

Pembenah Tanah untuk Meningkatkan Produktivitas Lahan Pertanian

The Use of Soil Conditioners to Increase Agricultural Land Productivity

Ai Dariah, S. Sutono, Neneng L. Nurida, Wiwik Hartatik, dan Ety Pratiwi

Balai Penelitian Tanah Jl. Tentara Pelajar No. 12, Cimanggu, Bogor 16114. Email: aidariah@yahoo.com

Diterima 23 September 2015; Direview 25 September 2015; Disetujui dimuat 7 Oktober 2015

Abstrak. Pembenh tanah (*soil conditioner*) dapat digunakan untuk mempercepat pemulihan kualitas tanah. Tulisan ini menguraikan prinsip pemanfaatan pembenh tanah, jenis dan klasifikasi pembenh tanah, fungsi utama dan efek pembenh tanah terhadap kualitas tanah dan produktivitas tanaman, pengembangan pembenh tanah untuk pemulihan lahan pertanian, serta peluang dan kendala pengembangan pembenh tanah. Penggunaan pembenh tanah utamanya ditujukan untuk memperbaiki kualitas fisik, kimia, dan/atau biologi tanah, sehingga produktivitas tanah menjadi optimum. Pembenh tanah ada yang bersifat alami maupun buatan (sintetis). Berdasarkan senyawa atau unsur pembentuk utamanya, pembenh tanah bisa dibedakan sebagai pembenh tanah organik, hayati, dan mineral. Penggunaan pembenh tanah yang bersumber dari bahan organik sebaiknya menjadi prioritas utama, selain terbukti efektif dalam memperbaiki kualitas tanah dan produktivitas lahan, juga bersifat terbarukan, insitu, dan relatif murah, serta bisa mendukung konservasi karbon dalam tanah. Kelemahannya adalah dibutuhkan dalam dosis relatif tinggi. Beberapa pembenh mineral juga efektif dalam meningkatkan kualitas tanah, namun tetap harus disertai dengan penggunaan pembenh tanah organik. Penggunaan pembenh tanah sintetis perlu diuji terlebih dahulu dari segi dampak negatifnya terhadap lingkungan, selain pertimbangan harga yang umumnya relatif mahal, meski dosis yang digunakan relatif rendah.

Kata kunci: Pembenh Tanah / Kualitas Tanah / Produktivitas Lahan

Abstract. Soil conditioner can be used to improve the recovery of soil quality. This paper mainly discuss on the use of soil conditioner, type and classification, function and its effect on soil quality and crop productivity, as well as the potency and challenge of using soil conditioner for recovery of the degraded agricultural land. The main role of soil conditioner is to improve soil physical, chemical and biological conditions and to provide optimum condition for soil productivity. There are natural and synthetic soil conditioners. Based on its component, they can be grouped as organic, biologic and mineral soil conditioner. The use of organic soil conditioner is strongly recommended as it proven very effective in improving soil quality and land productivity. Other benefits in using organic soil conditioner are their properties such as renewable, available in situ, and relatively less expensive. It also can support the conservation of carbon in the soil, but has the weakness associated with the high application rate. Some mineral soil conditioner is also effective in improving soil quality unless it's combined organic soil conditioner. The use of synthetic soil conditioner should be evaluated for its negative impact on the environment prior to application and for its relatively expensive, although it is used at relatively low doses.

Keywords: Soil Conditioner / Soil Quality / Land Productivity

PENDAHULUAN

Kualitas tanah yang rata-rata relatif rendah merupakan salah satu penyebab rendahnya produktivitas lahan pertanian di Indonesia. Selain berhubungan dengan karakteristik lahan di daerah tropika basah, yang rentan terhadap erosi dan pemiskinan hara (Sastiono dan Suwardi 1999; Kurnia *et al.* 2005), degradasi atau penurunan kualitas lahan juga banyak disebabkan oleh faktor manusia yang tidak melakukan sistem pengelolaan lahan secara tepat dan berkelanjutan (Las *et al.* 2006, Kurnia *et al.* 2005, Abdurachman *et al.* 2005). Program rehabilitasi lahan terutama di areal pertanian merupakan kegiatan yang

telah dilakukan dari tahun ke tahun, namun peranannya seolah tidak nyata dalam mengurangi laju degradasi lahan. Hal ini dapat disebabkan oleh beberapa hal, yaitu: (1) metodologi rehabilitasi lahan yang diterapkan kurang tepat, (2) lebih cepatnya laju proses degradasi lahan dibanding laju pemulihannya, dan (3) luasan areal yang telah mengalami degradasi jauh lebih besar dibanding kemampuan untuk merehabilitasinya.

Bila ketersediaan lahan untuk pertanian masih mencukupi, pemulihan lahan pertanian yang telah mengalami penurunan kualitas bisa dilakukan secara alami, yakni dibiarkan bera selama bertahun-tahun, selanjutnya setelah mengalami pemulihan, lahan

dibuka kembali untuk usahatani. Cara seperti ini sangat mustahil untuk ditempuh saat ini, terutama di daerah dengan penduduk padat dengan kepemilikan lahan yang sempit, oleh karena itu diperlukan suatu metode untuk mempercepat pemulihan kualitas lahan yang telah mengalami degradasi.

Penggunaan pembenah tanah merupakan cara yang dapat ditempuh untuk mempercepat proses pemulihan kualitas lahan. Namun demikian, perlu dilakukan pemilihan bahan pembenah tanah yang benar-benar tepat. Kegiatan penelitian dan pengembangan bahan pembenah tanah di Indonesia sudah dilakukan sejak tahun 1970-an, namun aplikasinya pada tingkat petani masih rendah, kecuali bahan organik khususnya dalam bentuk kompos yang relatif sudah memasyarakat di kalangan petani, namun dosisnya seringkali masih terlalu rendah untuk dapat berfungsi sebagai pembenah tanah. Kapur juga merupakan pembenah tanah yang telah dikenal petani, terutama setelah dilakukan program pengapuran secara besar-besaran pada tahun 1983/1984.

Naskah ini menguraikan prinsip pemanfaatan pembenah tanah, jenis dan klasifikasi pembenah tanah, fungsi utama dan efek pembenah tanah terhadap kualitas tanah dan produktivitas tanaman, serta pengembangan pembenah tanah untuk pemulihan lahan pertanian.

PRINSIP PEMANFAATAN PEMBENAH TANAH

Bahan pembenah tanah dikenal juga sebagai *soil conditioner*. Di kalangan ahli tanah diartikan sebagai bahan-bahan sintesis atau alami, organik atau mineral, berbentuk padat maupun cair yang mampu memperbaiki struktur tanah, dapat merubah kapasitas tanah menahan dan melalukan air, serta dapat memperbaiki kemampuan tanah dalam memegang hara, sehingga air dan hara tidak mudah hilang, namun tanaman masih mampu memanfaatkan air dan hara tersebut.

Pada awalnya konsep utama dari penggunaan pembenah tanah adalah: (1) pemantapan agregat tanah untuk mencegah erosi dan pencemaran, (2) merubah sifat hidrophobik dan hidrofilik, sehingga dapat merubah kapasitas tanah menahan air, dan (3) meningkatkan kemampuan tanah dalam memegang hara dengan cara meningkatkan kapasitas tukar kation (KTK) (Arsyad 2000). Selanjutnya pembenah tanah juga digunakan untuk memperbaiki sifat kimia tanah

lainnya, misalnya untuk perbaikan reaksi tanah dan menetralkan unsur atau senyawa beracun. Dalam hubungannya dengan perbaikan sifat kimia tanah, bahan pembenah tanah sering dikenal sebagai *soil ameliorant*.

Jasad hidup yakni organisme tanah juga dapat digunakan sebagai bahan pembenah tanah, misalnya ditujukan untuk mempercepat dekomposisi bahan organik, meningkatkan ketersediaan hara, pembentukan dan perbaikan struktur tanah, dan perbaikan lingkungan tanah lainnya.

Pembenah tanah seringkali juga mengandung unsur hara, namun tidak digolongkan sebagai pupuk karena kandungannya relatif rendah, sehingga tidak dapat memenuhi kebutuhan tanaman, selain itu seringkali unsur hara yang dikandungnya dalam bentuk yang belum atau lambat tersedia untuk tanaman.

Bahan organik sebenarnya merupakan bahan pembenah tanah yang sudah relatif memasyarakat, meskipun umumnya petani memberikan bahan organik lebih ditujukan sebagai pupuk. Berbeda dengan pupuk yang diberikan untuk menambah atau melengkapi unsur hara dan umumnya diberikan dalam jumlah relatif kecil, sebagai bahan pembenah tanah, bahan organik harus diberikan dalam jumlah yang relatif besar (Suwardi 2007), sehingga didapatkan manfaat yang nyata. Misalnya pada usahatani sayuran yang umum dilakukan di dataran tinggi dengan tanah yang mempunyai sifat andik, petani memberikan bahan organik dalam jumlah sangat tinggi (Rochayati *et al.* 2012). Sesungguhnya hal ini perlu dilakukan bukan semata untuk pemenuhan hara tanaman, namun fungsi yang lebih penting lagi adalah sebagai pembenah tanah, yaitu untuk menanggulangi dampak dari tingginya kandungan alofan pada tanah-tanah yang bersifat andik.

Sebagai pupuk, bahan organik sebaiknya diberikan dalam kondisi sudah matang, dicerminkan oleh nilai C/N ratio yang relatif rendah (<-15), sedangkan untuk pembenah tanah tidak memerlukan persyaratan tersebut. Namun demikian, jika pembenah tanah digunakan pada areal yang dimanfaatkan untuk budidaya tanaman, sebaiknya faktor C/N ratio tetap diperhatikan, sampai tahap yang tidak mengganggu pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Oleh karena itu jika diaplikasikan pada areal yang masih digunakan untuk budidaya tanaman, nilai C/N ratio pembenah tanah organik sebaiknya tidak melebihi 30. Sebagai pembenah tanah bahan aktif utama dari bahan organik adalah unsur karbon; oleh karena itu salah satu

persyaratan teknis minimal pembena tanah organik yang tercantum dalam Permentan Nomor 70/Permentan/SR.140/10/2011, adalah kandungan C organik minimal adalah 15%.

Tujuan akhir dari penggunaan pembena tanah adalah untuk menciptakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan dan produksi tanaman, perkembangan biota tanah, serta meningkatkan ketahanan tanah terhadap erosi. Sehingga pembena tanah harus mampu memfasilitasi tersedianya hara, air, dan udara yang optimal. Hal ini bisa terjadi jika sifat fisik, kimia, dan biologi tanah terpelihara dengan baik. Dalam hubungannya dengan pencegahan erosi, pembena tanah harus mampu memperbaiki sifat tanah yang mendukung penyerapan air ke dalam tanah bisa berjalan dengan baik dan tanah menjadi lebih stabil, sehingga tidak peka terhadap erosi.

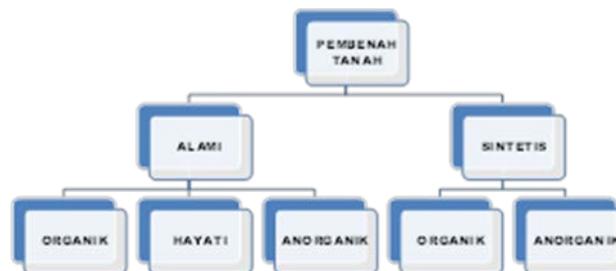
Sampai saat ini sulit untuk mendapatkan jenis pembena tanah yang mampu memperbaiki dan meningkatkan seluruh fungsi tanah (fisik, kimia, dan biologi) dengan sekali dan satu jenis pemberian. Bahan organik telah terbukti mempunyai banyak fungsi (multi fungsi), namun dibutuhkan dosis yang relatif tinggi, yaitu berkisar 5-20 t ha⁻¹ dan seringkali dibutuhkan pemberian yang kontinyu (Dariah dan Rachman 1989, Basri dan Zaini 1992, Nursyamsi *et al.* 1995, Abdurachman *et al.* 2000, Agus 2000). Kebanyakan pembena tanah ditujukan untuk memperbaiki sifat tanah tertentu. Misalnya kapur terutama ditujukan untuk peningkatan pH, zeolit untuk perbaikan KTK, hidrogel untuk meningkatkan kemampuan tanah memegang air, dan lain sebagainya.

