

Peningkatan Kualitas Lahan Bekas Tambang melalui Revegetasi dan Kesesuaiannya Sebagai Lahan Pertanian Tanaman Pangan

Bandi Hermawan

Program Studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian
Universitas Bengkulu

ABSTRAK

Penelitian bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan beberapa variabel kualitas tanah pada lahan bekas tambang batubara pasca reklamasi dan kesesuaiannya untuk dimanfaatkan menjadi lahan pertanian. Contoh tanah utuh dan terganggu diambil dari lahan bekas tambang PT. Bukit Asam (Persero) Tbk., Tanjung Enim, Sumatera Selatan yang telah direvegetasi masing-masing pada kedalaman 0-10 dan 0-20 cm. Pengambilan contoh tanah dilakukan di lokasi yang sama pada tahun 2006 dan 2010 ketika vegetasi berumur 8 dan 12 tahun. Contoh tanah utuh digunakan untuk analisis sifat-sifat fisik sedangkan contoh tanah terganggu untuk analisis sifat-sifat kimia tanah. Data fisik dan kimia tanah dianalisis secara deskriptif, lalu dibandingkan dengan interval nilai yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman pangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua variabel fisik tanah (tekstur, berat volume, porositas total, kadar air dan resistensi penetrasi) dan variabel kimia tanah (pH, karbon organik, unsur hara, kation dapat ditukar, dan kapasitas tukar kation) telah meningkat ke level yang sesuai untuk tanaman pangan setelah direklamasi selama 12 tahun. Beberapa variabel kualitas tanah untuk tanaman pangan meningkat dari kategori sangat rendah menjadi rendah ketika umur vegetasi reklamasi bertambah dari 8 menjadi 12 tahun. Tindakan pengelolaan lahan bekas tambang yang harus dilakukan apabila digunakan untuk pertanian adalah pengolahan tanah, pengapuran dan pemupukan terutama fosfor.

Keywords : *revegetasi, kualitas, lahan tambang, pangan*

PENDAHULUAN

Kebutuhan pangan terus meningkat sementara ketersediaan lahan semakin menurun dengan adanya alih fungsi lahan pertanian untuk kegiatan-kegiatan di luar pertanian. Guna mengatasi permasalahan tersebut maka minimal ada dua hal yang harus dilakukan: pertama adalah mengendalikan alih fungsi lahan pertanian, dan ke dua adalah meningkatkan kualitas lahan kritis agar dapat kembali berfungsi sebagai lahan pertanian. Alternatif ke dua harus digalakkan untuk mengantisipasi kegagalan dalam mengendalikan alih fungsi lahan pertanian untuk kegiatan di luar pertanian.

Salah satu lahan kritis yang berpotensi untuk dialihfungsikan menjadi lahan pertanian adalah lahan bekas tambang batubara. Lahan bekas tambang batubara biasanya memiliki tingkat kepadatan yang tinggi dan kurang subur dikarenakan adanya bahan-bahan timbunan yang berasal dari lapisan bawah tanah, baik horizon C maupun bahan induk tanah. Lalu lintas alat-alat berat selama proses penambangan dan penimbunan juga berperan penting dalam menghasilkan lapisan tanah permukaan yang padat dan terjadinya penutupan pori-pori tanah (*surface sealing and crusting*) (Hermawan, 2002). Dalam kondisi yang demikian, sebagian besar tanaman pangan tidak mampu tumbuh baik karena terbatasnya penetrasi akar ke dalam tanah untuk mendapatkan air dan nutrisi. Air infiltrasi seperti curah hujan dan irigasi menjadi sulit menembus permukaan tanah dengan adanya penutupan pori tersebut. Perkecambahan benih tanaman juga menjadi terhambat pada tanah-tanah di lahan bekas tambang akibat pembentukan kerak (*crust formation*) dan peningkatan kekuatan tanah ketika tanah menjadi kering (Whitemore *et al.*, 2011).

