asam laktat dari asam N-acetylmuramat.

Pertanian berkelanjutan: Pertanian yang dikelola sedemikian rupa sehingga dapat memenuhi kebutuhan manusia yang berubah sambil mempertahankan atau meningkatkan kualitas lingkungan dan melestarikan sumber daya alam.

Pertanaman lorong (alley cropping): Merupakan pertanaman tahunan dalam lorong antarbaris pepohonan atau semak, biasanya berupa tanaman leguminosa yang tahan belukar lebat. Dedaunan dan kekayuan dari pepohonan dan semak itu dimanfaatkan sebagai mulsa dan juga sering dipakai sebagai pakan ternak, kayu bahan bangunan, kayu bahan bakar, dan lain-lain.

Pertanian organik: Suatu sistem pertanian yang mendorong kesehatan tanah dan tanaman melalui praktek seperti pendaurulangan hara dari bahan-bahan organik (seperti kompos dan sampah tanaman), rotasi tanaman, pengolahan tanah yang tepat dan menghindari penggunaan pupuk dan pestisida sintetis.

Pupuk mikroba multiguna (PMMG): Merupakan sebutan untuk inokulan yang mengandung konsorsium barbagai mikroflora yang dapat menambat N_2 bebas, melarutkan P dan K, menghasilkan senyawa pemacu tumbuh, antipatogen, merombak dan mengubah residu organik menjadi bahan organik tanah.

Polimer: Istilah yang digunakan untuk menyebut molekul berukuran besar dari unit struktural berulang (monomer) yang berikatan dengan ikatan kovalen.

Polisakarida: Makromolekul linear atau bercabang yang terdiri atas banyak unit monosakarida yang dihubungkan oleh ikatan glikosidik.

Potensial air tanah (***soil water potential***): Ukuran perbedaan antara energi bebas air tanah dan energi bebas air murni.

Protease: Enzim pengurai protein.

Pupuk hayati: Merupakan inokulan berbahan aktif organisme hidup yang berfungsi untuk menambat hara tertentu atau memfasilitasi tersedianya hara dalam tanah bagi tanaman. Memfasilitasi tersedianya hara ini dapat berlangsung melalui peningkatan akses tanaman terhadap hara misalnya oleh cendawan mikoriza arbuskuler, pelarutan oleh mikroba pelarut fosfat, maupun perombakan oleh fungi, aktinomiset atau cacing tanah. Penyediaan hara ini berlangsung melalui hubungan simbiotis atau non-simbiotis.

Pupuk hijau: Merupakan semua bahan hijauan dari tanaman, baik yang ditanam secara khusus atau dari sisa tanaman, maupun yang berasal dari tanaman liar, dan bahan ini langsung digunakan atau dibenamkan.

Pupuk kandang *(*pukan*)*: Merupakan semua produk buangan dari binatang peliharaan yang dapat digunakan untuk menambah hara, memperbaiki sifat fisik, dan biologi tanah.

Pupuk organik: Merupakan nama kolektif untuk semua jenis bahan organik asal tanaman dan hewan yang dapat dirombak menjadi hara tersedia bagi tanaman.

Quinon: Produk oksidasi guaiacol yang berwarna merah muda pada medium indulin, yang menunjukkan aktivitas ligninolitik dari koloni fungi atau bakteri.

Rasio C/N: Merupakan perbandingan antara berat karbon organik dan bobot nitrogen total pada bahan tanah atau pada bahan organik.

Rhizobacteria pemacu tumbuh tanaman (plant growth-promoting rhizobacteria): Merupakan sekelompok bakteri yang hidup pada rhizosfir tanaman.

Rhizobia: Nama kolektif untuk semua spesies bakteri bintil akar pada kacang-kacangan.

Rhizobia tumbuh lambat: Rhizobia penghasil basa yang memerlukan waktu 3-5 hari untuk menghasilkan kekeruhan yang sedang pada media cair dan waktu penggandaan rata-rata 6-8 jam. Kebanyakan *strain* dalam kelompok ini tumbuh paling baik kalau menggunakan pentosa sebagai sumber karbon.

Rhizobia tumbuh cepat: Rhizobia penghasil asam yang membentuk kekeruhan yang nyata pada media cair dalam 2-3 hari dan waktu penggandaan rata-rata 2-4 jam. Rhizobia ini dapat tumbuh pada bermacam-macam karbohidrat. Tumbuh paling baik pada glukosa, mannitol atau sukrosa.

Rhizosfir: Bagian tanah yang berbatasan dengan akar tanaman, dimana tempat ini banyak dihuni oleh mikroorganisme dan kehidupan mikroorganisme ini banyak dipengaruhi oleh akar.

Selulosa: Polimer dari satuan-satuan glukosa yang terdapat pada semua bahan tanaman; merupakan senyawa biologis yang paling banyak terdapat di bumi.

Siderophore: Suatu zat yang memiliki berat molekul rendah, yang dapat terikat erat dengan besi (Fe). Siderophore dihasilkan oleh berbagai mikroorganisme sehingga dapat menjamin bahwa mikroorganisme bersangkutan dapat memperoleh cukup Fe dari lingkungan tumbuhnya.

Sipramin: Singkatan dari sisa proses asam amino; sisa fermentasi asam amino (glutamate dan L-lysine), merupakan bahan organik cair yang berasal dari hasil samping pembuatan penyedap masakan (monosodium glutamate atau MSG) dari bahan baku tetes tebu.

Sistem olah tanah konservasi: Praktek pengolahan tanah yang dapat mengendalikan erosi dan mempertahankan kelembapan tanah.

Sogolan: Tunas tidak produktif yang tumbuh pada buku-buku batang tebu yang rebah.

Spora: Istilah umum untuk struktur reproduksi pada fungi/bakteri, bersel satu atau lebih.

Steril: Keadaan bebas mikroba

Tandan buah kosong atau tandan kosong kelapa sawit *(*TKKS*)*: Sisa tandan yang buahnya sudah diambil.

Vermikompos: Istilah atau nama untuk kompos yang kaya hara, rapuh, berwarna hitam yang terbentuk ketika cacing memakan seonggok bahan organik.

Vermikomposting: Merupakan proses pengomposan oleh cacing tanah tertentu.

Vesikel: Merupakan struktur berdinding tipis berbentuk bulat, lonjong atau tidak teratur pada cendawan mikoriza arbuskuler. Struktur ini berfungsi sebagai organ penyimpan hara tanaman dan produk-produk lain.

MENTERI PERTANIAN
REPUBLIK INDONESIA

PERATURAN MENTERI PERTANIAN
NOMOR : 02/Pert/HK.060/2/2006

TENTANG

PUPUK ORGANIK DAN PEMBENAH TANAH

DENGAN RAHMAT TUHAN YANG MAHA ESA

MENTERI PERTANIAN,

Menimbang:
a. bahwa pupuk organik dan pembenah tanah sangat berperan dalam mendukung keberhasilan pengembangan budi daya tanaman;
b. bahwa untuk melindungi konsumen/pengguna dan produsen/pelaku usaha, pupuk organik dan pembenah tanah yang akan diedarkan di wilayah negara RI harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal;
c. bahwa atas dasar hal-hal tersebut, dipandang perlu menetapkan ketentuan mengenai pupuk organik dan pembenah tanah;

Mengingat:
1. Undang-Undang Nomor 5 Tahun 1984 tentang Perindustrian (Lembaran Negara Tahun 1984 Nomor 22, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.274);
2. Undang-Undang Nomor 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman (Lembaran Negara Tahun 1992 Nomor 46, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.478);
3. Undang-Undang Nomor 7 Tahun 1994 tentang Pengesahan *Agreement Establising The World Trade Organization* (Persetujuan Pembentukan Organisasi Perdagangan Dunia) (Lembaran Negara Tahun 1994 Nomor 57, Tambahan Lembaran Negara Nomor 35);
4. Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1995 tentang Kepabeanan (Lembaran Negara Tahun 1995 Nomor 75, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.611);