Selain untuk tanah mineral, pembena tanah diperlukan pula untuk perbaikan kualitas tanah atau penanggulangan faktor pembatas pada tanah organik. Misalnya pada tanah gambut, bahan pembena tanah diperlukan untuk menanggulangi tingginya asam organik terutama yang berbentuk monomer, yang dapat meracuni tanaman. Ameliorasi pada tanah gambut juga diperlukan untuk menekan laju emisi karbon dari tanah gambut (Mario dan Sabiham 2002, Subiksa *et al.* 2011).

KLASIFIKASI PEMBENA TANAH

Secara garis besar, bahan pembena tanah dapat dibedakan menjadi dua, yaitu alami dan sintetis (buatan). Berdasarkan senyawa pembentuknya dapat dibedakan dalam tiga kategori yakni pembena tanah organik, pembena tanah hayati, dan pembena tanah

anorganik (mineral) (Gambar 1). Beberapa contoh bahan pembena tanah disajikan pada Tabel 1.



Gambar 1. Klasifikasi pembena tanah

Figure 1. Classification of Soil Conditioner

Tabel 1. Beberapa contoh pembena tanah sintetis dan alami, organik dan an-organik

Table 1. Samples of soil conditioner (synthetic, natural, organic, and an-organic)

Contoh pembena tanah	Jenis
<i>Sintetik:</i>	
VAMA (Maleic anhidride-vinyl acetate copolimers)	Organik
HPAN (Partly hydrozed polyacrilonitril)	Anorganik
SPA (Sodium polyacrylate dan garam lainnya)	Anorganik
PAAM/PAM (Polyacrylamide dalam banyak kombinasi)	Organik
Poly-DADMAC (Poly-diallyl dimethylammonium chloride)	Anorganik
Hydrostock	Anorganik
Hidrogel	Anorganik, organik
<i>Alami:</i>	
Emulsi aspal (Bitumen: Hidrophobik dan hidrofilik)	Anorganik
Lateks, skim lateks	Organik
Kapur pertanian (Kalsit dan Dolomit)	An-organik
Blotong	Organik
Zeolit	An-organik
Kompos	Organik
Biochar	Organik
Senyawa humat	Organik
Beta	Organik*
Biochar-SP-50	Organik*
Abu vulkanik	Mineral

Sumber: Sutono dan Abdurachman (1997) dengan beberapa tambahan)

* Hasil formulasi pembena tanah organik dengan pengkayaan bahan tertentu

Pembena tanah alami adalah pembena tanah yang dibuat dengan menggunakan bahan-bahan yang berasal dari alam, baik bersifat organik, hayati, maupun anorganik. Struktur senyawa bahan dasarnya belum mengalami perubahan. Sedangkan pembena tanah

sintetis adalah pembenah tanah yang dibuat oleh pabrik, baik dari bahan dasar alami yang bersifat organik maupun anorganik, tetapi sudah mengalami perubahan baik secara fisik maupun struktur senyawanya, sehingga sulit dibedakan dengan bahan aslinya.

Pembenah tanah organik dan anorganik seringkali diformulasi, yaitu dilakukan pencampuran dengan komposisi tertentu atau dilakukan pengkayaan, sehingga dihasilkan jenis-jenis pembenah tanah yang beraneka ragam dan mempunyai keunggulan tertentu. Namun demikian, jenis-jenis pembenah tanah tersebut umumnya ditujukan untuk memperbaiki sifat tanah tertentu, tanpa diharapkan untuk meningkatkan jumlah hara secara lebih nyata.

Formulasi pembenah tanah juga dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan efektivitas pembenah tanah, meskipun kadang-kadang mengurangi fungsinya yang lain. Misalnya ekstraksi senyawa humat dari bahan organik dilakukan untuk meningkatkan efektivitas dari bahan organik dalam memperbaiki struktur tanah atau dalam penanggulangan senyawa beracun. Namun demikian fungsi bahan organik sebagai sumber energi biota tanah akan berkurang setelah diekstrak menjadi senyawa humat. Perubahan bahan organik menjadi biochar (arang) juga lebih ditujukan pada peningkatan kemampuan bahan organik dalam memperbaiki sifat fisik tanah, diantaranya dalam hal kemampuan tanah memegang air. Namun setelah berubah menjadi biochar, bahan organik menjadi sulit diakses oleh organisme tanah. Oleh karena itu, perlu adanya pengkayaan biochar dengan bahan organik sebagai sumber energi bagi organisme tanah.

Penggolongan pembenah tanah yang telah mengalami formulasi ditentukan oleh senyawa atau unsur dominan yang berperan sebagai bahan aktif. Jika senyawa organik yang lebih berperan, maka bahan pembenah tanah digolongkan sebagai pembenah tanah organik. Sebaliknya jika bahan mineral atau senyawa anorganik yang lebih berperan sebagai bahan aktif, maka formula pembenah tanah tersebut digolongkan sebagai pembenah tanah mineral atau anorganik. Demikian pula halnya jika unsur hayati yang berperan sebagai bahan aktif utama, maka pembenah tanah digolongkan sebagai pembenah tanah hayati. Oleh karena itu meskipun seringkali proporsi bahan pembawa dari pembenah tanah hayati (misalnya gambut atau zeolit) jauh lebih dominan, namun jika yang berperan sebagai bahan aktif adalah unsur hayati,

maka formula yang dimaksud tetap digolongkan sebagai pembenah tanah hayati.

Pembenah Tanah Organik

Pembenah tanah organik secara garis besar dibedakan menjadi pembenah tanah organik alami dan sintetis.

Pembenah Tanah Organik Alami

Pembenah tanah organik yang digolongkan sebagai pembenah tanah organik alami diantaranya adalah lateks (Nugroho dan Niswati 1995), pupuk kandang (Abdurachman *et al.* 2000), dan biomassa tanaman seperti pangkasan legum (*Flemingia*, lamtoro, kaliandra), sisa panen (jerami, brangkasan jagung) (Nurida 2006, Hafif *et al.* 1993). Pada umumnya pembenah tanah organik alami seperti pupuk kandang dan biomassa tanaman sudah banyak digunakan oleh petani, namun seringkali dibutuhkan jumlah yang sangat banyak dalam aplikasinya. Efektivitas pupuk kandang dan biomassa tanaman dalam memperbaiki sifat tanah cukup tinggi bila diberikan dengan dosis yang tinggi, misalnya sekitar 15-20 t ha⁻¹ untuk pukan (Kurnia 1996) dan 20-25 t ha⁻¹ untuk biomassa *Flemingia* (Nurida 2006). Tingginya dosis yang digunakan seringkali menyulitkan dalam penyediaannya.

Berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa pemberian pembenah tanah organik alami mampu memperbaiki sifat kimia dan fisik tanah. Pemberian biomassa *Flemingia congesta* mampu mempertahankan kadar bahan organik tanah dan KTK tanah, serta meningkatkan pH dan P tersedia (Sukristiyonubowo *et al.* 1993, Irianto *et al.* 1993), sedangkan pemberian jerami padi mampu meningkatkan kadar N tanah (Sudarsono 1991, Utomo *et al.* 1992). Hasil penelitian Situmorang (1999) menunjukkan bahwa penambahan *Mucuna* sp. dan alang-alang mampu meningkatkan Ca, Mg, K dan Na serta menurunkan Al dapat ditukar (Al_{dd}) dan Fe dapat ditukar (Fe_{dd}).

Berbagai penelitian menunjukkan perbaikan sifat fisik tanah akibat pemberian pembenah tanah organik alami, antara lain meningkatnya persentase partikel tanah yang berbentuk agregat (Suwardjo *et al.* 1989), meningkatnya persentase agregat mantap yang berukuran besar dan menurunkan persentase agregat yang berukuran lebih kecil, serta menurunkan berat isi (Oades 1990, Kurnia 1996, Zhang *et al.* 1997), meningkatkan stabilitas agregat (Kurnia 1996, Lu *et al.*

1998), serta menurunkan tahanan penetrasi tanah (Purnomo *et al.* 1992).

Bahan organik seperti pupuk kandang atau biomassa tanaman dalam fungsinya sebagai pembenh tanah alami berperan sebagai pemantap agregat tanah, yang terjadi karena bahan-bahan tersebut dapat berperan sebagai pemantap mikroagregat, mesoagregat, maupun makroagregat. Posisi dan komposisinya sangat menentukan pembentukan, distribusi, dan stabilitas agregat (Emmerson and Greenland 1990, Beare *et al.* 1994). Posisi bahan organik sebagai pembenh tanah tersebut dapat berada: (1) di antara domain liat di dalam mikroagregat, (2) di antara mikroagregat tetapi di dalam mesoagregat, (3) di antara mesoagregat di dalam makroagregat, dan (4) di antara makroagregat (Emmerson and Greenland 1990, Oades 1990). Peningkatan ukuran dan stabilitas agregat akan berpengaruh positif terhadap sifat fisik tanah lainnya antara lain: meningkatnya kapasitas retensi air dan jumlah air tersedia, meningkatnya pori makro dan meso, meningkatnya porositas total, perbaikan aerasi tanah, serta meningkatnya permeabilitas tanah maupun infiltrasi. Selain itu, perbaikan agregasi tanah menyebabkan kepekaan tanah terhadap erosi menurun (Hafif *et al.* 1993, Kurnia 1996).

Beberapa tahun terakhir, di beberapa negara seperti Jepang dan Australia mulai berkembang penggunaan bahan pembenh tanah organik alami berupa arang (biochar/*charcoal*), yang berasal dari residu kayu-kayuan, sekam, atau bahan organik lainnya. Di Indonesia potensi penggunaan *charcoal* atau biochar cukup besar, mengingat bahan baku seperti residu kayu, tempurung kelapa, sekam padi, kulit buah kakao, serta tempurung kelapa sawit cukup tersedia. Bahan baku tersebut dapat dimanfaatkan sebagai pembenh tanah setelah dikonversi menjadi arang atau biochar melalui proses pembakaran tidak sempurna

(*pyrolysis*) pada suhu < 500°C. Tabel 2 menunjukkan karakteristik biochar (pH, kandungan C, N, P, dan K) dari beberapa jenis limbah pertanian, yaitu tempurung kelapa, kulit kakao, tempurung kelapa sawit, dan sekam padi.

Beberapa hasil penelitian menunjukkan peranan biochar sebagai pembenh tanah. Glaser *et al.* (2002) menunjukkan penambahan *charcoal* (biochar) pada tanah-tanah pertanian berfungsi untuk meningkatkan: (1) ketersediaan hara, (2) retensi hara, dan (3) retensi air. Menurut Ogawa (1994), *charcoal* mampu menciptakan habitat yang baik untuk mikroorganisma simbiotik seperti mikoriza karena kemampuannya dalam menahan air dan udara serta menciptakan lingkungan yang bersifat netral khususnya pada tanah-tanah masam.

Hasil penelitian pada Ultisol Lampung Timur menunjukkan bahwa penggunaan biochar limbah pertanian sekam padi dengan dosis 2,5-7,5 t ha⁻¹ mampu memperbaiki kualitas tanah. Kemasaman tanah, KTK, dan pori air tersedia meningkat setelah aplikasi biochar selama satu musim tanam (Tabel 3). Selain itu, pemberian biochar juga mampu meningkatkan produksi tanaman jagung (Tabel 4).

