

PENAMBANGAN SISTEM TERBUKA RAMAH LINGKUNGAN DAN UPAYA REKLAMASI PASCA TAMBANG UNTUK MEMPERBAIKI KUALITAS SUMBERDAYA LAHAN DAN HAYATI TANAH

Environment Friendly Open Pit Mining Systems and Reclamation Post-Mining Efforts to Improve the Quality of Land Resources and Soil Biodiversity

Subowo G.

Balai Penelitian Tanah, Jl. Ir. H. Juanda 98, Bogor 16123

ABSTRAK

Penambangan sistem terbuka konvensional banyak mengubah bentang lahan dan keseimbangan ekosistem permukaan tanah, menurunkan produktivitas tanah dan mutu lingkungan. Di lain pihak kegiatan penambangan yang baik dapat mendatangkan devisa, menekan pencemaran, menurunkan kemiringan lahan, memperbaiki ketebalan tanah lapisan atas, menurunkan kepadatan tanah, meningkatkan *infiltrasi-perkolasi* dan mengurangi erosi tanah. Pengendalian pelaksanaan penambangan terbuka dengan berorientasi pada pelestarian sumberdaya lahan dan hayati tanah dapat diupayakan dengan: (1) penambangan dilakukan secara blok, dimulai dari lereng paling bawah, (2) reklamasi/penimbunan lahan dilakukan secara langsung setelah selesai penambangan, (3) bentukan permukaan lahan dengan terasering dengan lebar bangku teras datar > 5 m, beda tinggi antar bangku teras < 2 m, kemiringan tebing $\pm 60\%$, (4) kupasan tanah lapisan pucuk (*topsoil*) ditempatkan kembali pada lapisan atas dengan ketebalan > 20 cm dan diperkaya dengan kapur, pupuk organik, pupuk anorganik ataupun pupuk hayati (5) biorehabilitasi dengan cacing tanah *endogaesis* dan penanaman legum sebagai tanaman pionir untuk mempercepat terciptanya suksesi alami, dan (6) pemeliharaan tanaman sampai mencapai klimaks ekosistem sesuai yang diharapkan.

Kata kunci : Penambangan terbuka, pelestarian, sumberdaya lahan, hayati tanah

ABSTRACT

Conventional open pit mining systems can changing the landscape and soil surface ecosystem balance, reducing soil productivity and environmental quality. On the other hand the good mining activities can increase national income, reduce pollution, decrease land slope, improve the thickness of topsoil, decrease soil density, increase infiltration- percolation and reduce soil erosion. Good implementation control of the open pit mining with the preservation of land resources and soil biodiversity can be achieved by: (1) mining blocks done from the bottom area, (2) reclamation carried out directly after the completion of mining, (3) formation of land surface with a wide terrace bench >5 m, vertical-interval bench terraces <2 m, the percentage of slope $\pm 60\%$, (4) removing the top layer of soil (*topsoil*) was placed back on the top layer with a thickness >20 cm and enriched with lime, organic matter, fertilizer or biofertilizer (5) biorehabilitation with endogeic earthworms and planting of legume cover crops as pioneer plants to accelerate the natural succession, and (6) maintenance up to a climax ecosystem as expected.

Keywords : Open pit mining, conservation, land resources, soil biodiversity

Pemerintah gencar menggali potensi perolehan devisa dari sektor pertambangan sebagai akibat semakin terbatasnya kemampuan negara untuk memperoleh pendapatan dari sektor lainnya. Deposit bahan galian (bahan mineral, batubara, bahan fosil, dan lain-lain) banyak tersebar diberbagai daerah dengan berbagai jenis dan kapasitas, potensial untuk dapat dimanfaatkan sebesar-besarnya untuk menopang kebutuhan negara. Hal ini penting karena Indonesia berada di kawasan vulkanik tropika basah dengan zone penunjaman (*subduction zone*) yang membujur di pantai

barat, pantai selatan dan pantai utara bagian timur, sehingga memiliki erupsi indeks >99% (Munir, 1996). Laju pasokan mineral berlangsung intensif, sehingga Indonesia banyak memiliki deposit mineral bahan tambang. Di lain pihak laju pelapukan mineral juga berlangsung intensif, sehingga apabila tidak segera ditambang/ dimanfaatkan sebagai bahan baku industri, deposit bahan mineral ini akan cepat mengalami pelapukan/kerusakan dan apabila dibiarkan akan hilang terbawa aliran air yang dapat mencemari lingkungan.