5. Undang-Undang Nomor 23 Tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lembaran Negara Tahun 1997 Nomor 68, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.699);
6. Undang-Undang Nomor 8 Tahun 1999 tentang Perlindungan Konsumen (Lembaran Negara Tahun 1999 Nomor 42, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.478);
7. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2004 tentang Pemerintahan Daerah (Lembaran Negara Tahun 2004 Nomor 125, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.437);
8. Peraturan Pemerintah Nomor 85 Tahun 1999 tentang Perubahan Atas Peraturan Pemerintah Nomor 18 Tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (Lembaran Negara Tahun 1999 Nomor 190, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.910);
9. Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2000 tentang Kewenangan Pemerintah dan Kewenangan Propinsi sebagai Daerah Otonom (Lembaran Negara Tahun 2000 Nomor 54, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.952);
10. Peraturan Pemerintah Nomor 102 Tahun 2000 tentang Standarisasi Nasional (Lembaran Negara Tahun 2000 Nomor 199, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.020);
11. Peraturan Pemerintah Nomor 8 Tahun 2001 tentang Pupuk Budidaya Tanaman (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 14, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.079);
12. Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2001 tentang Pembinaan dan Pengawasan Penyelenggaraan Perlindungan Konsumen (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 103, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.126);
13. Keputusan Presiden Nomor 187/M Tahun 2004 tentang Pembentukan Kabinet Indonesia Bersatu;
14. Peraturan Presiden Nomor 9 Tahun 2005 tentang Kedudukan, Tugas, Fungsi, Susunan Organisasi dan Tata Kerja Kementerian Negara Republik Indonesia juncto Peraturan Presiden Nomor 62 Tahun 2005;
15. Peraturan Presiden Nomor 10 Tahun 2005 tentang Unit Organisasi dan Tugas Eselon I Kementerian Negara Republik Indonesia;
16. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 797/Kpts/ TP.830/10/1984 tentang Pemasukan Media Pertumbuhan Tanaman Ke Dalam Wilayah Negara Republik Indonesia;

17. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 170/Kpts/ OT.210/3/2002 tentang Pelaksanaan Standarisasi Nasional di Bidang Pertanian;
18. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 237/Kpts/ OT.210/4/2003 tentang Pedoman Pengawasan Pengadaan, Peredaran dan Penggunaan Pupuk An-Organik.
19. Paraturan Menteri Pertanian Nomor 299/Kpts/ OT.140/7/2005 tentang Organisasi dan Tata Kerja Departemen Pertanian;
20. Paraturan Menteri Pertanian Nomor 341/Kpts/ OT.140/9/2005 tentang Kelengkapan Organisasi dan Tata Kerja Departemen Pertanian;

MEMUTUSKAN:

Menetapkan: PERATURAN MENTERI PERTANIAN TENTANG PUPUK ORGANIK DAN PEMBENAH TANAH

BAB I
KETENTUAN UMUM

Pasal 1

Dalam Peraturan ini yang dimaksud dengan:

1. Pupuk organik adalah pupuk yang sebagian besar atau seluruhnya terdiri atas bahan organik yang berasal dari tanaman dan atau hewan yang telah melalui proses rekayasa, dapat berbentuk padat atau cair yang digunakan untuk mensuplai bahan organik, memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.
2. Pembenah tanah adalah bahan-bahan sintesis atau alami, organik atau mineral berbentuk padat atau cair yang mampu memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologi tanah.
3. Formula pupuk organik adalah kandungan bahan-bahan organik dan unsur hara makro dan atau unsur hara mikro.
4. Formula pembenah tanah adalah kandungan bahan-bahan organik dan atau mineral dan atau bahan sintetis.
5. Rekayasa formula pupuk organik adalah serangkaian kegiatan rekayasa, baik secara fisik dan atau biologis untuk menghasilkan formula pupuk organik.

6. Rekayasa formula pembenah tanah adalah serangkaian kegiatan rekayasa, baik secara fisik dan atau biologis untuk menghasilkan formula pembenah tanah.
7. Uji mutu pupuk organik adalah analisis komposisi dan kadar hara pupuk organik yang dilakukan di laboratorium berdasarkan metode analisis yang ditetapkan.
8. Uji mutu pembenah tanah adalah analisis komposisi pembenah tanah yang dilakukan di laboratorium berdasarkan metode analisis yang ditetapkan.
9. Sertifikat formula pupuk organik atau pembenah tanah adalah surat keterangan yang diberikan oleh lembaga uji mutu terhadap formula pupuk organik/pembenah tanah yang telah diuji mutu oleh lembaga uji mutu tersebut.
10. Standar mutu pupuk organik adalah komposisi dan kadar hara pupuk organik yang ditetapkan oleh Badan Standarisasi Nasional dalam bentuk SNI, atau yang ditetapkan oleh Menteri Pertanian dalam bentuk Persyaratan Teknis Minimal.
11. Standar mutu pembenah tanah adalah komposisi pembenah tanah yang ditetapkan oleh Badan Standarisasi Nasional dalam bentuk SNI, atau yang ditetapkan oleh Menteri Pertanian dalam bentuk Persyaratan Teknis Minimal.
12. Uji efektivitas pupuk organik adalah uji lapang untuk mengetahui pengaruh dari pupuk organik terhadap pertumbuhan dan produksi tanaman serta untuk mengetahui pengaruhnya terhadap peningkatan kesuburan tanah dalam arti peningkatan C-organik tanah.
13. Uji efektivitas pembenah tanah adalah uji laboratorium untuk mengetahui pengaruh dari pembenah tanah terhadap perbaikan salah satu sifat tanah yaiitu sifat fisik, dan/atau kimia, dan/atau biologi tanah.
14. Persyaratan teknis minimal pupuk organik dan pembenah tanah adalah persyaratan teknis minimal yang ditetapkan oleh Menteri Pertanian.
15. Pengadaan pupuk organik atau pembenah tanah adalah kegiatan penyediaan pupuk organik atau pembenah tanah baik berasal dari produksi dalam negeri maupun dari luar negeri.
16. Peredaran adalah kegiatan atau serangkaian kegiatan dalam rangka penyaluran pupuk organik atau pembenah tanah di dalam negeri baik untuk diperdagangkan maupun tidak untuk diperdagangkan.
17. Penggunaan adalah kegiatan pemanfaatan pupuk organik atau pembenah tanah oleh pengguna.
18. Pengawasan adalah pemeriksaan untuk menentukan kesesuaian komposisi dan kadar hara pupuk organik atau pembenah tanah terhadap standar mutu atau persyaratan teknis minimal.

19. Lembaga Penguji adalah instansi atau laboratorium yang mempunyai kompetensi untuk melakukan pengujian mutu dan efektivitas pupuk organik dan atau pembenah tanah yang telah terakreditasi atau ditunjuk.

Pasal 2

(1) Peraturan ini dimaksudkan sebagai dasar hukum untuk melaksanakan pendaftaran, pengadaan, peredaran, penggunaan, dan pengawasan pupuk organik atau pembenah tanah.
(2) Tujuan pengaturan ini agar pupuk organik atau pembenah tanah yang beredar di wilayah negara Republik Indonesia memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal.

Pasal 3

Ruang lingkup pengaturan ini meliputi pengadaan, persyaratan pendaftaran, tata cara pendaftaran, peredaran, penggunaan, pengawasan dan pembinaan.

BAB II
PENGADAAN

Pasal 4

(1) Pengadaan pupuk organik atau pembenah tanah dapat dilakukan melalui produksi dalam negeri atau pemasukan dari luar negeri.
(2) Pengadaan pupuk organik atau pembenah tanah yang diproduksi didalam negeri atau pemasukan dari luar negeri sebagaimana dimaksud pada ayat (1) wajib memenuhi standar mutu dan standar efektivitas atau persyaratan teknis minimal, seperti tercantum pada Lampiran I Peraturan ini.
(3) Pengadaan pupuk organik atau pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat dilakukan oleh perorangan atau badan hukum.