Efektivitas biochar sangat tergantung pada sifat kimia dan fisik biochar, yang ditentukan oleh jenis bahan baku (kayu lunak, kayu keras, sekam padi dan lain-lain) dan metode karbonisasi (tipe alat pembakaran, temperatur), serta bentuk biochar (padat, serbuk, karbon aktif) (Ogawa 2006). Kuwagaki dan Tamura (1990) menyarankan penggunaan 7 kriteria untuk menilai kualitas biochar yang akan digunakan untuk pembenh tanah, yaitu (1) pH, (2) kandungan bahan mudah menguap (*volatile content*), (3) kadar abu, (4) kapasitas memegang air, (5) BD (*bulk density*), (6) volume pori, dan (7) luas permukaan spesifik. Keuntungan lain dari penggunaan biochar adalah

Tabel 2. Kandungan C dan hara makro, serta pH pada beberapa *biochar* limbah pertanian

Table 2. The content of C, macro nutrient, and pH of biochar derived from agricultural waste

Variabel	Tempurung kelapa	Kulit kakao	Tempurung kelapa sawit	Sekam padi
C-total (%)	33,0	69,0	57,0	39,0
C-organik total (%)	1,37	4,21	18,78	3,72
pH	7,7	10,8	8,2	7,7
Kadar N (%)	0,15	0,83	1,61	0,50
Kadar P (%)	0,02	0,33	0,25	0,23
Kadar K (%)	0,04	1,25	0,04	0,06

Sumber: Nurida *et al.* (2012)

Tabel 3. Kandungan C-organik, pH, KTK, dan persen pori-pori air tersedia tanah setelah aplikasi biochar selama musim tanam pertama pada Ultisol di Lampung Timur

Table 3. The content of organic-C, pH, CEC, and percent of soil pores water available after biochar application during the first growing season on Ultisol at East Lampung

Dosis biochar	pH-H ₂ O	KTK	C-organik	PAT
t ha ⁻¹		cmol+ kg ⁻¹	%	% volume
0	4,15 b*	4,75 b	0,97a	6,69 b
2,5	4,20 b	5,77 a	1,01a	7,46 b
5,0	4,19 b	6,00 a	1,05a	10,01 a
7,5	4,22 a	5,91 a	1,06a	9,18 a

Tabel 4 . Hasil panen jagung setelah aplikasi biochar pada musim tanam pertama pada Ultisol di Lampung Timur

Table 4. Yields of maize after application of biochar in the first growing season on Ultisol in East Lampung

Dosis biochar	Berat tongkol kering	Berat biomassa kering	Berat pipilan kering
	t ha ⁻¹		
0,0	0,50 d	1,11 c	0,37 d
2,5	1,84 c	3,11 b	1,41 c
5,0	2,37 b	4,04 a	1,85 b
7,5	2,93 a	4,75 a	2,31 a

Sumber: Nurida *et al.* (2012)

* Angka-angka yang diikuti huruf sama pada kolom yang sama dalam kelompok perlakuan yang sama menunjukkan tidak berbeda nyata menurut uji Duncan taraf 5%.

bentuknya yang stabil dalam tanah sehingga mampu bertahan dalam waktu yang lama dan berfungsi sebagai cadangan karbon. Hasil penelitian Ogawa *et al.* (2006) menunjukkan bahwa kontribusi biochar terhadap cadangan karbon sekitar 52,8%, artinya biochar mampu mengakumulasi karbon dalam jumlah yang cukup besar. Studi yang intensif yang dilakukan terhadap tanah hitam (*terra preta*) di wilayah Amazon, membuktikan besarnya peran biochar sebagai pembenah tanah yang dapat berperan dalam pemulihan (rehabilitasi) lahan, meningkatkan produksi tanaman, menyerap karbon dan menyimpannya dalam tanah, serta berperan dalam mitigasi perubahan iklim (Lehman *et al.* 2006).

Selain dalam bentuk biochar, bahan organik dapat pula dimanfaatkan setelah diekstrak menjadi senyawa humat. Saat ini, telah banyak beredar di pasaran pembenah tanah organik dengan bahan dasar atau bahan pengkaya senyawa humat. Hasil penelitian Dariah dan Nurida (2011) menunjukkan bahwa bahan organik dengan C/N ratio tinggi dan kandungan hara rendah lebih baik jika diberikan dalam bentuk senyawa humat. Pengaruh pembenah tanah dengan bahan aktif senyawa humat menghasilkan bobot tanaman paling

tinggi dan sekaligus mampu mengurangi pemberian pupuk NPK sebesar 25% (Dariah dan Nurida 2012).

Pembenah Tanah Organik Sintetik

Pembenah tanah organik sintetik yang cukup dikenal adalah VAMA dan hidrogel yang diformulasi melalui proses pabrikasi. Salah satu yang mulai banyak diproduksi dan dikenal di pasaran adalah hidrogel. Pembenah tanah tersebut mempunyai kemampuan memegang air yang cukup tinggi yaitu hingga 500 kali bobotnya, sehingga sangat berguna bagi tanah yang didominasi pasir dan tanah dengan kandungan bahan organik rendah, karena kedua tanah tersebut kurang mampu memegang air.

Tanah dengan kemampuan memegang air yang tergolong tinggi, ada peluang untuk memenuhi seluruh kebutuhan air bagi tanaman yang dibudidayakan. Namun demikian, seringkali suplai air ke dalam pori-pori penyedia air tersendat, utamanya ketika tidak turun hujan selama lebih dari dua minggu. Hidrogel dapat membantu air masuk ke dalam pori-pori tanah, sehingga air dapat tersedia sepanjang waktu, agar pertumbuhan dan perkembangan tanaman tidak terganggu.

Pembenh Tanah Anorganik

Pembenh Tanah Anorganik Sintetik

Pembenh tanah sintetik telah dikenal kalangan peneliti sejak tahun 1970-an, sebagian sudah diterapkan untuk memperbaiki sifat-sifat fisika tanah Andisol, Ultisol dan tanah Litosol.

Bitumen

Emulsi bitumen digunakan dalam penelitian pembentukan agregat tanah. Emulsi bitumen dapat dibuat dari aspal dengan campuran bahan tertentu untuk menurunkan tingkat kekentalannya. Terdapat dua jenis emulsi bitumen, yaitu emulsi bitumen yang mempunyai sifat hidrofilik dan hidrofobik atau yang dapat menyerap air dan tidak mampu menyerap air. Bitumen dengan sifat hidrofilik cocok untuk digunakan pada tanah-tanah yang telah membentuk agregat agar tidak mudah tererosi, sedangkan bitumen dengan sifat hidrofobik dapat digunakan untuk tanah-tanah yang mudah tererosi dan belum membentuk agregat.

Bitumen yang akan digunakan dengan teknik penyemprotan ke permukaan tanah setelah diencerkan dengan menggunakan air. Penyebaran emulsi ke permukaan tanah yang telah diolah akan memberikan hasil yang lebih baik. Setelah dilakukan penyemprotan, permukaan tanah diolah kembali agar emulsi bitumen dapat membantu membentuk agregat tanah.

Pada tanah Andisol, emulsi bitumen tidak berpengaruh terhadap hasil kentang tetapi dapat menurunkan jumlah erosi yang terjadi. Sedangkan bitumen hidrofilik yang digunakan untuk merehabilitasi lahan Gunung Agung di Bali, memiliki daya menahan air yang tinggi sehingga memberikan pengaruh terhadap peningkatan hasil kacang tanah. Bitumen yang digunakan untuk pemulihan lahan kritis pada tanah Mediteran di Jumantono, Kabupaten Karanganyar, Provinsi Jawa Tengah memberikan pengaruh yang baik terhadap pertumbuhan tanaman *Albizia falcataria*. Tanaman lebih cepat tumbuh dan lebih cepat menutup permukaan tanah (Abdurachman dan Suwardjo 1979).

Polyacrilamid (PAM)

Polyacrilamid merupakan senyawa kimia yang mempunyai berbagai macam kegunaan, diantaranya adalah pembentukan agregat atau struktur tanah-tanah. Penggunaan PAM untuk perbaikan sifat fisika tanah

dalam bentuk cairan agar mudah untuk disemprotkan ke permukaan tanah.

Penggunaan PAM pada tanah Andisol mampu menurunkan jumlah erosi tetapi tidak berpengaruh terhadap hasil kentang, sedangkan PAM yang digunakan untuk tanah eks lahar Gunung Agung memberikan pengaruh yang baik terhadap pertumbuhan kacang tanah, demikian juga pertumbuhan *Albizia falcata* pada tanah Mediteran Jumantono, Jawa Tengah (Abdurachman dan Suwardjo, 1979).

Hidrogel Anorganik

Selain dalam bentuk senyawa organik, terdapat pula hidrogel anorganik. Fungsinya sama dengan hidrogel organik, yaitu untuk meningkatkan ketersediaan air di dalam tanah. Kemampuannya dalam menyerap air juga beragam, yaitu dari < 200 sampai dengan 500 kali bobot keringnya. Selain sangat dipengaruhi oleh kemampuannya dalam menyerap dan menyimpan air, mutu dari hidrogel juga dinilai dari kecepatan terdegradasi di dalam tanah.

Hidrogel sangat bermanfaat digunakan di daerah dengan curah hujan rendah tetapi distribusinya menyebar merata atau di daerah dengan curah hujan tinggi tetapi distribusinya tidak merata. Di daerah dengan curah hujan rendah dan distribusi merata, hidrogel dapat dimanfaatkan untuk menyerap air dan menyimpannya serta melepaskan simpanan air tersebut sesuai dengan kondisi kelembaban tanah, sehingga kebutuhan air tanaman akan terpenuhi. Sebaliknya di daerah dengan curah hujan tinggi dan distribusinya tidak merata, hidrogel dapat dimanfaatkan untuk menyimpan air dan melepaskannya pada saat terjadi cekaman air. Oleh karena itu, hidrogel diharapkan mampu memenuhi kebutuhan air tanaman yang dibudidayakan. Salah satu hidrogel anorganik adalah *hidrostore*, namun demikian pembenh tanah jenis ini sulit diperoleh di pasaran bebas.

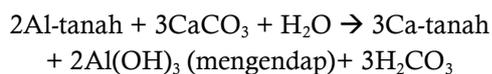
Pembenh Tanah Anorganik Alami

Pembenh tanah anorganik dari bahan-bahan alami sebagian sudah dikenal seperti kapur pertanian, dolomit, dan zeolit. Masing-masing mempunyai kegunaan yang berbeda, karena mempunyai sifat-sifat unggul yang berbeda pula. Oleh karena itu, sulit menemukan satu pembenh tanah yang mampu menjadi solusi bagi setiap permasalahan kualitas tanah.

Kualitas atau kesuburan tanah tidak hanya dinilai dari kandungan unsur hara yang banyak dan mencukupi kebutuhan tanaman, tetapi juga harus dinilai dari ketersediaan bagi tanaman, serta hubungan antara air-tanah-udara di daerah perakaran tanaman. Jika hubungan tersebut serasi dan dalam kondisi optimum, maka pertumbuhan tanaman menjadi lebih baik dengan hasil lebih baik pula.

Kapur Pertanian (Kalsit dan Dolomit)

Pada tanah mineral masam, sumber kemasaman tanah yang utama adalah Al^{3+} yang akan menyumbangkan H^+ ke dalam larutan tanah melalui proses hidrolisis dengan reaksi: $Al^{3+} + 3H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3H^+$. Senyawa CaO dan MgO dalam tanah akan bereaksi dengan air membentuk $CaCO_3$ dan $MgCO_3$ yang berperan dalam penurunan Al_{da} dalam tanah. Pemberian Kaptan atau Dolomit ke dalam tanah dapat mengendapkan Al^{3+} menjadi $Al(OH)_3$ sehingga Al tidak aktif dalam meningkatkan kemasaman tanah. Kalsit mengandung ($CaCO_3 + MgCO_3$) minimal 85% atau $CaO+MgO$ minimal 47%, dan Dolomit mengandung 30% CaO dan 18% MgO . Mekanisme penurunan kemasaman tanah disajikan dalam reaksi di bawah:



Kapur pertanian biasanya dibuat dari bahan dasar batu kapur kalsit yang sangat sedikit mengandung Mg (magnesium) dan mempunyai rumus kimia $CaCO_3$, sedangkan kapur pertanian yang mengandung Mg dikenal sebagai dolomit. Kapur pertanian tanpa Mg biasanya digunakan hanya untuk meningkatkan reaksi tanah dari sangat masam menjadi agak masam agar pertumbuhan tanaman menjadi lebih baik. Sedangkan dolomit digunakan pada tanah-tanah masam dan juga mengalami kekurangan Mg , sehingga selain menurunkan kemasam juga mampu menambah hara Mg . Sebagai salah satu contoh untuk tanah-tanah Ultisol yang bersifat masam, agar memperoleh hasil yang lebih baik sebaiknya ditambahkan dolomit. Dosis dolomit untuk setiap hektar lahan pertanian berkisar dari 0,5 ton sampai 2,0 ton atau lebih, tergantung peningkatan pH yang diinginkan. Makin tinggi peningkatan pH makin banyak dolomit yang dibutuhkan.