Sejalan dengan umur dan proses deposit bahan tambang, posisi timbunan bahan tambang dapat berada di lapisan dalam, dekat permukaan ataupun terbuka di permukaan tanah. Tertimbunnya bahan tambang oleh tanah penutup dapat terjadi sebagai hasil pelapukan bahan tambang itu sendiri sebagai bahan induk pembentuk tanah. Akibatnya tanah penutup bagian atas (tanah pucuk) yang telah mengalami pelapukan lanjut memiliki kesuburan fisik, kimia dan biologi lebih baik dibanding tanah penutup bagian di bawahnya (*overburden/subsoil*) yang belum mengalami pelapukan lanjut. Untuk penambangan yang berada di permukaan tanah atau dekat permukaan pada umumnya dilakukan dengan sistem penambangan terbuka dengan mengupas tanah penutup di atasnya. Sementara penambangan yang berada di lapisan dalam dilakukan dengan penambangan dalam (*under-ground mining*) dengan sistem pengeboran ataupun membuat terowongan bawah tanah, sehingga tidak banyak mengganggu kondisi permukaan lahan.

Sistem penambangan terbuka yang berada di permukaan tanah banyak mengubah bentang lahan dan keseimbangan ekosistem permukaan tanah, maka berdasarkan UU No.41/1999, Pasal 38, Ayat 4, sistem penambangan terbuka ini dilarang dilakukan di kawasan hutan lindung. Hermawan *et al.* (2009) menyatakan bahwa kegiatan penambangan timah di Provinsi Bangka-Belitung yang dilakukan dengan cara terbuka telah menimbulkan perubahan lingkungan dengan menurunkan produktivitas tanah dan mutu lingkungan. Di lain pihak kolong-kolong air akibat kegiatan penambangan timah terbuka di Perlang, Bangka-Belitung dapat dimanfaatkan sebagai kantong sumber air irigasi untuk pencetakan sawah baru disekitarnya (Subardja *et al.*, 2010).

Perubahan lingkungan pasca penambangan yang terjadi, selain perubahan bentang lahan juga kualitas tanah hasil penimbunan setelah penambangan. Struktur tanah penutup rusak sebagai mana sebelumnya, juga tanah lapisan atas bercampur ataupun terbenam di lapisan dalam. Tanah bagian atas digantikan tanah dari

lapisan bawah yang kurang subur, sebaliknya tanah lapisan atas yang subur berada di lapisan bawah. Demikian juga populasi hayati tanah yang ada di tanah lapisan atas menjadi terbenam, sehingga hilang/mati dan tidak berfungsi sebagaimana mestinya. Daya dukung tanah lapisan atas pasca penambangan untuk pertumbuhan tanaman menjadi rendah. Hidayati (2000) melaporkan bahwa tanah lapisan atas hasil reklamasi penambangan emas rakyat secara terbuka di Jampang, Sukabumi terjadi penurunan status hara tanah, populasi mikroba dan serangga penyubur tanah, serta merubah iklim mikro menjadi kurang baik untuk organisme hidup. Dariah *et al.* (2010) menyatakan bahwa umumnya perencanaan penutupan tambang (termasuk reklamasinya) tidak terintegrasi dengan operasi pertambangan sejak awal sampai penutupan, sehingga pasca penambangan timbul berbagai masalah. Untuk itu penanganan kegiatan penambangan sistem terbuka hendaknya dilakukan secara terintegrasi dengan tetap menjaga kelestarian nilai fungsi lahan untuk kepentingan selanjutnya serta murah dalam pelaksanaannya.