Pasal 5

(1) Perorangan atau badan hukum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (3) yang akan memproduksi pupuk organik atau pembenah tanah harus terlebih dahulu mendapat izin dari Bupati atau Walikota setempat.
(2) Bupati atau Walikota dalam memberikan izin sebagaimana dimaksud pada ayat (1) wajib memperhatikan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Pasal 6

(1) Pupuk organik atau pembenah tanah yang akan diproduksi harus berasal dari formula pupuk organik atau formula pembenah tanah hasil rekayasa.
(2) Formula pupuk organik atau formula pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2) dan lulus uji mutu dan uji efektivitas.

Pasal 7

(1) Pupuk organik dan atau pembenah tanah yang dimasukkan dari luar negeri sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (1) harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2) dan lulus uji mutu dan uji efektivitas.
(2) Perorangan atau badan hukum sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (3) yang akan memasukkan pupuk organik atau pembenah tanah harus terlebih dahulu mendapat izin sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku dan ketentuan di bidang perkarantinaan.

BAB III
PERSYARATAN PENDAFTARAN

Pasal 8

(1) Setiap formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang akan diedarkan untuk penggunaan di sektor pertanian, harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2).
(2) Formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang akan didaftarkan oleh pemohon tidak boleh menggunakan nama dagang formula atau merek yang sama, atau hampir sama dengan nama dagang formula lain yang terdaftar.

Pasal 9

Permohonan pendaftaran formula pupuk organik atau formula pembenah tanah dapat dilakukan oleh perorangan atau badan hukum yang memenuhi persyaratan:

1. Akte Pendirian Perusahaan dan perubahannya (bagi badan hukum);

2. Surat Izin Usaha Perdagangan/Tanda Daftar Usaha Perusahaan/-Rekomendasi untuk PMA/PMDN;
3. Nomor Pokok Wajib Pajak (NPWP);
4. KTP penanggungjawab;
5. Surat Keterangan Domisili Perusahaan;
6. Pemilik formula yang bersangkutan atau kuasanya;
7. Agen yang ditunjuk oleh pemilik formula yang berasal dari luar negeri; dan
8. Sertifikat merek atau surat pendaftaran merek dari Direktorat Jenderal Hak Kekayaan Intelektual, Departemen Hukum dan HAM.

BAB IV
TATA CARA PENDAFTARAN

Bagian Kesatu
Permohonan Pendaftaran

Pasal 10

(1) Permohonan pendaftaran pupuk organik atau pembenah tanah diajukan secara tertulis kepada Kepala Pusat Perizinan dan Investasi, dengan menggunakan formulir seperti tercantum pada Lampiran II Peraturan ini, dan dibubuhi materai secukupnya berdasarkan peraturan perundang-undangan yang berlaku.
(2) Permohonan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilengkapi persyaratan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9.

Pasal 11

(1) Kepala Pusat Perizinan dan Investasi setelah menerima permohonan pendaftaran secara lengkap, paling lambat dalam jangka waktu 10 (sepuluh) hari kerja, wajib memberikan jawaban secara tertulis mengenal diterima atau ditolaknya permohonan pendaftaran.
(2) Apabila pendaftaran sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dapat diterima, kepada pemohon diwajibkan untuk melakukan pengujian mutu formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang didaftarkan.
(3) Apabila permohonan sebagaimana dimaksud pada ayat (1) ditolak, kepada pemohon diberikan surat penolakan dengan disertai alasan secara tertulis.

(4) Apabila dalam jangka waktu sebagaimana dimaksud pada ayat (1), Kepala Pusat Perizinan dan Investasi belum dapat memberikan jawaban tertulis, permohonan pendaftaran dianggap diterima, dan kepada pemohon diwajibkan melakukan pengujian mutu pupuk organik atau formula pembenah tanah yang didaftarkan.

Bagian Kedua

Pengujian

Pasal 12

(1) Untuk menjamin formula pupuk organik atau formula pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada Pasal 8 ayat (1) dapat memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal dilakukan uji mutu dan uji efektivitas.
(2) Untuk pupuk organik atau pembenah tanah yang berasal dari pemasukan, uji mutu dan uji efektivitas hanya dilakukan terhadap pupuk organik atau pembenah tanah yang pertama
(3) Uji mutu dan uji efektivitas sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilakukan oleh lembaga pengujian yang telah terakreditasi atau ditunjuk.

Pasal 13

(1) Penunjukan Lembaga Penguji sebagaimana dimaksud dalam Pasal 12 ayat (3) didasarkan pada persyaratan sebagai berikut:
    1. mempunyai bangunan laboratorium yang memenuhi persyaratan;
    2. mempunyai peralatan pengujian mutu pupuk organik dan pembenah tanah yang memenuhi persyaratan;
    3. mempunyai lahan atau sarana lain yang cukup untuk melakukan uji efektivitas;
    4. mempunyai tenaga ahli atau analis di bidang pengujian mutu pupuk organik dan pembenah tanah;
    5. mampu melakukan pengujian pupuk organik dan pembenah tanah berdasarkan metode analisis yang ditetapkan.
(2) Verifikasi kelayakan lembaga penguji mutu dan uji efektivitas sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilakukan oleh instansi Departemen Pertanian yang bidang tugasnya menangani standarisasi dan akreditasi.

Pasal 14

(1) Pengambilan contoh pupuk organik atau pembenah tanah bentuk padat mengacu pada SNI Nomor 19 - 0428 - 1989 dan bentuk cair mengacu pada SNI 19 - 0429 - 1989.
(2) Lembaga Penguji sebagaimana dimaksud dalam Pasal 12 ayat (3) dalam melakukan pengujian menggunakan metode pengujian mutu dan efektivitas pupuk organik dan pembenah tanah sebagaimana tercantum pada Lampiran III Peraturan ini.
(3) Penilaian terhadap hasil uji mutu dan uji efektivitas didasarkan pada standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2).

Pasal 15

Pengambilan contoh dengan metode pengujian mutu dan pengujian efektivitas pupuk organik dan pembenah tanah sebagaimana dimaksud dalam Pasal 14 ayat (1) dan ayat (2) dapat dilakukan perubahan sesuai dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Pasal 16

(1) Formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang telah memenuhi standar mutu dan efektivitas atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2), dinyatakan lulus uji oleh Lembaga Penguji dan diberikan sertifikat formula.
(2) Lembaga Penguji sebagaimana dimaksud pada ayat (1) bertanggung jawab atas hasil uji yang dilakukan.

Bagian Ketiga
Pemberian Nomor Pendaftaran

Pasal 17

Formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang telah mendapat sertifikat dari lembaga pengujian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 16 ayat (1), sebelum diproduksi dan atau diedarkan harus mendapat nomor pendaftaran dari Kepala Pusat Perizinan dan Investasi.

Pasal 18

(1) Untuk memperoleh nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 17, pemohon menyampaikan hasil pengujian mutu dan efektivitas

dengan menggunakan formulir seperti tercantum pada Lampiran IV Peraturan ini dengan disertai konsep label.

(2) Kepala Pusat Perizinan dan Investasi berdasarkan hasil pengujian mutu dan efektivitas sebagaimana dimaksud pada ayat (1) akan menilai paling lambat dalam waktu 7 hari kerja sejak menerima hasil pengujian mutu dan efektivitas sebagaimana dimaksud pada ayat (1), wajib menerbitkan penetapan nomor pendaftaran.

Pasal 19

(1) Nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 18 ayat (2) berlaku untuk jangka waktu selama 5 tahun, dan dapat diperpanjang satu kali untuk jangka waktu 5 tahun berikutnya sepanjang masih memenuhi persyaratan mutu.
(2) Apabila jangka waktu nomor pendaftaran setelah diperpanjang satu kali untuk jangka waktu 5 tahun sebagaimana dimaksud pada ayat (1) berakhir, pemegang nomor pendaftaran harus memperbarui.
(3) Pembaharuan nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud pada ayat (2) dilakukan sesuai dengan ketentuan dalam Peraturan ini.