Penggunaan kapur dalam jangka panjang memiliki pengaruh yang kurang menguntungkan bagi keseimbangan hara dalam tanah. Sebagai contoh, ketersediaan kalium sangat dipengaruhi oleh nisbah

$K/(Ca+Mg)$ dalam tanah. Penggunaan kapur juga akan mengurangi ketersediaan unsur mikro, terutama bila diberikan dalam jumlah yang berlebih. Kapur juga menyebabkan kadar bahan organik tanah merosot dengan cepat karena aktivitas mikroorganisme perombak menjadi lebih aktif. Oleh karenanya penggunaan kapur terus-menerus harus dihindari untuk menjaga kualitas tanah tetap baik. Sumber bahan amelioran insitu yang mampu menekan dampak buruk kemasaman tanah seperti bahan organik, cukup tersedia di lapang. Namun demikian efisiensi dan efektivitasnya perlu ditingkatkan melalui proses fermentasi dan pengayaan, sehingga tidak bulky, dan lebih mudah diaplikasikan.

Soil Neutralizer

Soil neutralizer (penetralsir tanah) merupakan produk relatif baru dengan klaim mempunyai fungsi yang sama dengan kapur pertanian, yaitu untuk menanggulangi kemasaman tanah. Produk ini beredar di pasaran sekitar tiga tahun terakhir. Hasil analisis dua contoh penetralsir tanah, dalam hal ini disebut sebagai penetralsir A dan B disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Karakteristik dua penetralsir tanah (A dan B)
 Table 5. The Characteristics of two soil neutralizer (A and B)

Sifat kimia	Soil neutralizer A	Soil neutralizer B
pH	12,67	12,35
C-organik (%)	2,80	1,72
N-organik (%)	0,06	0,04
C/N	50	45
P_2O_5 (%)	0,007	0,006
K (%)	3,72	5,71
Ca (%)	11,93	9,75
Mg (%)	4,17	3,54
S (%)	0,21	0,24
Pb $mg\ l^{-1}$	0,00	0,00
Cd $mg\ l^{-1}$	0,00	0,00

Sumber: Balittanah (2011)

Penetralsir tanah A mempunyai pH sangat tinggi, yaitu 12,67, kadar C-organik rendah (< 4%), dan N sangat rendah, sehingga nisbah C/N menjadi tinggi. Kandungan Ca dan Mg adalah 11,93 dan 4,17%. Dengan demikian, aplikasi penetralsir tanah dengan dosis 3 $l\ ha^{-1}$ dapat menambah 357,9 $mg\ Ca$ dan 125,1 $mg\ Mg\ ha^{-1}$, dengan asumsi BD penetralsir tanah adalah 1. Penetralsir tanah B juga mempunyai pH

sangat tinggi (12,35), kadar C-organik rendah (< 4%), dan N sangat rendah sehingga nisbah C/N tinggi, kandungan Ca dan Mg adalah 9,75 dan 3,54%. Berarti penambahan penetralisir tanah ini dengan dosis 3 l ha⁻¹, setara dengan menambah 292,4 mg Ca dan 106,2 mg Mg ha⁻¹ jika BD penetralisir tanah B adalah 1.

Aplikasi kedua jenis penetralisir tanah tersebut (A dan B) pada tanah Ultisol dan Inceptisol yang dilakukan di Laboratorium dan Rumah Kaca dengan dosis 1,5-6 l ha⁻¹ tidak berpengaruh nyata terhadap pH tanah. Sebagai pembanding kapur pertanian lebih efektif dalam meningkatkan pH dan menanggulangi permasalahan aluminium di tanah masam (Gambar 2).

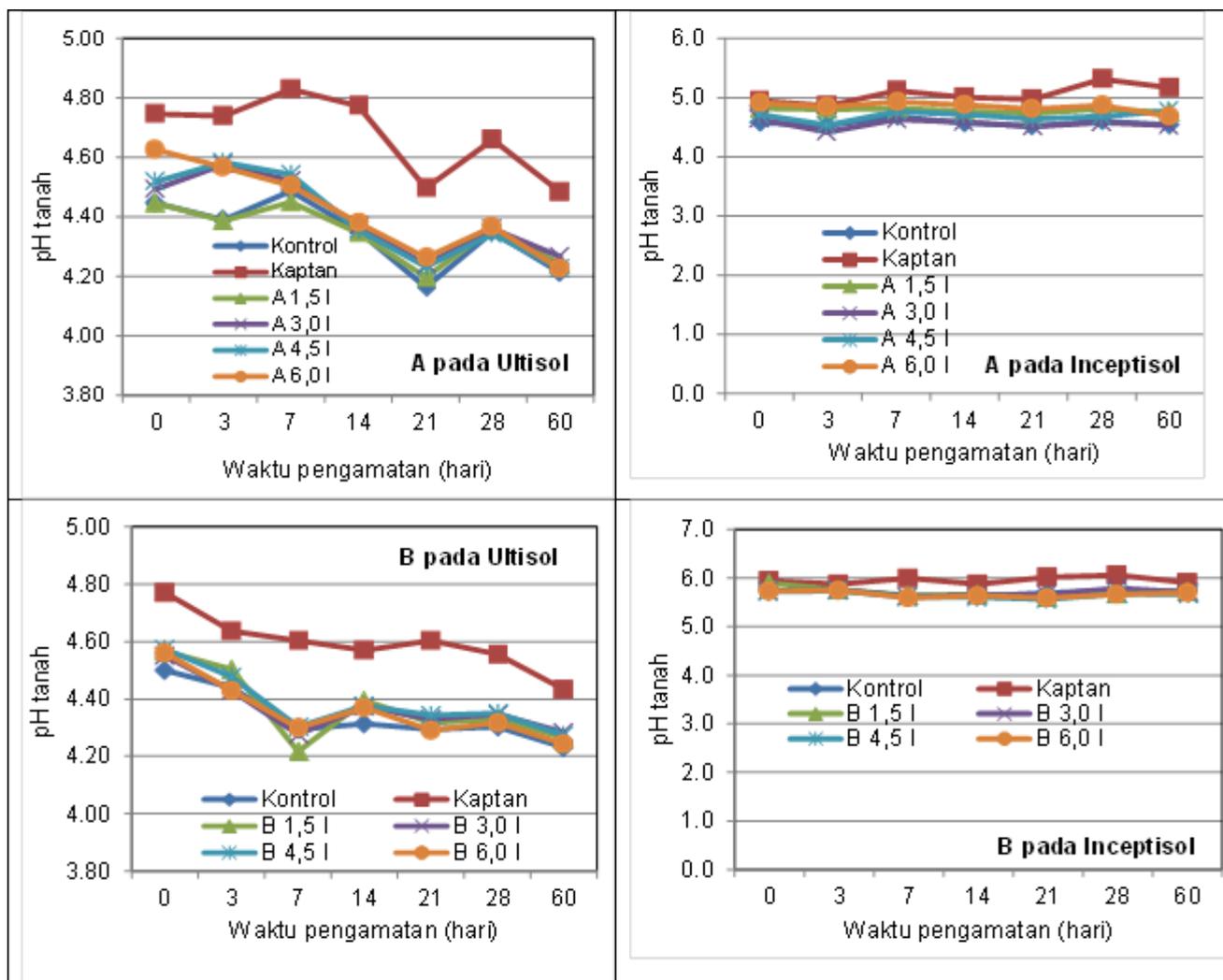
Kedua jenis penetralisir tersebut juga tidak berpengaruh nyata terhadap kadar Al_{td} dan kejenuhan Al tanah Ultisol (Gambar 3). Lain halnya dengan kapur pertanian yang nyata menurunkan kadar Al_{td} dan kejenuhan Al. Kejenuhan Al untuk pertumbuhan

tanaman kedelai dinyatakan rendah apabila < 20% (Dierrolf *et al.* 2001). Dengan pemberian penetralisir tanah, kejenuhan Al masih > 40%.

Tidak berfungsinya penetralisir sebagai pembenah tanah khususnya dalam memperbaiki pH tanah dan menurunkan kejenuhan Al, berdampak pula terhadap hasil tanaman, dengan dosis penetralisir tanah hingga 6 l ha⁻¹, hasil panen kedelai yang dicapai tidak berbeda nyata dengan kontrol (Tabel 6).

Zeolit

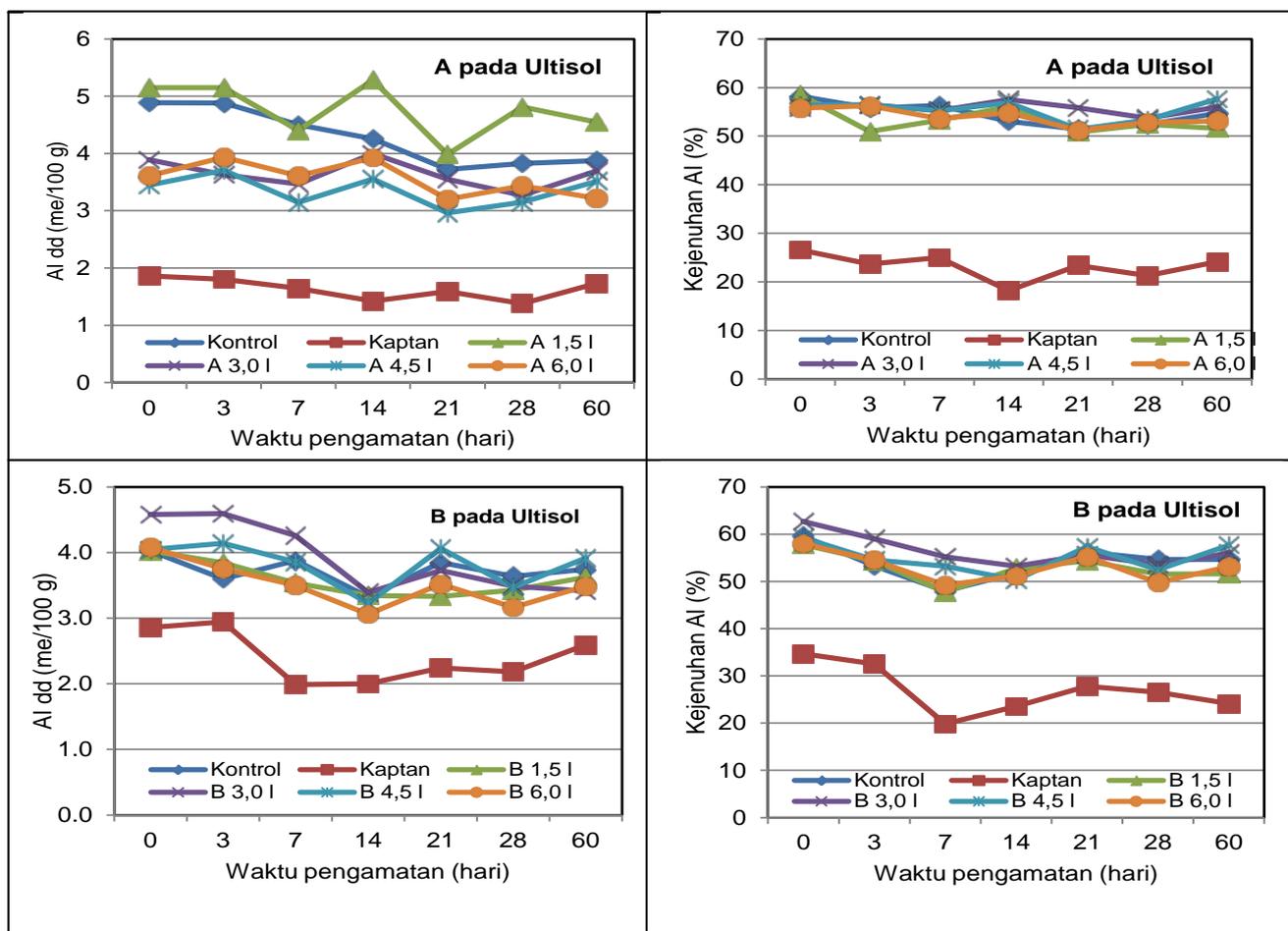
Zeolit adalah mineral senyawa alumina silikat hidrat yang berasal dari batuan beku atau tufa vulkanik yang telah mengalami proses alterasi. Endapan zeolit hasil sedimentasi abu vulkanik bisa berada pada lingkungan danau yang bersifat alkali, berasal dari metamorfosa tingkat rendah, atau proses hidrotermal.