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 76 Tahun 2008 tentang Rehabilitasi dan Reklamasi Hutan mengharuskan setiap perusahaan tambang untuk melakukan revegetasi pada lahan-lahan kritis bekas tambang. Tindakan revegetasi tersebut dilakukan dengan menanam vegetasi reklamasi pada lokasi-lokasi yang sudah selesai ditambang meskipun aktivitas pertambangan secara keseluruhan masih berjalan. Tujuan dari reklamasi tersebut adalah untuk meningkatkan produktivitas lahan bekas tambang antara lain dengan dialihfungsikan untuk produksi tanaman pertanian. Apabila izin usaha penambangan diberikan kepada perusahaan Badan Usaha Milik Negara, maka perusahaan diwajibkan untuk mencadangkan sebagian lahan bekas tambang yang telah direklamasi tersebut untuk mendukung ketahanan pangan.

Taylor *et al.* (2010) merangkum variabel kualitas tanah yang perubahannya berpengaruh secara signifikan terhadap pertumbuhan tanaman. Variabel tersebut antara lain adalah pH, nitrogen total, fosfor tersedia, serta kalium, kalsium, besi dan aluminium dapat ditukar. Dengan demikian, variabel tersebut harus dipertimbangkan dalam mengevaluasi peningkatan kualitas tanah bekas tambang dalam rangka pencadangan lahan untuk pertanian tanaman pangan. Selain itu, tekstur dan karbon organik tanah

merupakan variabel lain yang harus dievaluasi karena keduanya sangat menentukan kebutuhan dan efisiensi penambahan unsur hara melalui pemupukan (Hermawan *et al.*, 2000).

Proses alihfungsi lahan bekas tambang menjadi lahan pertanian tanaman pangan membutuhkan tiga tahapan reklamasi. Ketiga tahapan reklamasi tersebut adalah sebagai berikut: (i) pemulihan fungsi lahan yang telah kritis dan rusak, antara lain melalui penanaman vegetasi reklamasi, (ii) peningkatan fungsi lahan kritis dan lahan rusak yang sudah dipulihkan agar menjadi lahan yang produktif, termasuk untuk produksi tanaman pangan, dan (iii) pemeliharaan fungsi lahan yang fungsinya telah dipulihkan dan ditingkatkan tersebut agar tidak kembali menjadi lahan kritis dan lahan rusak. Berdasarkan uraian di atas, maka penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi peningkatan beberapa variabel kualitas tanah pada lahan bekas tambang batubara pasca reklamasi agar sesuai untuk alih fungsi menjadi lahan pertanian tanaman pangan.

METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

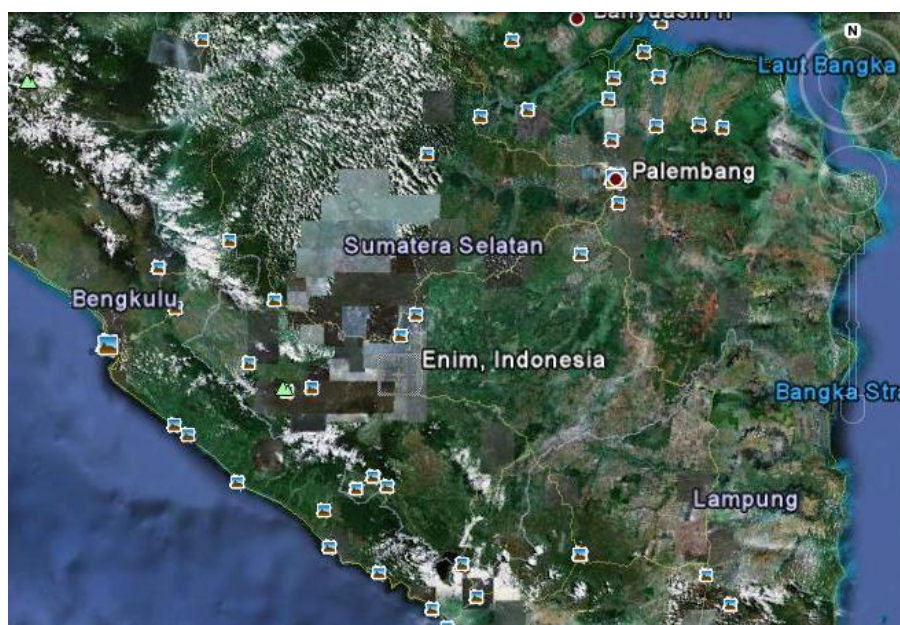
Penelitian dilaksanakan di lahan tambang batubara milik PT. Bukit Asam (Persero) Tbk., di Kota Tanjung Enim, Provinsi Sumatera Selatan, sekitar 220 km dari Kota Palembang dan 280 km dari Kota Bengkulu (Gambar 1). Proses penimbunan pada lahan bekas tambang dilakukan secara bertahap dan membentuk sistem teras. Penelitian dilaksanakan dua kali, masing-masing pada tahun 2006 dan 2010. Lokasi penelitian adalah lahan timbunan bekas tambang batubara yang telah direklamasi dengan berbagai jenis vegetasi sejak tahun 1998, sehingga vegetasi tersebut telah berumur 8 tahun ketika diteliti tahun 2006 dan 12 tahun ketika contoh tanah diambil pada tahun 2010.