Pasal 20

(1) Berdasarkan nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 18 ayat (2) pemohon dapat meminta izin untuk memproduksi dan atau memasukkan pupuk organik atau pembenah tanah serta mengedarkan pupuk organik atau pembenah tanah berdasarkan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.
(2) Untuk menjamin pemenuhan standar mutu dan uji efektivitas pupuk organik atau pembenah tanah sebelum diedarkan, pupuk organik atau pembenah tanah yang diproduksi atau pemasukan dari luar negeri harus memiliki surat keterangan jaminan mutu dan hasil uji efektivitas.
(3) Surat Keterangan Jaminan Mutu dikeluarkan oleh Lembaga Pengujian sebagaimana dimaksud dalam Pasal 12 ayat (3).

BAB V
BIAYA PENDAFTARAN

Pasal 21

Biaya pendaftaran pupuk organik dan pembenahan tanah merupakan Pendapatan Negara Bukan Pajak (PNBP) yang harus disetor ke Kas Negara yang besar dan tata caranya ditetapkan berdasarkan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Pasal 22

(1) Biaya pengujian mutu dan atau uji efektivitas yang dilakukan oleh lembaga pengujian swasta, ditetapkan oleh lembaga pengujian yang bersangkutan.
(2) Biaya pengujian mutu dan atau uji efektivitas yang dilakukan oleh lembaga pengujian pemerintah merupakan Pendapatan Negara Bukan Pajak (PNBP) yang besarnya ditetapkan berdasarkan ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

BAB VI
PEREDARAN

Pasal 23

(1) Pupuk organik atau pembenah tanah yang diedarkan harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2), serta diberi label.
(2) Label sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dibuat dalam bahasa Indonesia, minimal memuat nama dagang, jenis (pupuk organik atau pembenah tanah), komposisi, volume/berat bersih, nama dan alamat produsen (produksi dalam negeri) atau distributor (pemasukan) serta nomor pendaftaran.
(3) Komposisi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) untuk pupuk organik minimal C-organik, C/N rasio, pH dan kadar air (pupuk organik padat) dan C-organik, pH (pupuk organik cair).
(4) Komposisi sebagaimana dimaksud pada ayat (2) untuk pembenah tanah minimal kapasitas tukar kation (KTK), pH, dan kadar air.
(5) Label sebagaimana dimaksud pada ayat (1) harus dicantumkan dalam kemasan kedap air yang penempatannya mudah dilihat, dibaca dengan jelas dan tidak mudah rusak.

Pasal 24

Perorangan atau badan hukum yang memproduksi dan atau mengedarkan pupuk organik atau pembenah tanah wajib mengikuti ketentuan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

BAB VII
PENGGUNAAN

Pasal 25

(1) Jenis dan penggunaan pupuk organik atau pembenah tanah dilakukan dengan memperhatikan produktivitas dan pelestarian fungsi lingkungan.
(2) Jenis dan tata cara penggunaan pupuk organik atau pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) akan ditetapkan lebih lanjut oleh Direktur Jenderal Tanaman Pangan.

Pasal 26

Penyelenggaraan penyuluhan penggunaan pupuk organik atau pembenah tanah dilakukan dengan memperhatikan prinsip efisiensi dan efektivitas.

BAB VIII
PENGAWASAN

Pasal 27

Pengawasan mutu pupuk organik dan pembenah tanah dilakukan untuk melindungi kepentingan pengguna dan pelaku usaha, meningkatkan daya guna dan hasil guna pupuk organik dan pembenah tanah serta menjaga pelestarian fungsi lingkungan.

Pasal 28

(1) Pengawasan pupuk organik dan pembenah tanah dilakukan sebagai berikut:
    a. pada tingkat rekayasa formula menjadi kewenangan Menteri Pertanian;
    b. pada tingkat pengadaan, peredaran dan penggunaan menjadi kewenangan Bupati atau Walikota setempat di bawah koordinasi Gubernur.
(2) Pengawasan atas pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk organik atau pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dilakukan secara terpadu dan terkoordinasi.

Pasal 29

(1) Dalam melaksanakan pengawasan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 28 ayat (1) huruf a, dilakukan oleh Petugas Pengawas Pupuk.

(2) Petugas Pengawas sebagaimana dimaksud pada ayat (1) melakukan pengawasan terhadap penerapan standar mutu atau persyaratan teknis minimal pupuk organik atau pembenah tanah, pelaksanaan pengujian mutu dan efektivitas, dan penggunaan nomor pendaftaran.

Pasal 30

(1) Dalam melaksanakan pengawasan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 28 ayat (1) huruf b, Bupati/Walikota dapat menunjuk Petugas Pengawas pupuk.
(2) Petugas Pengawas pupuk sebagaimana dimaksud pada ayat (1) melakukan pembinaan dan pengawasan terhadap pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk organik dan pembenah tanah.

Pasal 31

Perorangan atau badan hukum yang melakukan pengadaan pupuk organik atau pembenah tanah, wajib mengizinkan Petugas Pengawas pupuk sebagaimana dimaksud dalam Pasal 29 dan Pasal 30 untuk melakukan pembinaan dan pengawasan ditempat usahanya.

Pasal 32

(1) Petugas Pengawas pupuk sebagaimana dimaksud dalam Pasal 30 ayat (1), berwenang:
    a. melakukan pemeriksaan terhadap proses produksi pupuk organik atau pembenah tanah;
    b. melakukan pemeriksaan terhadap sarana tempat penyimpanan dan cara pengemasan;
    c. mengambil contoh pupuk organik atau pembenah tanah guna pengujian mutu;
    d. memeriksa dokumen dan laporan;
    e. melakukan pemeriksaan terhadap pemenuhan persyaratan perizinan pengadaan dan atau peredaran pupuk organik atau pembenah tanah.
(2) Dalam hal Petugas Pengawas mempunyai dugaan kuat bahwa telah terjadi pemalsuan dan atau kerusakan pada pupuk organik atau pembenah tanah yang beredar, Petugas Pengawas dapat menghentikan sementara peredaran pupuk organik atau pembenah tanah tersebut pada wilayah kerjanya paling lama 30 hari untuk melakukan pengujian mutu.

(3) Apabila jangka waktu sebagaimana dimaksud pada ayat (2) telah berakhir dan belum mendapat keputusan mengenai adanya pemalsuan dan atau kerusakan pupuk organik atau pembenah tanah, maka tindakan penghentian sementara peredarannya oleh pengawas pupuk berakhir demi hukum.
(4) Apabila dari hasil pengujian mutu sebagaimana dimaksud pada ayat (2) diketahui bahwa pupuk organik atau pembenah tanah tersebut tidak sesuai dengan label atau rusak, maka Petugas Pengawas mengusulkan kepada Bupati atau Walikota setempat untuk menarik pupuk organik atau pembenah tanah tersebut dari peredaran.

Pasal 33

Petugas pengawas pupuk sebagaimana dimaksud dalam Pasal 29 ayat (1) dan Pasal 30 ayat (1) dapat ditunjuk sebagai Penyidik Pegawai Negeri Sipil sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

BAB IX
KEWAJIBAN

Pasal 34

(1) Lembaga pengujian mempunyai kewajiban menjamin kerahasiaan formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang telah diuji.
(2) Petugas yang melayani pendaftaran pupuk organik dan pembenah tanah wajib menjaga kerahasiaan formula pupuk organik atau formula pembenah tanah yang dimohonkan pendaftaran.
(3) Kepala Pusat Perizinan dan Investasi wajib menyelenggarakan pengelolaan buku nomor pendaftaran dan mencatat segala mutasi baik subjek maupun objek pendaftaran pupuk organik atau pembenah tanah.