KEGIATAN PENAMBANGAN SISTEM TERBUKA KONVENSIONAL

Penambangan dengan sistem tambang terbuka (*open pit mining*) dilakukan dengan cara pengupasan tanah penutup bahan tambang. Tanah penutup dikeluarkan dari areal tambang dan bahan tambang digali dan diangkut keluar. Setelah seluruh bahan tambang dikeluarkan, maka terjadi sisa lubang-lubang galian berupa kolong-kolong. Pada perusahaan yang memiliki izin kuasa penambangan (KP), kolong-kolong lubang galian ini ditimbun kembali dengan tanah yang diambil dari tanah sekitar ataupun dari tanah penutup sebelumnya. Apabila penutupan kembali ini dilakukan kurang tepat, maka tanah lapisan atas yang memiliki kesuburan tinggi bercampur dengan tanah lainnya atau tertimbun di bagian bawah. Sebaliknya tanah lapisan bawah (*subsoil*) yang belum mengalami perkembangan (tidak subur) justru berada di lapisan atas. Daya dukung tanah bekas sistem

penambangan terbuka konvensional ini menjadi rendah dan bahkan dengan struktur tanah yang rusak, sehingga berpeluang mudah tererosi.

Finnel (1948) dalam Greb (1985) mendapatkan bahwa kehilangan tanah lapisan atas beberapa sentimeter dapat menurunkan produktivitas sebesar 40% pada tanah subur, dan 60% pada tanah tidak subur. Munawar (1999) mendapatkan bahwa tanah lapisan atas lahan bekas penambangan batubara terbuka sangat heterogen dan memiliki berat isi tinggi, total pori rendah, kandungan N dan P rendah, cadangan Ca dan Mg tinggi, dan populasi mikroba tanah rendah dibandingkan dengan tanah hutan di sekitarnya (Tabel 1). Ukuran pori tanah berperan penting bagi kehidupan hayati tanah, bakteri tanah tidak mampu masuk pada ukuran pori 1-3 μm , akar tanaman tidak mampu masuk pada pori ukuran $< 10 \mu\text{m}$, akar pohon hanya mampu menembus pada ukuran pori $> 150 \mu\text{m}$ (Pitty, 1979). Selain itu, pori tanah juga berperan penting dalam menentukan infiltrasi-perkolasi, kelembaban dan aerasi tanah.

Proses penambangan sistem terbuka pada prinsipnya dimulai dengan membersihkan permukaan tanah, kemudian mengupas tanah penutup, menggali bahan tambang, dan mengangkut bahan tambang ke tempat penampungan (*stockyard*) untuk selanjutnya dimanfaatkan sebagai bahan baku industri. Alur kegiatan penambangan selengkapnya adalah sebagai berikut :

1. Pembersihan lahan dari vegetasi yang menutupi lapisan tanah permukaan (*clearing and grubing*) dilakukan dengan Bulldozer dan Excavator.
2. Pengupasan tanah penutup. Tanah penutup dikupas dan diangkut ke tempat penimbunan sementara, atau ditata dan disebar di area pembuangan (*disposal*) akhir.
3. Penggalan dan pengambilan bahan tambang (*ore*) dengan alat gali muat (*ore getting*). *Ore* diangkut keluar melewati jalan tambang ke *Export Transite Ore* (ETO) dan *Export Final Ore* (EFO) di dekat pelabuhan.