Sampling dan Analisis Data

Penelitian ini dilaksanakan menggunakan metode deskriptif analitik pada lahan bekas tambang yang telah ditanami vegetasi reklamasi (sengon, akasia, kayu putih dan vegetasi yang tumbuh alami). Contoh tanah utuh diambil pada kedalaman 0-10 cm dengan menggunakan silinder sampling

(*core samplers*), lalu ditutup pada kedua sisinya agar air di dalam sampel tidak mengalami penguapan selama disimpan. Pada saat bersamaan, resistensi penetrasi tanah, yakni suatu variabel yang menggambarkan besarnya hambatan penetrasi akar ke dalam tanah, diukur pada kedalaman 0-10 cm dengan menggunakan *hand penetrometer*. Contoh tanah utuh digunakan untuk menganalisis berat volume, porositas total, dan kadar air tanah pada kondisi lapangan.

Contoh tanah terganggu diambil pada kedalaman 0-20 cm, dimasukkan ke dalam kantong plastik, lalu dikeringanginkan di laboratorium. Tanah kering angin selanjutnya ditumbuk dan diayak dengan ayakan bermata saring 2 mm. Contoh tanah berukuran 0-2 mm ini digunakan untuk menganalisis pH (H_2O dan KCl), karbon organik, nitrogen total, fosfor tersedia, kalium dapat ditukar, kalsium dapat ditukar, magnesium dapat ditukar, dan kapasitas tukar kation.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data dianalisis secara deskriptif untuk mendapatkan interval variabel kualitas tanah timbunan bekas tambang pada setiap umur vegetasi reklamasi. Interval variabel tersebut selanjutnya dibandingkan dengan kebutuhan

tanaman pangan berdasarkan beberapa hasil penelitian. Berdasarkan perbandingan tersebut maka dinilai apakah kualitas lahan bekas tambang sudah meningkat dan sesuai untuk dialihfungsikan menjadi lahan pertanian tanaman pangan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kualitas Fisik Tanah

Peningkatan kualitas fisik tanah pada lahan bekas tambang yang telah direvegetasi selama 8 dan 12 tahun disajikan pada Tabel 1. Tekstur tanah bekas tambang termasuk kelas lempung berpasir (*sandy loam*) dengan kandungan pasir 55-59%, debu 24-27% dan liat 17-19%. Distribusi ukuran partikel tanah yang demikian sudah memenuhi persyaratan untuk lahan pertanian tanaman pangan yang mensyaratkan kisaran tekstur antara liat sampai lempung berpasir (Djaenuddin *et al.*, 1994). Dalam hubungannya dengan pertanian tanaman pangan, tekstur tanah berpengaruh terhadap kemudahan dalam pengolahan tanah, ketersediaan air bagi tanaman, dan penentuan kebutuhan nitrogen bagi tanaman. Tanah yang bertekstur pasir, misalnya, mudah diolah namun kurang mampu menyediakan air bagi tanaman, kondisi sebaliknya terjadi pada tanah bertekstur liat (Hermawan, 2002). Dalam hubungannya dengan kebutuhan nitrogen, tanah dengan kandungan pasir kurang dari 65% membutuhkan nitrogen antara 100 sampai 200 kg/ha (Hermawan *et al.*, 2000), sedangkan apabila kandungan pasir diatas 70% maka nitrogen yang dibutuhkan lebih dari 200 kg/ha (Wu *et al.*, 2010).