Pasal 35

Produsen dan atau importir bertanggung jawab atas mutu produksinya, dan wajib mencantumkan nomor pendaftaran pada label ditempat yang mudah dilihat dan dibaca serta tidak mudah terhapus.

Pasal 36

Pemegang nomor pendaftaran wajib melaporkan setiap perubahan subjek pemegang nomor pendaftaran kepada Kepala Pusat Perizinan dan Investasi untuk dicatat dalam buku nomor pendaftaran, dan dilakukan perubahan keputusan pemberian nomor pendaftaran.

Pasal 37

Pemegang nomor pendaftaran wajib menyampaikan laporan kepada Direktur Jenderal Tanaman Pangan mengenai pengadaan yang meliputi produksi, pemasukan dari luar negeri dan penyaluran pupuk organik atau pembenah tanah setiap 6 bulan dengan menggunakan formulir seperti tercantum pada Lampiran VIII peraturan ini dengan tembusan kepada Kepala Pusat Perizinan dan Investasi.

BAB X
PEMBINAAN

Pasal 38

(1) Produsen pupuk organik dan atau pembenah tanah yang produksinya tidak untuk diedarkan dan atau produknya belum dapat memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal sebagaimana dimaksud dalam Pasal 4 ayat (2) akan diberikan pembinaan pembuatan pupuk organik dan atau pembenah tanah.
(2) Ketentuan lebih lanjut mengenai pembuatan pupuk organik dan atau pembenah tanah sebagaimana dimaksud pada ayat (1) akan ditetapkan dengan peraturan tersendiri.

BAB XI
KETENTUAN SANKSI

Pasal 39

Terhadap Lembaga pengujian mutu yang terbukti tidak menjamin kerahasiaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 34 ayat (1), tidak bertanggung jawab atas hasil uji sebagaimana dimaksud dalam Pasal 16 ayat (2), dilakukan teguran tertulis dan dilaporkan kepada pejabat yang berwenang oleh Kepala Pusat Perizinan dan Investasi untuk dikenakan sanksi sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Pasal 40

Terhadap petugas pelayanan nomor pendaftaran yang terbukti tidak menjamin kerahasiaan formula pupuk organik atau formula pembenah tanah sebelum ditetapkan nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 34 ayat (2) dikenakan sanksi disiplin pegawai oleh pejabat yang berwenang sesuai peraturan perundang-undangan yang berlaku dibidang kepegawaian.

Pasal 41

Terhadap produsen atau importir pupuk organik atau pembenah tanah yang terbukti tidak mencantumkan nomor pendaftaran pada label sebagaimana dimaksud dalam Pasal 35, tidak menjamin mutu produksinya atau tidak melaporkan adanya perubahan pemegang nomor pendaftaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 36 dikenakan sanksi pencabutan nomor pendaftaran oleh Kepala Pusat Perizinan dan Investasi, dan diusulkan kepada pejabat yang berwenang agar izin produksi atau izin pemasukan dicabut, dan pupuk organik atau pembenah tanah yang bersangkutan harus ditarik dari peredaran dengan disertai sanksi sesuai peraturan perundang-undangan.

Pasal 42

Penarikan kembali pupuk organik atau pembenah tanah dari peredaran sebagaimana dimaksud dalam Pasal 41 dilakukan oleh dan atas beban biaya dari produsen dan atau importir pupuk organik atau pembenah tanah yang bersangkutan.

Pasal 43

Produsen pupuk organik atau pembenah tanah yang telah mendapat nomor pendaftaran, apabila selama 2 (dua) tahun berturut tidak melakukan produksi dan atau pemasukan serta tidak menyampaikan laporan pengadaan dan penyaluran pupuk organik atau pembenah tanah dikenakan sanksi pencabutan nomor pendaftaran oleh Kepala Pusat Perizinan dan Investasi.

Pasal 44

Pelaksanaan pengawasan pengadaan peredaran dan penggunaan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 28 ayat 2 mutatis mutandis berlaku Keputusan Menteri Pertanian Nomor 237/Kpts/OT.210/4/2003.

BAB XII
KETENTUAN PERALIHAN

Pasal 45

(1) Pupuk organik atau pembenah tanah yang telah terdaftar sebelum peraturan ini ditetapkan, dinyatakan masih tetap berlaku sampai dengan berakhirnya nomor pendaftaran.
(2) Pupuk organik atau pembenah tanah sebelum peraturan ini ditetapkan sedang atau telah dilakukan pengujian, tetap diproses pendaftarannya sesuai ketentuan sebelum Peraturan ini.

(3) Pupuk organik atau pembenah tanah yang sebelum peraturan ini ditetapkan sedang dalam proses pendaftaran, tetapi belum dilakukan pengujian diberlakukan sesuai ketentuan peraturan ini.

BAB XIII
PENUTUP

Pasal 46

Dengan ditetapkannya peraturan ini, maka untuk pemasukan media pertumbuhan tanaman yang berupa tanah dan kompos sepanjang bukan pupuk organik atau pembenah tanah, masih tetap berlaku Keputusan Menteri Pertanian Nomor 797/Kpts/TP.830/10/1984.

Pasal 47

Peraturan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di Jakarta
pada tanggal 10 Februari 2005

MENTERI PERTANIAN,

ttd.

ANTON APRIYANTONO

SALINAN Peraturan ini disampaikan kepada Yth:

1. Menteri Perindustrian;
2. Menteri Perdagangan;
3. Menteri Dalam Negeri;
4. Menteri Keuangan;
5. Menteri Negara Lingkungan Hidup;
6. Menteri Negara Koperasi dan Usaha Kecil dan Menengah
7. Kepala Badan Standarisasi Nasional;
8. Gubernur diseluruh Indonesia;
9. Bupati/Walikota diseluruh Indonesia;
10. Direktur Jenderal Bea dan Cukai;
11. Pejabat Eselon I dilingkungan Departemen Pertanian;
12. Kepala Dinas yang membidangi Tanaman Pangan, Hortikultura, Perkebunan dan Peternakan Propinsi diseluruh Indonesia;
13. Kepala Dinas yang membidangi Tanaman Pangan, Hortikultura, Perkebunan dan Peternakan Kabupaten/Kota diseluruh Indonesia.

MENTERI PERTANIAN
REPUBLIK INDONESIA

KEPUTUSAN MENTERI PERTANIAN
NOMOR: 237/Kpts/OT.210/4/2003

TENTANG

PEDOMAN PENGAWASAN PENGADAAN, PEREDARAN
DAN PENGGUNAAN PUPUK AN-ORGANIK

MENTERI PERTANIAN,

Menimbang:
a. bahwa pupuk anorganik yang diedarkan dan digunakan untuk budi daya tanaman harus memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal;
b. bahwa untuk memenuhi standar mutu atau persyaratan teknis minimal tersebut, pupuk anorganik yang diedarkan dan digunakan untuk budi daya tanaman perlu diawasi;
c. bahwa pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk anorganik untuk budi daya tanaman dimaksud telah menjadi wewenang Kabupaten/Kota;
d. bahwa agar pelaksanaan pengawasan pupuk anorganik untuk budi daya tanaman dapat dilaksanakan dengan berdaya guna dan berhasil guna, yang sekaligus menindaklanjuti Pasal 20 ayat (1) huruf b, Pasal 22 ayat (1) dan Pasal 25 ayat (2) Peraturan Pemerintah Nomor 8 Tahun 2001 tentang Pupuk Budi Daya Tanaman, dipandang perlu menetapkan Pedoman Pengawasan Pengadaan, Peredaran dan Penggunaan Pupuk An-Organik;

Mengingat:
1. Undang-undang Nomor 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman (Lembaran Negara Tahun 1992 Nomor 46, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.478);
2. Undang-undang Nomor 23 Tahun 1997 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup (Lembaran Negara Tahun 1997 Nomor 68, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.699);
3. Undang-undang Nomor 8 Tahun 1999 tentang Perlindungan Konsumen (Lembaran Negara Tahun 1999 Nomor 42, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.478);