Tabel 1. Perbandingan beberapa sifat fisik, kimia dan biologi tanah lapisan atas (0-30 cm) lahan bekas penambangan batubara sistem terbuka dan tanah hutan di sekitarnya

No.	Sifat tanah	Tanah bekas tambang batubara	Tanah hutan
I.	Sifat fisik :		
	1. Berat isi (g/cm^3)	1,48	1,06
	2. Kerapatan jenis (g/cm^3)	2,12	2,20
	3. Total pori (%)	30,22	51,21
	4. Ketahanan tanah (kg/m^2)	3,69	0,97
II.	Sifat kimia :		
	1. Kandungan C-organik (%)	5,83 ^{*)}	0,68
	2. P-tersedia (ppm)	0,80	0,70
	3. K-dapat tukar (cmole/kg^2)	0,74	1,13
	4. Ca-dapat tukar (cmole/kg^2)	5,17	0,82
	5. Mg-dapat tukar (cmole/kg^2)	5,44	0,38
	6. Al-dapat tukar (cmole/kg^2)	1,24	2,62
	7. KTK (cmole/kg^2)	24,24	22,54
	8. Kejenuhan basa (%)	49,71	10,68
III.	Populasi mikroba :		
	1. Bakteri (sel/g tanah kering)	$71,75 \times 10^4$	$162,00 \times 10^4$
	2. Fungi (sel/g tanah kering)	$7,11 \times 10^4$	$5,80 \times 10^4$
	3. Mikoriza (spora/g tanah kering)	$77,15 \times 10^4$	$91,10 \times 10^4$

Keterangan : ^{*)} banyak mengandung batubara halus.

Sumber : Munawar (1999).

4. Penimbunan kembali kolong bekas galian dengan tanah penutup. Setiap selesai penambangan, tanah penutup dan tanah sisa penambangan ditimbun kembali di area bekas galian sesuai dengan design yang telah ditentukan.
5. Penanaman kembali tanaman penutup tanah. Kegiatan penambangan terbuka pada prinsipnya diwajibkan untuk menutup kembali areal bekas tambang yang ditinggalkan agar tidak terjadi kerusakan lingkungan yang lebih besar dan dipulihkan kembali kondisi ekosistemnya sekurang-kurangnya seperti kondisi sebelumnya.

Dari kegiatan penambangan sistem terbuka ini dihasilkan: (1) bahan organik dari tanaman penutup tanah, baik berupa kayu ataupun dedaunan; (2) tanah penutup yang terdiri dari tanah lapisan atas (tanah pucuk/*topsoil*) yang mempunyai kesuburan fisik, kimia dan biologi yang baik sebagai media pertumbuhan tanaman dan tanah bawah permukaan (*subsoil/overburden*). Tanah *subsoil* umumnya berupa bahan tanah peralihan dari bahan tambang sebagai bahan induk pembentuk tanah dan tanah lapisan atas yang telah berkembang. Tanah *subsoil* ini belum mengalami perkembangan lanjut, sehingga memiliki kesuburan kimia, fisika dan biologi rendah; (3) bahan/material tambang, yaitu bahan mineral sebagai bahan yang dipanen untuk diangkut keluar dan dimanfaatkan sebagai bahan baku industri; dan (4) lubang bekas galian (kolong), terdapatnya kolong-kolong bekas galian akan mengurangi luas lahan untuk budidaya ataupun dapat mengubah tata air dan bentang lahan.

Di antara bahan yang dihasilkan apabila dapat diatur dengan baik pada prinsipnya kegiatan penambangan sistem terbuka dapat memberikan manfaat yang tinggi bagi pemanfaatan permukaan lahan ke depan. Kegiatan penambangan terbuka dapat diarahkan untuk mengubah bentang lahan sesuai dengan yang diharapkan, sehingga justru dapat memperbaiki kualitas lingkungan baru. Panjang dan kemiringan lereng dapat diperbaiki, ketebalan dan kesuburan tanah lapisan atas

dapat ditingkatkan, dan tingkat kepadatan tanah lapisan bawah dapat diatur dengan perlakuan pemadatan. Sukmana dan Abujamin (1986) mendapatkan bahwa pengolahan tanah dalam pada tanah dengan tanah lapisan olah yang tipis dapat memperbaiki kondisi fisik daerah perakaran, meningkatkan laju infiltrasi, menurunkan ketahanan terhadap penetrasi, dan pada musim hujan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman. Namun apabila penambangan terbuka ini tidak dilakukan dengan hati-hati, maka nilai positif dari peluang pemulihan kualitas lahan ini tidak dapat memberikan hasil yang baik dan bahkan mungkin akan semakin memperburuk kualitas lingkungan.