Sumber: Balittanah (2011)

Gambar 2. Pengaruh dua jenis soil neutralizer (A dan B) terhadap pH tanah Ultisols dan Inceptisols

Figure 2. The effect of two types of soil neutralizer (A and B) on pH of Ultisols and Inceptisols



Sumber: Balittanah (2011)

Gambar 3. Pengaruh penetralisir tanah terhadap Al_{dd} dan kejenuhan Al pada tanah Ultisol

Figure 3. The effect of soil neutralizers on exchangeable Al and Al saturation of Ultisol

Tabel 6. Pengaruh soil neutralizer terhadap hasil panen kedelai pada Ultisols dan Inceptisols

Table 6. The effect of soil neutralizer on yield of soybeans on Ultisols and Inceptisols

Perlakuan	Berat kering biji kedelai	
	Pembenah tanah	
	A	B
 g pot ⁻¹	
<i>Ultisols</i>		
Kontrol	3,87 b	4,50 b
Kapur pertanian	8,06 a	8,10 a
Soil neutralizer A 1,5 l	4,93 b	4,04 b
Soil neutralizer A 3,0 l	4,25 b	4,25 b
Soil neutralizer A 4,5 l	5,23 b	5,13 b
Soil neutralizer A 6,0 l	5,35 b	5,49 b
<i>Inceptisols</i>		
Kontrol	7,62 a	13,22 ab
Kapur pertanian	9,52 a	15,60 a
Soil neutralizer A 1,5 l	7,23 a	13,37 ab
Soil neutralizer A 3,0 l	7,60 a	12,61 b
Soil neutralizer A 4,5 l	9,78 a	13,05 ab
Soil neutralizer A 6,0 l	7,75 a	13,82 ab

Sumber Balittanah (2011)

Biasanya komposisinya terdiri atas SiO₄ dan AlO₄ dengan perbandingan Si dan Al bervariasi dari 1:1 sampai 100:1, kisi mineral zeolit merupakan struktur terbuka dengan ruang antar lapisan berisi molekul air (Prihatini *et al.* 1987) dan jumlah molekul air tersebut mencapai 10-25% dari bobot keringnya (Sastiono dan Wiradinata 1989). Saat ini beredar berbagai macam zeolit yang dapat digunakan untuk berbagai keperluan, meliputi sektor pertanian tanaman pangan, peternakan, perikanan, industri manufaktur, dan konstruksi karena dapat berperan sebagai bahan penjerap (adsorben), penukar kation, dan katalisator. Sebagai pembenah tanah, zeolit mampu mempertahankan kadar air tanah tetap tinggi sampai dengan 14 hari setelah hujan (Sutono dan Agus 1999).

Di pasaran banyak sekali beredar zeolit yang mempunyai kualitas beragam, zeolit yang diarahkan untuk meningkatkan KTK tanah hendaknya mempunyai KTK > 60 cmol+ kg⁻¹. Zeolit yang bagus mempunyai kandungan klipnotilolit, selain mampu

meningkatkan KTK juga mampu meretensi (menahan) air.

Berdasarkan fungsi utamanya tersebut, maka sebaiknya zeolit diaplikasikan pada tanah ber-KTK rendah. Secara umum bahan zeolit alam yang berkualitas baik memiliki kandungan zeolit total di atas 60% (mineral pengotor < 40%) dan nilai KTK > 120 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$. Dalam bidang pertanian, zeolit digunakan dalam bentuk bubuk (umumnya dengan kehalusan lolos 60 mesh) atau granul dengan ukuran butir 1-3 mm (Husaeni 2007). Berdasarkan Permentan No. 70/Permentan/SR 140/10/2011, persyaratan teknik minimal dari zeolit sebagai pembenh tanah di antaranya adalah harus mempunyai KTK > 60 $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$.

Hasil-hasil penelitian lainnya menunjukkan bahwa zeolit dapat meningkatkan unsur kalium. Pencampuran zeolit dan pupuk urea (zeo-urea tablet) dapat meningkatkan produksi padi. Substitusi zeolit sebanyak 20% dengan takaran urea 150-200 kg ha^{-1} memberikan hasil yang menguntungkan. Penggunaan zeolit sebagai campuran media lumpur PAM dapat mengurangi kandungan logam-logam berat Cr, Pb, dan Cu; pemberian zeolit dan kotoran sapi pada lahan bekas tambang yang telah mengalami kerusakan dapat memperbaiki bobot isi tanah, permeabilitas, dan kandungan NH_4 tanah (Sastiono dan Suwardi 1999).

Pembenh Tanah Hayati

Pembenh Tanah Hayati untuk Pembentukan dan Pemantapan Agregat

Pembenh tanah hayati merupakan pembenh tanah dengan bahan aktif mikroba, terutama mikroba penghasil eksopolisakrida (EPS). EPS merupakan molekul polimer karbohidrat atau polisakarida yang disekresikan ke luar permukaan dinding sel mikroba, berguna untuk melindungi sel dari kondisi cekaman lingkungan diantaranya kekeringan, pH rendah, dan pH tinggi (Suresh and Mody 2009). Kelompok mikroba penghasil EPS berasal dari prokariot dan eukariot, mulai dari bakteri gram negatif, gram positif, hingga fungi. Beberapa bakteri penghasil EPS yang telah banyak dilaporkan antara lain *Caulobacter*, *Acinetobacter*, *Agrobacterium*, *Alcaligenes*, *Cytophaga*, *Flavobacterium*, *Pseudomonas*, dan *Rhizobium*. Sedangkan untuk bakteri Gram positif yang telah diteliti adalah *Leuconostoc mesenteroides* dan *Cellulomonas flavigena* (Ivanov dan Chu 2008). Perbedaan pembenh hayati dan pupuk hayati

adalah pada fungsi utamanya. Fungsi utama pembenh hayati adalah dalam perbaikan struktur tanah. Sedangkan pupuk hayati lebih fokus pada perbaikan ketersediaan hara.

Beberapa strain *Pseudomonas* sp. mampu meningkatkan produksi EPS-nya selama kekeringan. Produksi EPS ini tampaknya dapat meningkatkan retensi air pada lingkungan mikroba dan mengatur difusi (penyebaran) sumber karbon seperti glukosa. EPS mikroba juga mendapat perhatian yang cukup besar karena fungsinya dalam meningkatkan kemantapan agregat. Tampaknya aksi dari mikroba dalam proses agregasi partikel tanah berkaitan dengan produksi EPS oleh organisme (Alami *et al.* 2000). Proses agregasi berkaitan dengan beberapa faktor, seperti sifat fisik, kondisi iklim dan kegiatan biologi dalam tanah (Materchera *et al.* 1994; Bezzate *et al.* 2000). Beberapa faktor hayati yang bekerja secara simultan dalam pemantapan agregat tanah secara alami melalui gaya elektrostatik, yaitu:

- EPS yang dihasilkan mikroba dapat meningkatkan adhesi partikel tanah ke akar tanaman dan stabilitas mekanik tanah rhizosfer, selain meningkatkan tingkat retensi air dalam lingkungan (Chenu dan Roberson 1996; Amellal *et al.* 1998).
- Fungi selain menghasilkan EPS juga memiliki filamen yang disebut hifa, yang memanjang ke dalam tanah dan mengikat partikel-partikel tanah.
- Akar mengeluarkan beberapa jenis gula ke dalam tanah yang membantu mengikat mineral tanah.

Bio Soil Neutralizer

Bio Soil Neutralizer disamping diklaim oleh produsennya dapat berfungsi menurunkan kemasaman tanah, juga dipromosikan dapat meningkatkan beberapa mikroba fungsional. Contoh *Bio Soil Neutralizer* yang pernah diuji mempunyai pH 5,8, mengandung 0,4% CaO dan 0,04% MgO, La (Lantanun) 1,27%, dan Ce (Cerium) 3,72%, serta mengandung mikroba yaitu *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Azotobacter*, *Bradyrhizobium* dan bakteri pelarut fosfat. Hasil uji mutu *Bio Soil Neutralizer* tersebut menunjukkan kandungan CaO dan MgO sangat rendah, sedangkan La dan Ce (yang diklaim sebagai bahan aktif lainnya disamping mikroba) secara teknis tidak diatur dalam Permentan No.70/Permentan/SR.140/10/2011 karena

belum ada hasil penelitian yang mendukung. Kandungan mikroba yang sesuai hanya *Azotobacter* yang berfungsi sebagai penambat N (Tabel 7).

Kadar CaO dan MgO yang terkandung dalam kaptan dan dolomit lebih tinggi dari *Bio Soil Neutralizer* sehingga kedua bahan amelioran tersebut lebih efektif dalam penurunan kemasaman tanah. Penelitian ameliorasi dengan menggunakan *Bio Soil Neutralizer* dan dolomit yang dikombinasikan dengan pemupukan di Taman Bogo, Lampung Timur menunjukkan bahwa dolomit lebih efektif dalam meningkatkan pH tanah dibandingkan perlakuan *Bio Soil-Neutralizer*. Kenaikan pH tanah diikuti oleh meningkatnya populasi *Azotobacter* sp., serapan hara N, P dan K tanaman, P tersedia, jumlah dan bobot kering bintil akar kedelai, serta aktivitas enzim dehydrogenase. Hal ini menunjukkan ameliorasi dengan dolomit secara umum menunjukkan pengaruh yang lebih baik terhadap sifat kimia dan biologi tanah dibandingkan dengan *bio soil-neutralizer* (Tabel 8, 9, dan 10).

Dolomit juga memberikan hasil kedelai yang lebih tinggi dibandingkan perlakuan *bio soil neutralizer*, demikian pula jika dibandingkan dengan perlakuan 3/4 NPK + pupuk organik 2 t ha⁻¹ (Tabel 11).

PENGEMBANGAN PEMBENAH TANAH UNTUK PEMULIHAN LAHAN PERTANIAN

Penelitian pembenah tanah di Indonesia sudah dilakukan sejak tahun 1970-an. Bitumen (emulsi aspal) telah digunakan untuk mempercepat pembentukan

agregat dan meningkatkan stabilitas agregat pada tanah pasir Merapi dan Andisol (Lenvain *et al.* 1973a,1973b; Suwardjo *et al.* 1973; LPT 1976; LPT 1978).

Pembenah tanah mineral alami lainnya yang telah banyak diteliti dan dikembangkan adalah zeolit. Penggunaan zeolit sebagai bahan pembenah tanah telah banyak dilakukan di Jepang, Amerika, dan negara-negara Eropa (Suwardi 2007). Pembenah tanah mineral lainnya seperti kapur pertanian (kaptan) juga telah digunakan untuk meningkatkan produktivitas tanah-tanah masam di Indonesia.

Penelitian dan pengembangan kapur sebagai pembenah tanah banyak dilakukan pada periode tahun 1980-1986, kegiatan ini bertepatan dengan program Departemen (Kementrian) Pertanian yang tengah melakukan program pengapuran pada areal pertanaman kedelai secara nasional tepatnya selama musim tanam 1983/1984.