4. Undang-undang Nomor 22 Tahun 1999 tentang Pemerintahan Daerah (Lembaran Negara Tahun 1999 Nomor 60, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.839);
5. Peraturan Pemerintah Nomor 25 Tahun 2000 tentang Kewenangan Pemerintah dan Kewenangan Propinsi sebagai Daerah Otonom (Lembaran Negara Tahun 2000 Nomor 54, Tambahan Lembaran Negara Nomor 3.952);
6. Peraturan Pemerintah Nomor 8 Tahun 2001 tentang Pupuk Budidaya tanaman (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 14, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.079);
7. Peraturan Pemerintah Nomor 20 Tahun 2001 tentang Pembinaan dan Pengawasan Atas Penyelenggaraan Pemerintahan Daerah (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2001 Nomor 41, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.090);
8. Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2001 tentang Pembinaan dan Pengawasan Penyelenggaraan Perlindungan Konsumen (Lembaran Negara Tahun 2001 Nomor 103, Tambahan Lembaran Negara Nomor 4.126);
9. Keputusan Presiden Nomor 228/M Tahun 2001 tentang Pembentukan Kabinet Gotong Royong;
10. Keputusan Presiden Nomor 102 Tahun 2001 tentang Kedudukan, Tugas, Fungsi, Kewenangan, Susunan Organisasi dan Tugas Departemen;
11. Keputusan Presiden Nomor 109 Tahun 2001 tentang Unit Organisasi dan Tugas Eselon I Departemen;
12. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 01/Kpts/OT.210/1/2001 juncto Keputusan Menteri Pertanian Nomor 354.1/Kpts/OT.210/6/2001 tentang Organisasi dan Tata Kerja Departemen Pertanian;
13. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 99/Kpts/OT.210/2/2001 juncto Keputusan Menteri Pertanian Nomor 392/Kpts/OT.210/7/2001 tentang Kelengkapan Organisasi dan Tata Kerja Departemen Pertanian;
14. Keputusan Menteri Perindustrian dan Perdagangan Nomor 634/MPP/Kep/9/2002 tentang Ketentuan dan Tata Cara Pengawasan Barang dan atau Jasa yang Beredar di Pasar;
15. Keputusan Menteri Pertanian Nomor 09/Kpts/TP.260/1/2003 tentang Syarat dan Tata Cara Pendaftaran Pupuk Anorganik;

MEMUTUSKAN :

Menetapkan:

KESATU: Pedoman Pengawasan Pengadaan, Peredaran dan Penggunaan Pupuk Anorganik seperti tercantum pada Lampiran Keputusan ini.

KEDUA: Ketentuan pedoman sebagaimana dimaksud dalam diktum KESATU tidak mengurangi ketentuan pengawasan barang yang beredar dan jasa sebagaimana diatur dalam peraturan perundang-undangan di bidang perlindungan konsumen.

KETIGA: Dengan ditetapkannya Keputusan ini, maka ketentuan-ketentuan mengenai pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk yang telah ada dinyatakan tidak berlaku lagi.

KEEMPAT: Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di Jakarta

Pada tanggal 28 April 2003

MENTERI PERTANIAN,

Ttd

PROF. DR. IR. BUNGARAN SARAGIH. M.Ec.

SALINAN Keputusan ini disampaikan Kepada Yth.:

1. Menteri Dalam Negeri;
2. Menteri Perindustrian dan Perdagangan;
3. Para Gubernur di Seluruh Indonesia;
4. Para Bupati/Walikota di Seluruh Indonesia;
5. Para Pejabat Eselon I di Lingkungan Departemen Pertanian.

LAMPIRAN: KEPUTUSAN MENTERI PERTANIAN

NOMOR:

TENTANG: PEDOMAN PENGAWASAN PENGADAAN, PEREDARAN, DAN PENGGUNAAN PUPUK ANORGANIK

I. PENDAHULUAN

1. Latar belakang

Pupuk merupakan sarana produksi yang diutamakan penggunaannya oleh petani, setelah penggunaan benih, hal ini dikarenakan petani sudah menyadari pentingnya peranan pupuk dalam peningkatan produksi dan mutu hasil pertanian. Untuk itu pemerintah berkepentingan melakukan berbagai deregulasi kebijaksanaan di bidang pupuk dengan maksud agar terwujud iklim yang kondusif bagi perdagangan pupuk di Indonesia sehingga petani lebih mudah dalam mendapatkan pupuk sesuai dengan kebutuhannya.

Respon positif dari pelaku usaha di bidang pupuk ditunjukkan dengan semakin meningkatnya jumlah maupun jenis pupuk yang beredar di Indonesia. Sebagai gambaran apabila pada tahun 1989 pupuk yang terdaftar di Departemen Pertanian hanya 37 merek, maka pada akhir September 2002 telah mencapai + 799 merek dan di luar itu masih banyak ditemukan jenis dan merek pupuk yang tidak terdaftar maupun tidak mengacu pada SNI pupuk.

Pesatnya industri dan distribusi serta peredaran pupuk tersebut, belum diimbangi dengan kemampuan pembinaan dan pengawasan yang memadai dari instansi yang berwenang serta masih lemahnya perangkat peraturan di bidang pupuk sehingga berbagai permasalahan yang timbul di lapangan semakin kompleks dan belum dapat diselesaikan secara hukum. Masalah pemalsuan Merek, peredaran pupuk ilegal, pupuk yang tidak memenuhi standar ataupun yang mutunya palsu tidak mudah dikendalikan, yang pada akhirnya merugikan pengguna pupuk (petani) serta berbagai pihak yang terkait termasuk pemerintah dalam rangka pencapaian sasaran produksi pertanian secara nasional.

Menyikapi kondisi tersebut maka perlu segera adanya upaya-upaya pengendalian peredaran dan penggunaan pupuk untuk sektor pertanian melalui pelaksanaan pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk secara antensif dan terkoordinasi baik lintas sektor maupun linta

daerah dan antara pusat dan daerah. Melalui pedoman umum pengawasan pupuk anorganik ini diharapkan pemerintah daerah dapat menetapkan ketentuan teknis pengawasan pengadaan, peredaran, dan penggunaan pupuk di lapangan.

2. Maksud dan Tujuan

Maksud:

Pedoman pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk anorganik ini dimaksudkan sebagai acuan bagi Gubernur dan Bupati/Walikota dalam penetapan pelaksanaan pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk anorganik.

Tujuan:

Pengawasan pengadaan, peredaran, dan penggunaan pupuk anorganik bertujuan agar pupuk tersedia sampai ditingkat petani secara tepat waktu, jumlah, jenis dan tempatnya dengan mutu yang terjamin dan harga yang terjangkau, sehingga dapat meningkatkan produksi komoditas pertanian sekaligus meningkatkan pendapatan petani.

3. Ruang Lingkup

Pedoman pengawasan pengadaan, peredaran, dan penggunaan pupuk anorganik meliputi syarat pengawas pupuk, mekanisme pengawasan serta tindak lanjut dari hasil pengawasan.