Berat volume, porositas total dan resistensi penetrasi merupakan tiga variabel yang berhubungan dengan kepadatan tanah. Hasil penelitian pada Tabel 1 menunjukkan bahwa tingkat kepadatan tanah pada lahan bekas tambang batubara yang telah direklamasi selama 12 tahun relatif sesuai untuk pertumbuhan tanaman pangan. Tingkat kepadatan tanah bekas tambang tersebut lebih rendah dibandingkan ketika vegetasi reklamasi baru berumur 8 tahun. Hal ini menunjukkan bahwa pertumbuhan vegetasi reklamasi berdampak positif dalam menurunkan kepadatan tanah sehingga sesuai untuk pertumbuhan tanaman pangan. Meskipun demikian, tindakan pengolahan tanah tetap harus dilakukan ketika lahan bekas tambang

dialihfungsikan menjadi lahan pertanian tanaman pangan karena setiap jenis tanaman memiliki respon yang berbeda terhadap kepadatan (Batey, 2009).

Air tanah yang tersedia bagi sebagian besar tanaman adalah air yang tersisa di dalam ruang pori setelah dihisap atau ditekan keluar dari dalam tanah dengan gaya sebesar 0,1 sampai 15 bar. Kadar air tanah yang diteliti ketika pengukuran di lapangan adalah 36 sampai 38%, dan setelah mengalami proses evaporasi selama 5 dan 11 hari maka kadar air tanah pada kedua waktu tersebut turun masing-masing menjadi 26 sampai 27% dan 12 sampai 13%. Untuk tanah bertekstur lempung berpasir, ketiga kisaran kadar air tersebut setara dengan tekanan sebesar masing-masing 0,1, 10 dan 100 bar. Dengan demikian, air yang tersisa di dalam tanah setelah menerima tekanan antara 0,1 sampai 100 bar, sebagaimana ditemui pada lahan yang diteliti, masih termasuk kategori air tersedia bagi tanaman termasuk tanaman pangan.

Kualitas Kimia Tanah

Peningkatan kualitas kimia tanah pada lahan bekas tambang setelah direklamasi selama 8 dan 12 tahun disajikan pada Tabel 2. Derajat kemasaman tanah sudah berada pada kisaran yang sesuai untuk tanaman pangan, dimana pH berkisar antara 4,3 sampai 4,5 untuk umur vegetasi 8 tahun dan 4,2 sampai 4,3 untuk umur vegetasi 12 tahun. Padi sawah dan padi gogo dapat tumbuh baik pada kisaran pH 4,0 sampai 8,5 meskipun pertumbuhan optimum akan dicapai pada kisaran pH 5,0 sampai 8,0, sementara jenis tanaman pangan non-padi menghendaki kisaran pH 4,5 sampai 8,5 (Djaenuddin *et al.*, 1994; Islami dan Utomo, 1995). Dengan demikian, lahan bekas tambang yang diteliti baru memiliki tingkat kemasaman tanah yang sesuai untuk tanaman padi. Pemberian kapur mutlak dilakukan untuk menurunkan derajat kemasaman agar lahan tersebut dapat digunakan untuk jenis tanaman pangan selain padi.