Pembenah tanah organik merupakan jenis yang paling banyak diteliti. Bahan-bahan seperti skim lateks telah terbukti dapat meningkatkan persentase agregat stabil dan menurunkan persen agregat yang tidak stabil (Bernas *et al.* 1995). Limbah pertanian seperti blotong, sari kering limbah dan lain sebagainya juga dimanfaatkan sebagai pembenah tanah, namun demikian jumlahnya relatif terbatas.

Tabel 7. Hasil analisis mutu *bio soil neutralizer*

Table 7 Laboratory analyses of *bio soil neutralizer* quality

Parameter	Hasil analisis	Standar mutu (revisi Permentan No. 70/2011)	Kesesuaian dengan Permentan
pH	5,8	3 – 8	Sesuai
CaO (%)	0,40	CaO+MgO > 47 %	Tidak sesuai
MgO (%)	0,04	Dalam bentuk padat (non-organik)	Tidak sesuai
La (%)	1,27	-	Tidak diatur karena tidak ada dukungan data penelitian
Ce (%)	3,72	-	
Mikroba			
<i>Rhizobium</i> (CFU ml ⁻¹)	< 10	10 ⁷	Tidak sesuai
<i>Azospirillum</i> (MPN ml ⁻¹)	2,3 x 10 ²	10 ⁷	Tidak sesuai
<i>Azotobacter</i> (CFU ml ⁻¹)	5,7 x 10 ⁹	10 ⁷	Sesuai
<i>Bradyrhizobium</i> sp. (CFU ml ⁻¹)	< 10	10 ⁷	Tidak sesuai
Bakteri pelarut fosfat (CFU ml ⁻¹)	1,5 x 10 ⁶	10 ⁷	Tidak sesuai

Sumber: Hartatik *et al.* (2012)

Tabel 8. Pengaruh amelioran (dolomit dan bionutralizer) dan pemupukan terhadap pH tanah saat fase primordia tanaman kedelai pada tanah Typic Hapluduts di Taman Bogo, Lampung Timur

Table 8. *The effect of ameliorant (dolomit and bionutralizer) and fertilizer on soil pH at primordia phase of soybean crop on Typic Hapludults in Taman Bogo East Lampung*

Pemupukan	pH H ₂ O		Rata-rata
	Dolomit	Bio soil neutralizer	
Kontrol	4,92 a	3,96 a	4,44 A
NPK rekomendasi	4,91 a	3,90 a	4,41 A
¾ NPK rekomendasi	4,85 a	3,88 a	4,99 A
¾ NPK + pupuk organik 2 t ha ⁻¹	5,20 a	4,02 a	4,61 A
Rata-rata	4,97 A	3,94 B	

Tabel 9. Pengaruh amelioran (dolomit dan bionutralizer) dan pemupukan terhadap populasi *Azotobacter* sp. pada saat fase primordia tanaman kedelai pada tanah Typic Hapluduts di Taman Bogo, Lampung Timur

Table 9. *The effect of ameliorant (dolomit and bionutralizer) and fertilizer on population of Azotobacter sp at primordia phase of soybean crop on Typic Hapludults in Taman Bogo East Lampung*

Pemupukan	Populasi <i>Azotobacter</i> sp.		Rata-rata
	Dolomit	Bio soil netralizer	
 CFU g ⁻¹		
Populasi awal (sebelum tanam)			1,27 x 10 ⁶
Kontrol	1,60 x 10 ⁷ a	1,27 x 10 ⁶ a	8,63 x 10 ⁶ B
NPK rekomendasi	1,30 x 10 ⁷ a	8,57 x 10 ⁶ a	1,06 x 10 ⁷ A
¾ NPK rekomendasi	2,26 x 10 ⁷ a	9,37 x 10 ⁶ a	1,60 x 10 ⁷ A
¾ NPK + pupuk organik 2 t ha ⁻¹	4,83 x 10 ⁷ a	8,55 x 10 ⁶ a	2,74 x 10 ⁷ A
Rata-rata	2,45 x 10 ⁷ A	6,94 x 10 ⁶ B	

Tabel 10. Pengaruh amelioran (dolomit dan bionutralizer) dan pemupukan terhadap produksi enzim dehidrogenase pada tanah pada saat fase primordia tanaman kedelai pada tanah Typic Hapluduts di Taman Bogo, Lampung Timur

Table 10 *The effect of ameliorant (dolomit and bionutralizer) and fertilizer on production of dehydrogenase enzym at primordia phase of soybean crop on Typic Hapludults in Taman Bogo East Lampung*

Pemupukan	Enzim dehidrogenase		Rata-rata
	Dolomit	Bio soil neutralizer	
 µL g ⁻¹		
Kontrol	13,73 a	4,28 b	8,75 A
NPK Rekomendasi	11,26 ab	11,04 a	9,04 A
¾ NPK Rekomendasi	12,61 a	9,89 b	9,87 A
¾ NPK + pupuk organik 2 t ha ⁻¹	8,95 b	12,88 a	9,98 A
Rata-rata	11,64 A	9,52 B	

Sumber: Hartatik *et al.* (2012)

*) Angka-angka yang diikuti huruf kecil yang sama atau angka-angka pada kolom atau baris yang diikuti oleh huruf besar yang sama tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5 %.

Tabel 11. Pengaruh amelioran dan pemupukan terhadap hasil tanaman kedelai ada tanah Typic Hapluduts di Taman Bogo, Lampung Timur

Table 11. The effect of ameliorant (dolomit and bionutralizer) and fertilizer on yield of soybean on Typic Hapludults in Taman Bogo East Lampung

Pemupukan	Biji kering		Rata-rata
	Dolomit	Bio soil neutralizer	
			t ha ⁻¹
Kontrol	1,83b	0,53c	1,18C
NPK rekomendasi	2,89a	1,21b	2,05B
¾ NPK rekomendasi	2,07b	0,82bc	1,44C
¾ NPK + pupuk organik 2 t ha ⁻¹	3,25a	2,62a	2,94A
Rata-rata	2,51A	1,30B	

Sumber: Hartatik *et al.* (2012)

*) Angka pada kolom perlakuan pada baris yang sama yang diikuti oleh huruf yang sama, tidak berbeda nyata pada uji DMRT 5 %.

Pembenah tanah organik yang bersumber dari pupuk kandang, kompos, dan bahan organik lainnya juga telah banyak diteliti. Manfaat dari bahan organik, baik sebagai sumber hara (pupuk) maupun sebagai pembenah tanah telah banyak dibuktikan (Rachman *et al.* 2006; Suriadikarta dan Simanungkalit 2006). Dari hasil rangkuman berbagai penelitian dapat disimpulkan pembenah tanah dalam bentuk polimer organik mempunyai kemampuan yang lebih baik dalam memperbaiki sifat-sifat tanah, baik sifat fisik, kimia maupun biologi tanah (Sutono dan Abdurachman 1997). Penelitian pengkayaan pembenah tanah organik dengan bahan mineral dilakukan untuk meningkatkan efektivitas bahan organik dalam memperbaiki sifat-sifat tanah. Bahan pengkaya yang banyak digunakan adalah kapur, zeolit, atau unsur hayati. Misalnya pupuk kandang dengan dosis 5 t ha⁻¹ yang dikombinasikan dengan zeolit sebanyak 0,3 t ha⁻¹, mempunyai kemampuan yang relatif lebih baik dalam memperbaiki sifat fisik tanah, dibanding dengan perlakuan hanya pupuk atau hanya zeolit saja. Demikian pula halnya dengan pengaruhnya terhadap peningkatan produksi tanaman (Sutono dan Agus 1999). Berbagai formula pembenah tanah organik banyak dipasarkan sejak tahun 2009. Pemerintah melalui Kementerian Pertanian melakukan program bantuan langsung pembenah tanah di beberapa lokasi sentra produksi pangan sejak tahun 2009/2010.

Saat ini telah dikembangkan berbagai jenis bahan pembenah hayati, atau lebih dikenal sebagai pupuk hayati. Istilah pupuk hayati digunakan untuk nama kolektif untuk semua kelompok fungsional mikroba tanah yang dapat berfungsi sebagai penyedia hara dalam tanah, sehingga dapat tersedia untuk tanaman (Suriadikarta dan Simanungkalit 2006). Kelompok organisme perombak bahan organik baik mikrofauna

maupun makrofauna (cacing) juga dapat berperan sebagai agen pembenah tanah. Misalnya pembenah tanah yang dapat meningkatkan stabilitas agregat tanah adalah produk dekomposisi biomassa, eksopolisakarida (EPS) asal bakteri, miselium fungi, dan lain-lain. Hasil penelitian Tisdale dan Oades *dalam* Simanungkalit (2006) menunjukkan bahwa mikoriza berpengaruh terhadap agregasi tanah. Namun demikian pemanfaatannya di tingkat pengguna belum sebesar dekomposer (pembenah tanah hayati yang ditujukan untuk mempercepat proses dekomposisi bahan organik). Beberapa dekomposer sudah beredar di pasaran, dan sudah dimanfaatkan oleh produsen pupuk organik dan namun pemanfaatannya oleh petani masih relatif rendah.

Beberapa jenis pembenah tanah sintetis (buatan pabrik) juga telah banyak diteliti, misalnya saja yang pernah dikembangkan di Indonesia pada tahun 1980-an diantaranya Polyacrylamine (PAM), hyrostock, dan lainnya. Bahan-bahan sintetis tersebut juga tergolong efektif dalam memperbaiki sifat-sifat tanah dan berdampak pada perbaikan pertumbuhan dan produksi tanaman (Ginting 1975; Abdurachman dan Undang Kurnia 1983; Suwardjo *et al.* 1973). Namun demikian, penelitian dampak jangka panjang dari penggunaan bahan pembenah tanah sintetis, baik terhadap tanah maupun lingkungan belum banyak dilakukan.

PELUANG DAN KENDALA PEMANFAATAN BAHAN PEMBENAH TANAH

Meskipun peranan pembenah tanah dalam memperbaiki kualitas tanah sudah banyak dibuktikan, namun aplikasinya pada tingkat petani masih rendah. Bahan organik seperti sisa tanaman atau pupuk

kandang, merupakan sumber pembenh tanah yang bersifat insitu, namun jumlahnya relatif terbatas. Oleh karena itu, meskipun telah banyak petani yang memanfaatkan pupuk kandang, namun umumnya dosis penggunaannya masih relatif rendah, kecuali pada pertanaman sayuran.

Alternatif yang dapat ditempuh untuk memenuhi kebutuhan bahan organik adalah dengan melakukan penanaman sumber bahan organik, misalnya dalam sistem *alley cropping* (budidaya lorong), atau tanaman penutup tanah (*cover crop*) utamanya dari jenis legum pada saat lahan bera atau sebelum persiapan tanam. Hasil biomassa dari pangkasan tanaman pagar seperti *Flemingia congesta* dapat mencapai 5-26 t ha⁻¹ tahun⁻¹ (Suganda et al. 1991, Haryati et al. 1991, dan Erfandi et al. 1988). Produksi biomassa dari tanaman penutup seperti benguk (*Mucuna* sp.), kacang tunggak (*Vigna sinensis*), atau kakacangan (*Arachis pintoi*) berkisar antara 5-15 t ha⁻¹ (Sudharto et al. 1993, Purnomo et al. 1992).

Masih ada beberapa alternatif sumber bahan organik yang belum dimanfaatkan secara optimal, misalnya sampah kota. Namun lokasinya yang seringkali jauh dari pengguna, menyebabkan kesulitan dalam hal pengangkutan. Pemilahan sampah dalam bentuk organik dan anorganik, juga seringkali menjadi masalah dalam pemanfaatan sumber bahan organik tersebut. Saat ini telah banyak pengusaha yang terjun dalam pengolahan sampah organik atau pupuk kandang untuk dijadikan kompos, sehingga lebih siap untuk digunakan. Namun demikian karena rata-rata dijual dengan harga relatif mahal, petani hanya mampu membeli untuk penggunaan dengan dosis relatif rendah. Oleh karena itu di beberapa lokasi pembenh tanah diberikan oleh pemerintah sebagai bantuan langsung pupuk. Namun demikian, agar penggunaan pembenh tanah lebih bersifat berkelanjutan, akan lebih bermanfaat jika petani dibekali kemampuan untuk dapat memproduksi pembenh tanah dengan kualitas baik, dan dengan menggunakan sumber atau bahan yang bersifat insitu.