4. Pengertian

Dalam pedoman ini yang dimakusd dengan:

a. Pupuk anorganik adalah pupuk hasil proses rekayasa secara kimia, fisik dan atau biologis, dan merupakan hasil industri atau pabrik pembuat pupuk.
b. Petugas pengawas pupuk yang selanjutnya disebut Pengawas Pupuk adalah petugas provinsi atau kabupaten/kota yang melaksanakan tugas pengawasan.
c. Pengadaan adalah kegiatan penyediaan pupuk baik berasal dari produksi dalam negeri maupun dari luar negeri.

d. Peredaran adalah setiap kegiatan atau serangkaian kegiatan dalam rangka penyaluran pupuk di dalam negeri baik untuk diperdagangkan maupun tidak.
e. Penggunaan adalah tata cara aplikasi pupuk anorganik untuk kegiatan usaha budi daya tanaman yang dilakukan oleh pengguna berdasarkan teknologi pemupukan yang dianjurkan untuk tujuan meningkatkan produktivitas tanaman.
f. Produsen pupuk adalah perorangan atau badan hukum yang melakukan kegiatan untuk menghasilkan pupuk.
g. Pengimpor pupuk adalah perorangan atau badan hukum yang melakukan kegiatan untuk memasukkan pupuk dari luar negeri ke dalam wilayah Negara Republik Indonesia.
h. Pupuk ilegal adalah pupuk yang tidak terdaftar atau yang telah habis masa berlaku nomor pendaftaran yang diberikan atau pupuk yang tidak berlabel.
i. Pupuk tidak layak pakai adalah pupuk yang rusak akibat perubahan secara kimiawi, fisik maupun biologis atau kadaluarsa.
j. Pupuk palsu adalah pupuk yang isi dan atau mutunya tidak sesuai dengan label atau pupuk yang merek, wadah, kemasan dan atau labelnya meniru pupuk lain yang telah diedarkan secara legal.

II. MEKANISME PENGAWASAN PUPUK

A. Jenis Pupuk

1. Pupuk yang diawasi yaitu pupuk anorganik yang berasal dari produksi dalam negeri dan atau impor.
2. Jenis pupuk yang diawasi meliputi:
   a. pupuk anorganik hara makro primer baik tunggal maupun majemuk seperti: urea, TSP/SP-36, ZA, KCI, NP, NK, PK, dan NPK;
   b. pupuk anorganik hara makro sekunder seperti dolomit, kiserit;
   c. pupuk anorganik hara makro dan mikro (campuran) padat dan cair;
   d. pupuk anorganik hara mikro padat dan cair; dan
   e. pupuk lainnya (pupuk anorganik yang mengandung mikroba, phytohormon).

B. Ruang Lingkup Pengawasan Pupuk

Ruang lingkup pengawasan pupuk terdiri atas:
1. Pengawasan pada tahap pengadaan, peredaran dan penggunaan yang meliputi: pengawasan terhadap jumlah dan jenis pupuk, mutu pupuk, legalitas pupuk, dan pemantauan harga pupuk.

2. pengawasan jumlah dan jenis pupuk meliputi pupuk yang diproduksi/diimpor, diedarkan, dan digunakan petani.
3. Pengawasan mutu pupuk meliputi pemeriksa terhadap kondisi fisik pupuk (bentuk, warna, dan bau); masa kadaluarsa (untuk pupuk mikroba); Kemasan; wadah pembungkus pupuk maupun pemeriksaan kandungan hara pupuk.
4. Pemantauan harga pupuk meliputi harga pupuk makro tunggal disetiap mata rantai pemasaran (produsen, distributor, penyalur, dan pengecer).
5. Pengawasan legalitas pupuk meliputi kelengkapan perizinan, nomor pendaftaran, pewadahan, dan pelabelan.

C. Jenis Pengawasan

1. Pengawasan di tingkat pengadaan

Pengawasan di tingkat pengadaan dilakukan melalui pemeriksaan:

a. proses produksi pupuk anorganik;
b. sarana, tempat penyimpanan pupuk dan cara pengemasannya;
c. nomor pendaftaran pupuk yang dimiliki oleh perusahaan;
d. pencantuman label;
e. pemenuhan persyaratan perijinan pengadaan dan atau peredaranpupuk anorganik;
f. cemaran/dampak negatif proses produksi pada lingkungan;

2. Pengawasan di tingkat peredaran

Pengawasan di tingkat peredaran dilakukan melalui pemeriksaan:

a. jenis pupuk yang beredar di wilayahnya;
b. jumlah pupuk yang beredar di wilayahnya;
c. mutu pupuk yang beredar di wilayahnya;
d. harga pupuk makro tunggal yang beredar di wilayahnya;
e. legalitas pupuk (nomor pendaftaran) dan pencantuman label;
f. publikasi pupuk (brosur, leaflet).

3. Pengawasan di tingkat penggunaan

Pengawasan di tingkat penggunaan dilakukan melalui pemeriksaan:

a. jenis pupuk yang digunakan petani;
b. jumlah/takaran pupuk yang digunakan petani;
c. mutu pupuk yang digunakan petani;
d. harga pupuk di tingkat petani dalam rangka pemantauan;
e. manfaat dan dampak negatif penggunaan pupuk.

D. Tata Cara Pengawasan

1. Tata cara pengawasan dilakukan baik secara langsung maupun tidak langsung.

2. Pengawasan langsung dilakukan secara berkala atau sewaktu-waktu dengan cara sebagai berikut:
   a. mengumpulkan data penyediaan, peredaran dan harga pupuk dalam rangka pemantauan di lapangan;
   b. menyampaikan laporan penyediaan, peredaran dan harga pupuk per bulan kepada Bupati/Walikota dengan tembusan kepada Gubernur, dan selanjutnya Gubernur menyampaikan rekapitulasi kepada Menteri Pertanian;
   c. melaporkan hasil pengawasan.
3. Pengawasan tidak langsung dilakukan berdasarkan laporan produsen, distributor atau yang diterima dari petani atau masyarakat pengguna pupuk.

III.PETUGAS PENGAWAS PUPUK.

1. Pengawas pupuk diangkat dan diberhentikan oleh Bupati/Walikota atas usul Kepala Dinas yang berwenang melakukan pengawasan pengadaan, peredaran dan penggunaan pupuk untuk pertanian.
2. Jumlah pengawas pupuk ditetapkan oleh Bupati/Walikota dengan memperhatikan:
   a. luas wilayah dan tingkat kesulitan pengawasan;
   b. jumlah dan jenis pupuk yang beredar di wilayahnya;
   c. jumlah pelaku usaha di bidang pupuk (produsen, importir, distributor, penyalur, dan atau pengecer) yang terdapat di wilayahnya.
3. Petugas pengawas pupuk mempunyai kewenangan seperti tercantum pada jenis pengawasan pada huruf C angka 1, 2, dan 3.
4. Ketentuan mengenai syarat pengawas pupuk diatur lebih lanjut oleh Bupati/Walikota setempat.

IV. KOORDINASI PENGAWASAN.

1. Apabila dari hasil pengawasan di tingkat pengadaan, peredaran dan penggunaan yang dilakukan oleh pengawas di tingkat kabupaten/kota.
2. Gubernur berdasarkan hasil koordinasi pengawasan dari kabupaten/kota, melaporkan kepada Menteri Pertanian secara berkala atau sewaktu-waktu apabila terjadi kelangkaan pupuk, gejolak harga, ditemukannya pupuk yang tidak layak pakai, palsu, dan pupuk ilegal.
3. Komisi/tim pengawas pupuk yang telah dibentuk di tingkat kabupaten/kota tugas dan fungsinya disesuaikan dengan pedoman ini dan melibatkan instansi yang berwenang di bidang pupuk.