Kandungan karbon organik (C-organik) tanah pada lahan yang telah direklamasi selama 8 dan 12 tahun sudah meningkat ke level yang sesuai untuk tanaman pangan (diatas 0,8%). Meskipun demikian, tanah akan rentan terhadap pemadatan karena memiliki struktur yang tidak stabil apabila kandungan C-organik kurang dari 2% (Hermawan, 1995). Selain itu, tanaman pangan akan tumbuh secara optimum apabila kandungan karbon

organik berada diatas 5% (Taylor *et al.*, 2010). Penambahan bahan organik tetap harus dilakukan apabila lahan bekas tambang yang diteliti akan dialihfungsikan menjadi lahan pertanian tanaman pangan.

Tabel 1. Kesesuaian variabel fisik tanah pada lahan timbunan bekas tambang yang telah direvegetasi selama 8 dan 12 tahun untuk tanaman pangan.

Variabel	Umur Vegetasi Reklamasi		Sesuai untuk Tanaman Pangan	
	8 Tahun	12 Tahun		
Tekstur	Lempung berpasir	Lempung berpasir	Liat - lempung berpasir**	S3
Pasir (%)	55-59	55-59	10-70*	
Debu (%)	24-27	24-27	10-70*	
Liat (%)	17-19	17-19	15-90*	
Berat volume (g/cm ³)	1,23-1,36	1,20-1,24	<1,35*	S2
Porositas total (%)	37-42	48-50	>40*	S1
Resistensi terhadap penetrasi (MPa)	2,25-3,05	2,17-2,80	<2,50*	S3
Kadar air pada kondisi lapangan (%), tersedia setara tekanan tertentu (bar)	-	36-38 (setara 0,1 bar)	Setara tekanan 0,1-15 bar***	S1
Kadar air pada hari ke-5 penguapan (%), tersedia setara tekanan tertentu (bar)	-	26-27 (setara 1,0 bar)	Setara tekanan 0,1-15 bar***	S1
Kadar air pada hari ke-11 penguapan (%), tersedia setara tekanan tertentu (bar)	-	12-13 (setara 10 bar)	Setara tekanan 0,1-15 bar***	S1

Keterangan: *Hermawan (2002); **Djaenuddin *et al.* (1994); ***Islami dan Utomo (1995).
S1 = sangat sesuai; S2 = cukup sesuai; S3 = sesuai marjinal.

Kandungan nitrogen, fosfor dan kalium pada lahan bekas tambang masih tergolong sangat rendah sampai rendah meskipun sudah dinyatakan sesuai untuk budidaya tanaman pangan. Pemberian pupuk nitrogen, fosfor dan kalium sangat direkomendasikan mengingat tanaman pangan membutuhkan ketiga unsur hara tersebut dalam jumlah yang besar.

Tanaman padi, misalnya, dapat menyerap kalium sebesar 65 kg/ha ketika panen meskipun tidak dilakukan penambahan kalium ke dalam tanah melalui pemupukan (Maschmann *et al.*, 2010). Penambahan pupuk yang mengandung kation juga direkomendasikan pada lahan yang diteliti karena kemampuan tanah dalam menukar kation berada dalam level sangat rendah sampai rendah, seperti diperlihatkan oleh kapasitas tukar kation, kalsium dapat ditukar, dan magnesium dapat ditukar.

Tabel 2. Kesesuaian variabel kimia tanah pada lahan timbunan bekas tambang yang telah direvegetasi selama 8 dan 12 tahun untuk tanaman pangan.

Variabel	Umur Vegetasi Reklamasi		Sesuai untuk tanaman Pangan	
	8 Tahun	12 Tahun		
pH (H ₂ O)	4,3-4,5	4,2-4,3	4,0-8,5* (padi)	S3
			4,5-8,5* (non-padi)	N1
pH (KCl)	-	3,6-3,7	-	
C-organik (%)	2,34-2,97	1,94-2,31	>0,8*	S1
N-total (%)	0,09-0,15	0,17-0,21	<0,10-≥0,50*	S2
P-tersedia (ppm)	2,52-7,84	4,71-7,45	<10-≥60*	S3
K-dapat ditukar (me/100 g)	0,13-0,18	0,13-0,24	<0,1-≥0,5*	S2
Ca-dapat ditukar (me/100 g)	-	1,44-1,57	<2-≥20	S2
Mg-dapat ditukar (me/100 g)	-	0,21-0,68	<0,4-≥8,0	S2
Al-dapat ditukar (me/100 g)	-	3,49-3,82	-	
H-dapat ditukar (me/100 g)	-	1,10-1,27	-	
Kapasitas tukar kation (me/100 g)	-	9,75-11,37	<5-≥24	S2