Zeolit merupakan pembenh tanah mineral yang promosinya relatif gencar. Para pengusaha mengemas zeolit dalam berbagai merk dagang dan formulasi (bahan campuran) yang beragam. Sebagai daerah vulkanis, Indonesia memiliki berbagai macam mineral yang sumbernya berasal dari gunung api termasuk zeolit yang jumlahnya relatif banyak. Berdasarkan hasil penyelidikan Pusat Inventarisasi Sumberdaya Mineral dan Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Mineral dan Batubara (Husaini 2007), jumlah cadangan sumberdaya zeolit di Indonesia tidak kurang dari 205.825.020 ton yang tersebar di Provinsi Sumatera Utara, Sumatera Selatan, Lampung, Jawa Barat, Banten, Jawa Tengah, Jawa Timur, NTB, NTT, dan

Sulawesi Selatan. Diperkirakan di luar wilayah yang telah disebutkan di atas, tambang zeolit alam Indonesia masih mungkin dapat ditemukan.

Berdasarkan hasil penelitian, jika kualitas zeolit tergolong baik, di antaranya dicerminkan dengan nilai KTK yang relatif tinggi, maka bisa nyata dampaknya terhadap perbaikan sifat-sifat tanah, sehingga berpotensi digunakan untuk merehabilitasi lahan-lahan yang telah terdegradasi. Namun demikian, berbagai kendala yang dihadapi dalam penggunaan zeolit di bidang pertanian antara lain adalah: (1) standarisasi, hal ini berhubungan dengan kualitas zeolit yang ditemukan di pasar sangat beragam dan seringkali sulit menemukan zeolit dengan KTK > 60 cmol+ kg⁻¹, sesuai dengan persyaratan minimal zeolit untuk pembenh tanah; (2) harga zeolit yang relatif mahal untuk petani; dan (3) penyebaran informasi ke pengguna khususnya petani. Selain masalah intensitas penyuluhan yang kurang, kekeliruan dalam memberikan informasi kepada petani harus dihindari. Adanya informasi bahwa zeolit dapat menggantikan pupuk, bisa menyebabkan kesalahan dalam aplikasi zeolit oleh petani, dan selanjutnya dapat menyebabkan petani menjadi jera untuk menggunakan zeolit.

Kaptan (kapur pertanian) merupakan pembenh tanah mineral yang relatif dikenal petani. Pada tahun 1980-an, kaptan gencar disosialisasikan ke petani dengan fokus utama untuk perbaikan reaksi tanah. Hasil survey yang dilakukan Balai Penelitian Tanah dan Biro Perencanaan, Departemen Pertanian (2007) di Jabar, Jatim, dan Lampung menunjukkan bahwa sebagian petani di daerah tersebut masih menggunakan kaptan sebagai input usahatani. Untuk menanggulangi dampak negatif penggunaan kapur dalam jangka panjang, perlu juga dikembangkan bahan pembenh alternatif selain kapur. Bahan organik tanah merupakan pembenh tanah yang juga dapat berperan dalam menanggulangi dampak dari kemasaman tanah yang tinggi.

PENUTUP

Pemilihan bahan pembenh tanah dalam upaya pemeliharaan dan pemulihan produktivitas lahan terdegradasi, sebaiknya diprioritaskan pada bahan-bahan yang murah, bersifat *insitu*, dan terbarukan. Bahan organik merupakan bahan pembenh tanah yang dapat memenuhi persyaratan tersebut. Selain itu sebagian besar lahan pertanian di Indonesia mempunyai permasalahan yang berhubungan dengan kadar bahan organik tanah. Penggunaan bahan organik sebagai pembenh tanah juga dapat mendukung konservasi karbon tanah, sehingga dapat mendukung mitigasi perubahan iklim dengan memperbesar simpanan karbon dalam tanah dan menekan pelepasan karbon dalam bentuk gas rumah kaca.

Strategi pengadaan bahan organik harus diarahkan dulu pada sumber-sumber yang bersifat insitu. Selain melalui penyuluhan, pengadaan demplot yang berhubungan dengan aplikasi bahan organik beserta teknik pengadaannya secara *in-situ* perlu dilakukan dalam jangka panjang, karena efek dari pembenah tanah umumnya lambat atau baru bisa terlihat dalam jangka panjang. Untuk meningkatkan kualitasnya, pembenah tanah organik bisa diperkaya bahan lainnya misal bahan mineral seperti zeolit, kapur, atau bahan-bahan yang merupakan hasil samping dari pengolahan hasil pertanian seperti skim lateks. Penggunaan unsur hayati juga bisa ditempuh untuk lebih memperkaya pembenah tanah. Namun petani perlu dibekali dengan kemampuan untuk mendapatkan mikroorganisme lokal yang bisa dimanfaatkan sebagai pembenah tanah. Bahan organik sulit lapuk, seperti sekam padi, serbuk gergaji, kulit coklat, tempurung kelapa, tandan kosong kelapa sawit perlu dirubah dulu menjadi biochar, sehingga fungsinya sebagai pembenah tanah menjadi lebih optimal, selain bisa berperan dalam meningkatkan konservasi karbon dalam tanah.

Pemberlakuan subsidi pada pupuk dan pembenah organik, memberi peluang bagi petani untuk bisa menjangkau harga yang ditetapkan. Namun demikian perlu dilakukan pengawasan mutu terhadap produk tersebut, baik yang disubsidi maupun yang tidak, sehingga kualitasnya terjamin dan aman dari kandungan unsur-unsur yang berbahaya misalnya kandungan logam berat. Bahan organik yang tidak memenuhi persyaratan sebagai pupuk organik (karena kadar haranya rendah), diharapkan dapat dijual dengan harga yang relatif murah (meskipun tidak disubsidi), sehingga terjangkau petani dan dapat dimanfaatkan sebagai pembenah tanah.

Disamping pembenah tanah organik, sumber-sumber bahan pembenah tanah mineral juga dapat dimanfaatkan untuk peningkatan produktivitas lahan pertanian. Namun demikian, penggunaan bahan organik yang sudah relatif membudaya jangan dilupakan. Zeolit dan kapur pertanian merupakan bahan pembenah tanah mineral yang sudah banyak dibuktikan manfaatnya, yang tidak boleh dilupakan adalah pengawasan mutu dari bahan pembenah tersebut. Masalah harga bahan pembenah tanah tersebut juga perlu diperhatikan mengingat daya beli petani yang rata-rata rendah. Penggunaan pembenah tanah mineral tetap harus disertai penggunaan pembenah tanah organik, selain untuk menanggulangi efek negatif penggunaan jangka panjang, juga untuk menjaga ketersediaan sumber energi organisme tanah dan pemeliharaan struktur tanah.

Fokus aplikasi bahan pembenah tersebut juga harus diperhatikan, misalnya kapur ditujukan untuk

peningkatan produktivitas lahan pada tanah masam, sedangkan zeolit lebih difokuskan pada tanah-tanah dengan KTK rendah. Sosialisasi, bimbingan dan penyuluhan pada petani perlu terus dilakukan, sehingga petani dapat memilih jenis dan mengaplikasikan bahan pembenah tanah secara tepat.

Penggunaan pembenah tanah sintetik (hasil rekayasa kimia) perlu dipertimbangkan dari segi dampak negatifnya terhadap lingkungan, baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Masalah harga bahan pembenah tanah sintetik yang umumnya relatif mahal juga harus menjadi bahan pertimbangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurachman, A. dan S. Sutono. 2005. Teknologi pengendalian erosi lahan berlereng. Hlm 103-145. *Dalam* Teknologi Pengelolaan Lahan Kering: Menuju Pertanian Produktif dan Ramah Lingkungan. Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Abdurachman, A., I. Juarsah, dan U. Kurnia. 2000. Pengaruh penggunaan berbagai jenis dan takaran pupuk kandang terhadap produktivitas tanah Ultisol terdegradasi di Desa Batin, Jambi. Hlm 303-319. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Tanah, Iklim, dan Pupuk. Buku II:303-319. Bogor 6-8 Desember 1999.
- Abdurachman, A. dan U. Kurnia. 1983. Pengaruh pupuk dan *soil conditioner* terhadap pertumbuhan jambu mete. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk*. 1:1-5. Pusat Penelitian Tanah. Bogor.
- Abdurachman, A. dan Suwardjo. 1979. Penelitian penggunaan *soil conditioner* dalam usaha penghijauan tanah Mediteran Jumantono (Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo). Bag. Konservasi Tanah dan Air. No. 01/KTA/1979. LPT. Bogor. (*unpublished*).
- Agus, F. 2000. Kontribusi bahan organik untuk meningkatkan produksi pangan pada lahan kering beriklim kering bereaksi masam. Hlm 87-104. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan: Buku III. Cisarua, Bogor, 18-19 Februari 1999.
- Alami, Y., W. Achouak, C. Marol, dan T. Heulin. 2000. Rhizosphere soil aggregation and plant growth promotion of sunflower by an exopolysaccharide-producing *Rhizobium* sp. strain isolated from sunflower roots. *Appl. Environ. Microbiol.* 66:3393-3398.
- Amellal N., G. Burtin., F. Bartoli, T. Heulin. 1998. Colonization of wheat roots by an exopolysaccharide producing *Pantoea agglomerans* strain and its effect on rhizosphere soil aggregation. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64:3740-3747.
- Arsyad, S. 2000. Konservasi Tanah dan Air. Lembaga Sumberdaya Informasi, Institut Pertanian Bogor. IPB Press. Bogor.
- Balittanah. 2011. Uji Efektivitas Soil Neutralizer. Laporan Akhir. Balai Penelitian Tanah. Bogor. (*unpublished*).
- Basri, I.H. dan Z. Zaini. 1992, Research at the upland farming system key site in Sitiung, Pp. 221-241. *In* Proceeding of Upland Rice-Based Farming Systems Research Planning Meeting, 18 April-1 May 1992, Chiangmay, Thailand, International Rice Research Institute, Manila, Philipines.
- Beare, M.H., M.L. Cabrera, P.F. Hendrik, dan D.C. Coleman. 1994. Aggregate protected and unprotected