V. TINDAK LANJUT HASIL PENGAWASAN.

1. Apabila dari hasil pengawasan ditemukan penyimpangan di tingkat pengadaan, maka perlu dilakukan tindak lanjut pengawasan sebagai berikut:
   a. apabila ditemukan produsen pupuk yang tidak melengkapi persyaratan perizinan, wajib dilaporkan kepada Bupati/Walikota, untuk diberikan teguran/peringatan penertiban ijin usaha;
   b. apabila ditemukan produsen pupuk yang tidak mandaftarkan pupuknya kepada Departemen Pertanian, wajib dilaporkan kepada Bupati/Walikota, untuk diberikan teguran/peringatan agar yang bersangkutan mendaftar pupuk kepada Menteri Pertanian. Pupuk yang terlanjur diproduksi/diedarkan ditarik dari peredaran. Apabila tidak mengindahkan maka Bupati memberikan teguran Kepada produsen dan dapat mencabut izin usaha industrinya.
2. Apabila dari hasil pengawasan ditemukan penyimpangan ditingkat peredaran, perlu dilakukan tindak lanjut pengawas sebagai berikut:
   a. apabila ditemukan pupuk tidak layak pakai, wajib dilaporkan kepada Bupati/Walikota untuk dibuat teguran kepada produsen dan atau importir/distributor untuk menarik pupuk dimaksud dari peredaran;
   b. apabila ditemukan pupuk ilegal, wajib dilaporkan dan diusulkan kepada Bupati/Walikota agar yang bersangkutan menarik pupuk dimasud dari peredaran. Apabila yang bersangkutan tidak mengindahkan teguran Bupati/Walikota maka dapat dilakukan pencabutan izin usaha industri/perdagangan;
   c. apabila ditemukan pupuk palsu, wajib dilaporkan dan diusulkan kepada Bupati/Walikota agar yang bersangkutan menarik pupuk dimaksud dari peredaran. Kepada yang bersangkutan diterapkan sanksi pidana. Apabila tidak diketahui produsen/importirnya, Bupati/Walikota memberikan informasi kepada kios pengecer untuk tidak mengedarkan pupuk tersebut.
3. Apabila dari hasil pengawasan ditemukan dampak negatif dari penggunaan pupuk anorganik baik terhadap tanaman maupun lingkungan, petugas pengawas wajib:
   a. melaporkan dan mengusulkan kepada Bupati/Walikota untuk menghentikan sementara peredran pupuk tersebut sambil menunggu pengujian mutu pupuk dimaksud;
   b. melakukan pengambilan contoh pupuk tersebut untuk dianalisis mutunya di laboratorium kimia. Apabila mutu pupuk tersebut terbukti membahayakan bagi lingkungan, petugas pengawas wajib mengusulkan kepada Bupati/Walikota agar produsen, importir, distributor dan penjual pupuk melakukan penarikan peredaran pupuk tersebut;

c. mengkoordinasikan dengan komisi/tim teknis pupuk di provinsi untuk melakukan peninjauan kembali terhadap izin usaha industri pupuk dan mengusulkan pencabutan nomor pendaftaran pupuk tersebut kepada Departemen Pertanian dalam hal ini Direktorat Jenderal Bina Sarana Pertanian.

VI. KETENTUAN SANKSI

Terhadap pelaku usaha yang tidak mengindahkan teguran Bupati/Walikota atas pelanggaran yang dilakukan, selanjutnya dapat dikenakan sanksi administrasi sesuai Peraturan Pemerintah Nomor 8 Tahun 2001 tentang Pupuk Budidaya Tanaman dan sanksi pidana sesuai Undang-undang Nomor 12 Tahun 1992 tentang Sistem Budidaya Tanaman dan Undang-undang Nomor 8 Tahun 1999 tentang Perlindungan Konsumen.

VII.PENUTUP.

Demikian pedoman ini ditetapkan untuk dapat dijadikan acuan dalam melakukan pengawasan pengadaan, peredaran, dan penggunaan pupuk di daerah.

MENTERI PERTANIAN,

Ttd

Prof. Dr. Ir. BUNGARAN SARAGIH, M.Ec.

DEPARTEMEN PERTANIAN
DIREKTORAT JENDERAL PERTANIAN TANAMAN PANGAN

SURAT KEPUTUSAN DIREKTUR JENDERAL PERTANIAN TANAMAN PANGAN
NO. S.K. I. HK.050.91.7A

TENTANG:

Penetapan Standar Mutu Inokulum Rhizobium

DIREKTUR TANAMAN PANGAN

Menimbang :
a. bahwa dalam rangka peningkatan produksi kedelai, diperlukan penggunaan inokulum Rhizobium;
b. bahwa untuk menjamin efektivitas penggunaan inokulum Rhizobium, dipandang perlu menetapkan standar mutunya;
c. bahwa agar inokulum Rhizobium yang beredar tetap terjamin mutunya terutama yang dipergunakan petani, maka dipandang perlu mengadakan pengamatan dan pengawasan terhadap mutu produk Inokulum Rhizobium;

Mengingat :
1. Keputusan Presiden RI No. 44 tahun 1974;
2. Keputusan Presiden RI No. 15 tahun 1984;
3. Keputusan Presiden RI No. 29 tahun 1984;
4. Keputusan Presiden RI No. 6 tahun 1988;
5. Keputusan Presiden RI No. 25 tahun 1990;
6. Surat Keputusan Menteri Pertanian No.529/Kpts/Org/8/1978;
7. Surat Keputusan Menteri Pertanian No.560/Kpts/OT.210/8/1990;
8. Surat Keputusan Direktur Jenderal Pertanian Tanaman Pangan No. SK.I.AS.84.5.

M E M U T U S K A N:

Menetapkan :

Pertama : Menyempurnakan Surat Keputusan Direktur Jenderal Pertanian Tanaman Pangan No.SK.I.A5.84.5, tanggal 17 Januari 1984;

Kedua : Menetapkan standar mutu Inokulum Rhizobium seperti tersebut dalam lampiran Surat Keputusan ini.

Ketiga : Menunjuk laboratorium benih Direktorat Bina Produksi Padi dan Palawija dan laboratorium Balai Pengawasan dan Sertifikasi Benih Daerah untuk melaksanakan pengujian dalam rangka pengawasan inokulum Rhizobium yang beredar.

Keempat : Surat Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

ditetapkan di: Jakarta
pada tanggal: 12 Maret 1991
Direktur Jenderal

Tembusan Surat Keputusan ini Disampaikan
kepada Yth.:

1. Menteri Pertanian;
2. Sekretaris Jenderal Departemen Pertanian;
3. Inspektur Jenderal Departemen Pertanian
4. Kepala Biro Keuangan Departemen Pertanian;
5. Kepala Dinas Pertanian Tanaman Pangan Provinsi Dati I seluruh Indonesia;
6. Kepala Balai Pengawasan dan Sertifikasi Benih I sampai dengan XIII;
7. Arsip

Dr. Ir. H. Dudung Abdul Adjid
NIP: 480.008.932

Lampiran : Surat Keputusan Direktur Jenderal Pertanian Tanaman Pangan
Nomor : I. HK.050.91.7A
Tanggal : 12 Maret 1991

SPESIFIKASI MUTU INOKULAN RHIZOBIUM UNTUK KEDELAI

1. Definisi : Inokulan kedelai adalah preparat yang mengandung bakteri Rhizobium spp.untuk digunakan pada tanaman kedelai

2. Syarat mutu :
   a. Kandungan jasad:
      Renik : mengandung bakteri Rhizobium spp. yang dapat membentuk bintil akar efektif pada tanaman kedelai dalam jumlah 109/gram atau milli liter inokulan pada waktu meninggalkan pabrik dan 107/gram atau milli liter inokulan pada akhir masa berlakunya.
   b. Kemasan : kedap cahaya dan kedap air, tidak mudah pecah/koyak; berat kemasan terbuat dari Alumunium foil atau Polyethilen kedap cahaya minimal 40%
   c. Masa berlaku : minimal 3 bulan untuk kemasan dari bahan Polyethilen kedap cahaya
      - minimal 6 bulan untuk kemasan dari bahan Alumunium foil.
   d. L a b e l : harus ada label yang berisikan keterangan tentang:
      - macam inokulan (untuk tanah atau biji).
      - nama/jenis tanaman yang dapat di inokulasi
      - nama/jenis jasad renik.
      - berat bersih (netto) inokulan.
      - nomor seri produksi.
      - jumlah jasad renik yang hidup per gram atau milli liter inokulan.
      - cara penyimpanan.
      - jangka waktu masa berlakunya inokulan.
      - petunjuk penggunaan inokulan.
      - nama dan alamat produsen.

Direktur Jenderal

Dr. Ir. H. Dudung Abdul Adjid
NIP.480.008.932