Reklamasi tanah bekas penambangan yang juga menggunakan tanah bongkaran yang diawali dengan pembuatan teras bangku datar merupakan langkah yang tepat untuk dapat mencegah kerusakan lahan akibat erosi. Agar pemulihan lahan ini berlangsung efektif, biorehabilitasi lahan dengan pemberdayaan hayati tanah dan revegetasi dengan tanaman berakar dalam yang sejalan dengan rencana peruntukan selanjutnya penting untuk segera diupayakan pada tahun pertama.

MASALAH PENAMBANGAN SISTEM TERBUKA KONVENSIONAL

Pada penambangan sistem terbuka nampak bahwa apabila penanganan kurang hati-hati permasalahan yang mungkin terjadi adalah perubahan bentang lahan, rusaknya struktur tanah, dan hilangnya tanah lapisan atas. Hasil penelitian Subardja (2009) menunjukkan bahwa lahan bekas penambangan rakyat sistem terbuka memiliki permukaan lahan tidak teratur, kesuburan tanah rendah, dan rawan erosi, sehingga daya dukung tanah untuk tanaman rendah.

Lahan terdegradasi umumnya memiliki biota berbeda dengan komunitas ekosistem aslinya, terjadi kecenderungan penurunan keanekaragaman jenis flora, fauna dan mikroba. Munculnya kolong-kolong bekas galian juga mengganggu sistem drainase dan mempersulit

dalam pemanfaatan lahan selanjutnya. Hancurnya struktur tanah timbunan juga menurunkan stabilitas tanah, merubah distribusi pori tanah yang berperan penting dalam memegang air, merusak saluran-saluran pori tanah yang berperan penting dalam meresapkan air ke dalam tanah, dan meningkatkan potensi terjadinya erosi. Hilangnya/terbenamnya tanah lapisan atas yang subur akan menurunkan daya dukung tanah untuk pertumbuhan tanaman. Barus dan Suwardjo (1986) melaporkan bahwa hilangnya tanah lapisan atas mengakibatkan sifat fisik (aerasi, permeabilitas dan stabilitas agregat) lebih buruk dan hasil tanaman semusim lebih rendah dibandingkan dengan tanah utuh (Tabel 2). Pemulihan kesuburan kimia maupun biologi tanah lapisan atas pasca penambangan memerlukan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Pembentukan tanah lapisan atas setebal 2,5 cm pada lereng G. Krakatau diperlukan waktu ± 100 tahun. Untuk itu pelestarian sumberdaya lahan dan hayati tanah penting diupayakan agar produktivitas dan kelestarian lingkungan dapat dijaga.

Hermawan *et al.* (2009) mendapatkan bahwa dampak langsung penambangan timah secara terbuka di Bangka Belitung telah menurunkan produktivitas lada dari 2 t/ha (tahun 2000) menjadi 1 t/ha (tahun 2004), kerusakan hutan 60% dari luas total hutan (tahun 2007), terdapat 887 kolong dengan kedalaman 9,5 m (tahun 1999) menjadi >1.000 kolong (tahun 2009), dan juga terjadi pendangkalan sungai. Namun apabila kegiatan penambangan sistem terbuka ini dilakukan dengan baik, pada prinsipnya justru dapat diperoleh hal-hal positif, antara lain :