Keterangan: *Djaenuddin *et al.* (1994) S1 = sangat sesuai; S2 = cukup sesuai; S3 = sesuai marjinal; N1 = tidak sesuai.

Alternatif lain adalah menanam jenis tanaman pangan yang efisien terhadap unsur hara (Weih *et al.*, 2011), seperti jenis-jenis tanaman yang adaptif terhadap kemasaman tanah yang tinggi dan kandungan fosfor yang rendah.

Tindakan Pengelolaan untuk Lahan Pertanian

Berdasarkan uraian di atas maka dapat disimpulkan bahwa kualitas lahan bekas tambang batubara yang telah direklamasi selama 12 tahun telah meningkat hingga ke level yang sesuai untuk dimanfaatkan menjadi lahan pertanian tanaman pangan. Meskipun demikian, lahan tersebut belum sepenuhnya mencapai tingkat kesesuaian yang sempurna, karena beberapa variabel masih dalam kondisi marjinal dan memerlukan perhatian tersendiri. Variabel-variabel yang harus diperhatikan apabila lahan bekas tambang akan dialihfungsikan menjadi lahan pertanian adalah kepadatan tanah, kemasaman tanah (pH), dan ketersediaan unsur hara fosfor. Kepadatan tanah, yang dalam penelitian ini diperlihatkan oleh nilai resistensi penetrasi, berpengaruh terhadap laju pertumbuhan akar tanaman dan pergerakan air di dalam tanah. Masih tingginya nilai resistensi penetrasi pada lahan bekas tambang dapat menghambat pertumbuhan tanaman pertanian apabila tidak dilakukan tindakan pengelolaan yang tepat. Sementara kemasaman tanah yang masih relatif tinggi dan kandungan fosfor yang rendah perlu diatasi agar faktor-faktor pendukung pertumbuhan tanaman yang lain dapat bekerja secara optimal.

Tanah pada lahan bekas tambang memerlukan tindakan pengolahan secara intensif, terutama ketika baru pertama kali diusahakan untuk tanaman pertanian. Tindakan diperlukan untuk menghilangkan kepadatan tanah yang belum sepenuhnya teratasi melalui penanaman vegetasi reklamasi. Mengingat lahan yang diteliti memiliki kandungan pasir yang cukup tinggi (di atas 50%), dalam jangka panjang tindakan pengolahan tanah intensif tersebut dapat dikombinasi dengan teknik-teknik pengolahan tanah konservasi seperti olah tanah minimum dan tanpa olah tanah. Pengurangan intensitas pengolahan dapat dilakukan pada tanah-tanah berpasir karena proses pemadatan pada jenis tanah tersebut lebih lambat dibandingkan pada tanah-tanah bertekstur halus.

Pemberian kapur pertanian dan penambahan pupuk fosfor harus dilakukan pada lahan bekas tambang yang akan dimanfaatkan untuk lahan pertanian tanaman pangan. Dosis dan jenis bahan kapur dan pupuk yang digunakan dapat disesuaikan dengan ketersediaan yang ada serta dengan jenis komoditas yang diusahakan. Meskipun kandungan nitrogen dan kalium

berada pada harkat yang lebih tinggi dibandingkan fosfor, penambahan kedua unsur tersebut juga dibutuhkan untuk menjaga keseimbangan hara di dalam tanah setelah sebagian terangkut oleh tanaman pada saat panen. Pengembalian sisa-sisa tanaman ke dalam tanah dapat mengembalikan unsur hara dan mengurangi jumlah pupuk yang diberikan.