- organic matter pool in conventional and no tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58:786-795.
- Bernas, S.M., J.M. Oades, dan G.J. Churchman. 1995. Effect of latex and poly-DADMAC on erosion, hydrophobicity and water retention on two different soils. *Aust. J. Soil Res.* 33:805-816.
- Bezzate, S., S. Aymerich, R. Chambert, S. Czarnes, O. Berge, dan T. Heulin. 2000. Disruption of *Paenibacillus polymyxa* levansucrase gene impairs its ability to aggregate soil in the wheat rhizosphere. *Environ. Microbiol.*, 2:333-342.
- Chenu, C. and E.B. Roberson. 1996. Diffusion of glucose in microbial extracellular polysaccharide as affected by water potential. *Soil Biol. Biochem.* 28:877-884.
- Dariah, A. dan N.L. Nurida. 2012. Penggunaan pembena tanah organik dan hayati untuk meningkatkan produktivitas lahan kering di Ciampea, Bogor. Hlm. 669-677. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Peran Teknologi untuk Mewujudkan Kedaulatan Pangan dan Peningkatan Ekonomi Rakyat. Yogyakarta 13 Nopember 2012. Fakultas Pertanian UPN Veteran Yogyakarta.
- Dariah, A. dan N.L. Nurida. 2011. Formula pembena tanah diperkaya senyawa humat untuk meningkatkan produktivitas tanah Ultisol Taman Bogo, Lampung. *Jurnal Tanah dan Iklim* (33):33-38.
- Dariah, A. dan A. Rachman. 1989. Pengaruh mulsa hijauan *alley cropping* dan pupuk kandang terhadap pertumbuhan dan hasil jagung serta beberapa sifat fisik tanah. Hlm 99-108. *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Bidang Konservasi Tanah dan Air. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Dierolf, T., T. Fairhurst, dan E. Mutert. 2001. Soil Fertility Kit: A Toolkit for Acid, Upland Soil Fertility Management in Southeast Asia. Oxford Graphic Printers.
- Emmerson, W.W. dan D.J. Greenland. 1990. Soil aggregates formation and stability. Pp. 485-512. *In* De Boodt M.F., Hayes M.H.D, Herbillon, A. (Eds.). *Soil Colloid and Their Association in Aggregates*. Newyork: Plenum Press.
- Erfandi, D., H. Swardjo, dan A. Rachman. 1988. Penelitian *alley cropping* di Kuamang Kuning, Jambi. Hlm. 105-110. *Dalam* Hasil Penelitian Pola Usahatani Terpadu di Daerah Transmigrasi Kuamang Kuning Jambi, Kerjasama Departemen Transmigrasi dengan Pusat Penelitian Tanah.
- Ginting, F. 1975. Pengaruh Tanaman, *Soil Conditioner* dan Lereng serta Sifat-Sifat Hujan terhadap Erosi. Tesis S-1. Jurusan Ilmu-Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor.
- Glaser, B., J. Lehmann, dan W. Zech. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal: A review. *Biol. Fert. Soils* 35:219-230.
- Hafif, B., J. Santoso, S. Adiningsih, dan Swardjo. 1993. Evaluasi cara pengelolaan tanah untuk reklamasi dan konservasi lahan terdegradasi. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* II:7-12.
- Haryati, U., A. Rachman, dan A. Abdurachman. 1991. Aplikasi mulsa *Flemingia* pada pola tanam jagung-kedelai-kacang tunggak pada tanah Ustortens Gondanglegi. Hlm.1-11 *Dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Lahan Kering dan Konservasi Tanah di Kabupaten Semarang dan Boyolali. P3HTA/UACP-FSR. Badan Litbang Pertanian.
- Hartatik, W., Septyana, dan H. Wibowo. 2012. Penelitian Pengembangan Teknologi Pengelolaan Lahan Sub-optimal di Lampung untuk Meningkatkan Produktivitas Kedelai. Laporan Akhir. Balai Penelitian Tanah. Bogor. (*unpublished*).
- Hartatik, W. dan J.S. Adiningsih. 1989. Perbandingan efektivitas dan pengaruh residu P-alam Tunisia pada tanah Podsolik Merah Kuning Rangkasbitung. Hlm. 125-137. *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Bogor, 22-24 Agustus 1989.
- Husaini. 2007. Karakteristik dan deposit pembena tanah zeolit di Indonesia. *Dipresentasikan* pada Semiloka Pembena Tanah Menghemat Pupuk, Mendukung Peningkatan Produksi Beras. Direktorat Jenderal Pengelolaan Lahan dan Air, Departemen Pertanian bekerjasama dengan Konsorsium Pembena Tanah Indonesia. Jakarta 5 April 2007.
- Ivanov, V. dan J. Chu. 2008. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil in situ. *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 7:139-153.
- Irianto, G., A. Adimihardja, dan I. Juarsah. 1993. Rehabilitasi tanah Tropudults tererosi dengan pertanaman lorong menggunakan tanaman pagar *Flemingi congesta*. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk*. II:13-18.
- 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.
- Kurnia, U. 1996. Kajian Metode Rehabilitasi Lahan untuk Meningkatkan dan Melestarikan Produktivitas Tanah. Disertasi Doktor, Program Pasca Sarjana IPB, Bogor (*unpublished*),
- Las, I., K. Subagyo, dan A.P. Setiyanto. 2006. Isu dan pengelolaan lingkungan dalam revitalisasi pertanian. *J. Lit. Pertanian.* 25(3):106-114.
- Lehmann, J., J.P. da Silva Jr., C. Steiner, T. Nehls, W. Zech, dan M. Glaser Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferrasol of The Central Amazon Basin: Fertilizer, manure and charcoal amendements. *Plant and Soil* 249:342-357.
- Lenvain, J.M. de Boodt, D. Mulyadi, dan A. Abdurachman. 1973^a. The use of hydrophobic bituminous emulsion on sandy soils. Pp 63-72. *In* Proc. The second ASEAN Soil Conference Vol II. Soil Research Institute. Bogor.
- Lenvain, J.M. de Boodt, D. Mulyadi, dan A. Abdurachman. 1973^b. Artificial structure formation and aggregation in Andosol. Pp 53-62. *In* Proc. The second ASEAN Soil Conference Vol II. Soil Research Institute. Bogor.
- LPT/Lembaga Penelitian Tanah. 1976. Laporan Penelitian dan Pengembangan Teknik Konservasi Tanah di Daerah eks-Gunung Merapi. LPT No. II/1976 (*unpublished*).
- LPT/Lembaga Penelitian Tanah. 1978. Laporan Penelitian dan Pengembangan Teknik Konservasi Tanah di Daerah eks-Gunung Merapi. LPT No. 2/1978 (*unpublished*).
- Lu, G.K. Sakagamu, H. Tanaka, dan R. Hamada. 1998. Role of organic matter in stabilization of stable aggregates in soil under different type of landuse. *Soil Sci. Plant Nutr.* 44 (2):147-155.
- Mario, M.D. dan S. Sabiham. 2002. Penggunaan tanah mineral yang diperkaya oleh bahan berkadar Fe tinggi

- sebagai amelioran dalam meningkatkan produksi dan stabilitas gambut. *J. Agrotekso* 2(1):35-45.
- Materchera, S.A., J. Kirby, A.M. Alston, dan A.R. Dexter. 1994. Modification of soil aggregation by watering regime and roots growing through beds of large aggregates. *Plant Soil*. 160:57-66.
- Nugroho dan Niswati. 1995. Efikasi pembenah tanah alami dan sintetik terhadap stabilitas agregat tanah lapisan atas dari empat lokasi di Lampung. *Jurnal Tanah Tropika* 1(1):8-15.
- Nurida, N.L. 2006. Peningkatan Kualitas Ultisol Jasinga Terdegradasi dengan Pengolahan Tanah dan Pemberian Bahan Organik. Disertasi Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor. (*unpublished*).
- Nurida, N.L. A. Rachman, dan Sutono. 2012. Potensi pembenah tanah biochar dalam pemulihan tanah terdegradasi dan peningkatan hasil jagung pada Typic Kanhapludults, Lampung. *Buana Sains*. 12(1):69-74.
- Nursyamsi, D., O. Sopandi, D. Erfandi, Sholeh, dan I.P.G. Widjaja-Adhi. 1995. Penggunaan pupuk organik, pupuk P dan K untuk meningkatkan produktivitas tanah Podsolik (*Typic Kandudults*). Hlm. 47-52 *Dalam* Risalah Seminar Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat, Nomor 2. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat.
- Oades, J.M. 1990. An introduction to organic matter in soils Pp. 89-159. *In* Dixon J.B. and Weed S.B. (*Eds.*). *Minerals in Soils Environments*. SSSAJ, Madison, Wisconsin, USA.
- Ogawa, M. 1994. Symbiosis of people and nature in tropics. *Farming Japan* 28(5):10-34.
- Ogawa, M. 2006. Carbon Sequestration by Carbonization of Biomass and Ferestation: Three Case Studies. Pp 133-146.
- Purnomo, P., Mulyadi, I. Amien, dan H. Suwardjo. 1992. Pengaruh berbagai bahan hijau tanaman kacang-kacangan terhadap produktivitas tanah rusak. *Pemberitaan. Penel. Tanah dan Pupuk* 10:61-65.
- Prihatini, T., Mursidi, dan A. Hamid. 1987. Pengaruh zeolit terhadap sifat tanah dan tanaman. *Pemberitaan Penel. Tanah dan Pupuk* 7:5-8.
- Rachman, A., A. Dariah, dan D. Santoso. 2006. Pupuk hijau. Hlm 41-58. *Dalam* Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor
- Rochayati, S. dan A. Dariah. 2012. Pengembangan lahan kering masam: Peluang, tantangan, strategi, serta teknologi pengelolaan. Hlm 164-186. *Dalam* Prospek Pertanian Lahan Kering dalam Mendukung Ketahanan Pangan. IAARD Press. Badan Litbang Pertanian. Jakarta.
- Sastiono, A. dan Suwardi. 1999. Pemanfaatan Zeolit Alam untuk Meningkatkan Kesuburan Tanah. *Disampaikan pada Seminar Pembuatan dan pemanfaatan Zeolit Agro untuk Meningkatkan Produksi Industri Pertanian, Tanaman Pangan dan Perkebunan*. Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jenderal Pertambangan Umum. Bandung, 23 Agustus 1999.
- Simanungkalit, R.D.M. 2006. Cendawan Micoriza Arbuskuler. Hlm 159-190. *Dalam* Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Situmorang, R. 1999. Pemanfaatan Bahan Organik Setempat, *Mucuna* sp., dan Fosfat Alam untuk Memperbaiki Sifat-Sifat Tanah Palehumults di Miramontanan, Sukabumi. Disertasi Pascasarjana. Institut Pertanian Bogor. (*unpublished*).
- Subiksa, I G.M., W. Hartatik, dan F. Agus. 2011. Pengelolaan gambut secara berkelanjutan. Hlm 73-88. *Dalam* Pengelolaan Gambut Berkelanjutan (*Eds.* Nurida *et al.*). Balai Penelitian Tanah, BBSDLP. Badan Litbang Pertanian. Bogor.
- Sudarsono. 1991. Pengaruh tiga cara pemberian jerami ke dalam tanah Renzina terhadap: (1) Komposisi bahan organik tanah, *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia* 1:79-84.
- 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 dan Agroklimat. 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 Pustlitanak, Bogor 3-5 Juni 1991. Sukristiyonubowo, Mulyadi, I G.P. Wigena, dan A. Kasno. 1993. Pengaruh penambahan bahan organik, kapur, dan pupuk NPK terhadap sifat kimia tanah dan hasil kacang tanah. *Pemberitaan Tanah dan Pupuk*. 11:1-6.
- Suresh dan Mody. 2009. *Microbial Exopolysaccharides: Variety and Potential Applications. Microbial Production of Biopolymers and Polymer Precursors*. Caister Academic Press. ISBN 978-1-904455-36-3.
- Suriadikarta, D.A. dan R.D.M Simanungkalit. 2006. Simanungkalit. Pendahuluan. Hlm 1-10. *Dalam* Pupuk Organik dan Pupuk Hayati. Balai Besar Sumberdaya Lahan Pertanian. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Bogor.
- Sutono dan Abdurachman. 1997. Pemanfaatan soil conditioner dalam upaya rehabilitasi lahan terdegradasi. Hlm 107-122. *Dalam* Prosiding Pertemuan Pembahasan dan Komunikasi Hasil Penelitian Tanah dan Agroklimat. Makalah Review. Cisarua, Bogor 4-6 Maret 1997. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bogor.
- Sutono dan F. Agus, 1999. Pengaruh pembenah tanah terhadap hasil kedelai di Cibugel, Sumedang. Hlm 379-386. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Sumberdaya Lahan. Cisarua-Bogor, 9-11 Februari 1999.
- Suwardi. 2007. Pemanfaatan zeolit untuk perbaikan sifat-sifat tanah dan peningkatan produksi Pertanian. *Dipresentasikan pada Semiloka Pembenah Tanah Menghemat Pupuk, Mendukung Peningkatan Produksi Beras*. Direktorat Jenderal Pengelolaan Lahan dan Air, Departemen Pertanian Bekerjasama dengan Konsorsium Pembenah Tanah Indonesia. Jakarta, 5 April 2007.
- Suwardjo, A. Adimihardja, dan S. Abujamin. 1989. The use of crop residue mulch to minimize tillage frequency. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk* 8:31-37.
- Suwardjo, S. Sukmana, A. Adimihardja, dan A. Barus. 1973. Evaluation on the result of study on the application of synthetic soil conditioner on several soils in Indonesia Soil Research Institute. Bogor. (*unpublished*).
- Utomo, W.H., S.M. Sitompul, dan M. Van Noordwijk. 1992. Effects of leguminous cover crops on subsequent maize and soybean crops on an Ultisol in Lampung. *Agrivita* 15:39-44.
- Zhang, H., K.H. Hartage, dan H. Ringe. 1997. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compacity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:239-245.