1. Bahan tambang yang merupakan akumulasi bahan mineral yang terkonsentrasi dapat dipanen dan dimanfaatkan untuk kepentingan lain yang lebih berdaya guna dan bernilai ekonomi.
2. Bahan tambang yang berupa logam berat dapat diangkut keluar dari lahan, sehingga dapat terhindar dari potensi pencemaran logam berat hasil pelapukan bagi lahan yang ada di bawahnya.
3. Penyusutan volume permukaan lahan dapat menurunkan tingkat kemiringan lahan, sehingga dapat memudahkan dalam pengelolaan selanjutnya serta dapat mengurangi risiko terjadinya erosi tanah.
4. Ketebalan tanah lapisan atas dapat ditingkatkan dengan menurunnya luas permukaan tanah akibat penurunan kemiringan lahan.
5. Kepadatan tanah lapisan bawah dapat disesuaikan dengan target perbaikan yang ingin dicapai, sehingga dapat meningkatkan daya dukung lahan untuk perkembangan akar serta meningkatkan laju infiltrasi-perkolasi, mengurangi aliran permukaan dan erosi tanah.
6. Bentang lahan dapat diatur sesuai dengan yang diharapkan, sehingga nilai fungsi lahan tetap terjaga dan bahkan dapat lebih ditingkatkan dari sebelumnya.

Dari gambaran ini nampak bahwa dampak sistem penambangan terbuka konvensional sangat luas bagi kepentingan pemerintah maupun masyarakat yang berada disekitar areal tambang yang memiliki kegiatan usaha yang

Tabel 2. Pengaruh kehilangan tanah lapisan atas terhadap sifat fisik dan produksi tanaman pada tanah Haplortox Citayam

No.	Perlakuan	Sifat fisik tanah lapisan olah			Produksi tanaman	
		Pori aerasi	Permeabilitas	Indeks stabilitas agregat	Kedelai	Kacang tunggak
		% isi	cm/jam		 t/ha	
1.	Tanah utuh	23,39	6,18	44,75	0,59	1,27
2.	Lapisan atas hilang	18,43	4,63	36,86	0,44	0,93

Sumber: Barus dan Suwardjo (1986)

berbasis pada sumberdaya lahan. Untuk itu perlu kiranya dipertimbangkan kelayakan teknik penambangan terbuka ini, sehingga dampak negatif penambangan dapat dihindari/dikurangi dan nilai manfaat positif dapat ditingkatkan.

PRINSIP DASAR PENAMBANGAN TERBUKA RAMAH LINGKUNGAN DAN UPAYA REKLAMASI PASCA TAMBANG UNTUK MEMPERBAIKI KUALITAS LAHAN DAN HAYATI TANAH

Sejalan dengan permasalahan yang terjadi pada penambangan terbuka konvensional perlu kiranya dilakukan antisipasi terhadap prinsip dasar penambangan, sehingga nilai positif dari setiap kegiatan penambangan dapat diperoleh dan nilai negatif dapat dihindari. Beberapa prinsip dasar sistem penambangan terbuka dan antisipasi yang mungkin dapat diupayakan agar kelestarian sumberdaya lahan dan hayati tanah bekas penambangan tetap terjaga dan berfungsi secara optimal sesuai dengan kemampuannya dikemukakan berikut ini.

Pengaturan tataletak *bench*/blok penambangan

Keberadaan deposit bahan tambang pada prinsipnya terjadi akibat angkatan tektonik maupun deposit vulkanik, sehingga di lapangan deposit bahan tambang dapat menyebar ataupun terkonsentrasi pada suatu tempat. Namun sesuai dengan sistem pembentukan kepulauan di Indonesia yang berbasis aktivitas vulkanik, maka bentang lahan umumnya berbentuk kerucut ataupun bergelombang (berlereng). Demikian juga laju pelapukan dan curah hujan yang tinggi, sehingga konsentrasi dan posisi deposit bahan tambang cenderung beragam mengikuti posisi lereng. Keberadaan deposit bahan tambang pada lereng atas umumnya lebih dangkal, sebaliknya pada lereng bawah lebih dalam. Untuk itu dalam sistem penambangan terbuka sebaiknya dilakukan dengan *sistem bench/blok*. Penempatan blok kegiatan penambangan disesuaikan dengan kualitas/kandungan bahan tambang, kapasitas/volume dan pola sebaran

(*vertikal/ horizontal*). Penempatan blok diatur sedemikian rupa, sehingga kegiatan penambangan dapat dilakukan secara bertahap sesuai konsesi waktu yang telah direkomendasikan.