KESIMPULAN

Semua variabel kualitas fisik dan kimia tanah pada lahan bekas tambang batubara meningkat ke level yang sesuai untuk pertanian tanaman pangan setelah ditanami vegetasi reklamasi selama 12 tahun, kecuali pH yang baru sesuai untuk padi. Porositas total, kadar air ketika tanah pada kondisi lapangan hingga setelah mengalami evaporasi selama 11 hari, dan kandungan organik karbon meningkat ke level yang ‘sangat sesuai’; berat volume, nitrogen total, kation-kation dapat ditukar, dan kapasitas tukar kation meningkat ke level yang ‘cukup sesuai’; sedangkan tekstur, resistensi penetrasi, pH untuk padi, dan fosfor tersedia berada pada kategori ‘sesuai marginal’ untuk tanaman pangan. Berat volume, resistensi penetrasi dan nitrogen total meningkat satu level kesesuaian ketika umur vegetasi bertambah dari 8 tahun menjadi 12 tahun.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini sebagian dibiayai oleh PT. Bukit Asam (Persero) Tbk., melalui kerjasama dengan Fakultas Pertanian Universitas Bengkulu. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Sdr. Sukisno, Fetty Meladiana, Eka Oktariana (Universitas Bengkulu) dan Suryadi (PT. Bukit Asam) yang telah membantu pengambilan contoh tanah, serta kepada Sdr. Mansyur dan Suroto untuk bantuan analisis di laboratorium.

DAFTAR PUSTAKA

- Batey, T., 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management* 25: 335–34.
- Djaenuddin, D., Basuni, S. Hardjowigeno, H. Subagyo, M. Sukardi, dan Ismangun, 1994. Kesesuaian Lahan untuk Tanaman Pertanian dan Tanaman Kehutanan. Laporan Teknis Nomor 7, Centre for Soil and Agroclimate Research, Bogor.

- Hermawan, B., 2002. Buku Ajar Dasar-dasar Fisika Tanah. Lemlit Unib Press, Bengkulu.
- Hermawan, B., 1995. Soil Structure Associated with Cover Crops and Grass Leys in Degraded Lowland Soils of Delta. Ph.D. Thesis.
- Hermawan, B., Hasanudin, B. Saleh dan S.S.M. Rambe, 2000. Kajian Kebutuhan Pupuk dan Air Spesifik Lokasi pada Daerah Irigasi di Propinsi Bengkulu. Laporan Kerjasama Instalasi Penelitian dan Pengkajian Teknologi Pertanian (IP2TP) Bengkulu dengan Lembaga Penelitian Universitas Bengkulu.
- Islami, T. dan W.H. Utomo, 1995. Hubungan Tanah, Air dan Tanaman. IKIP Semarang Press.
- Maschmann, E.T., N.A. Slaton, R.D. Cartwright, and R.J. Norman, 2010. Rate and Timing of Potassium Fertilization and Fungicide Influence Rice Yield and Stem Rot. *Agron. J.* 102: 163–170.
- Taylor, M.D., N.D. Kim, R.B. Hill, and R. Chapman, 2010. A review of soil quality indicators and five key issues after 12 yr soil quality monitoring in the Waikato region. *Soil Use and Management* 26: 212–224.
- Weih, M., L. Asplund, and G. Bergkvist, 2011. Assessment of nutrient use in annual and perennial crops: A functional concept for analyzing nitrogen use efficiency. *Plant Soil* 339: 513-520.
- Whitmore, A.P., W.R. Whalley, N.R.A. Bird, C.W. Watts, and A.S. Gregory, 2011. Estimating soil strength in the rooting zone of wheat. *Plant Soil* 339: 363–375.
- Wu, L., R. Green, G. Klein, J.S. Hartin, and D.W. Burger, 2010. Nitrogen Source and Rate Influence on Tall Fescue Quality and Nitrate Leaching in a Southern California Lawn. *Agron. J.* 102: 31–38.