Untuk menjamin kelestarian sumberdaya lahan pasca penambangan, maka kegiatan penggalian bahan tambang hendaknya dilakukan dengan teknik "*back filling*" yaitu: penimbunan kembali secara langsung setelah selesai penambangan/penggalian dan langsung dilakukan revegetasi. Penempatan blok penambangan hendaknya dimulai dari lereng paling bawah, selanjutnya bertahap pada lereng di atasnya. Hal ini penting agar pada awal penambangan risiko erosi tanah saat konstruksi/penggalian rendah dan dapat ditahan secara setempat. Kegiatan penambangan selanjutnya dilakukan secara bertahap pada lereng di atasnya, sehingga dampak peningkatan erosi saat konstruksi dapat ditahan oleh lereng di bawahnya yang telah direklamasi dan revegetasi dengan kemiringan lebih rendah, sehingga deposit tanah tererosi dapat ditampung dan tidak terbawa keluar. Dengan sistem ini terjadi pemotongan panjang lereng dan penurunan kemiringan lereng.

Pengupasan tanah pucuk (*topsoil*)

Sesuai dengan tahapan kegiatan penambangan yang diawali dari blok pada lereng paling bawah, maka kupasan tanah lapisan atas yang merupakan tanah yang memiliki kesuburan paling tinggi dan mampu mendukung pertumbuhan tanaman hendaknya disimpan pada tempat yang aman terhadap erosi dan pengeringan. Hal ini penting agar daya dukung kimia dan biologi tanah lapisan atas ini tidak rusak/terdegradasi. Swift *et al.* (1994) menyatakan bahwa tanah lapisan atas merupakan habitat bagi bermacam-macam mikroorganisme dan fauna tanah yang berperan penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Peranan tersebut antara lain: membantu menyediakan hara bagi tanaman, mengatur daur hara dalam tanah, mensintesis dan mengurai bahan organik tanah, mempengaruhi ketersediaan air tanah, dan mempengaruhi kesehatan tanaman melalui parasitisme, patogenitas ataupun sebagai predator.

Tanah lapisan atas dari lereng paling bawah yang umumnya lebih tebal diamankan sebagai penyangga pemenuhan kebutuhan tanah lapisan atas untuk penutupan pasca penambangan untuk blok-blok berikutnya. Sementara untuk tanah lapisan atas hasil kupasan pada penambangan blok berikutnya (di atasnya) dapat langsung disebarkan kembali pada bangku teras lahan bekas tambang sebelumnya (di bawahnya) yang telah direklamasi dengan bentukan berteras bangku sebagai penutup tanah lapisan atas.

Pengupasan tanah penutup *overburden* (*subsoil*)

Kupasan tanah penutup hasil galian yang berupa tanah lapisan bawah (*sub soil/ overburden*) dengan volume yang besar untuk sementara waktu ditempatkan di pinggiran daerah penggalian bahan tambang masing-masing blok. Lokasi penimbunan ini hendaknya aman dari kemungkinan erosi dan mudah dalam pengambilan untuk ditimbunkan kembali. Setelah kegiatan penambangan selesai, tanah penutup ini langsung dikembalikan sebagai tanah penutup kolong dan diatur berteras.

Penggalian bahan tambang (*ore*)

Penggalian bahan tambang dilakukan setelah tanah penutup terkupas keluar. Bentuk galian hendaknya menyempit di bawah, bukan melebar ke bawah. Hal ini penting agar konstruksi tanah pasca penambangan stabil oleh adanya pemadatan alami setelah rekonstruksi. Apabila terjadi penurunan permukaan tanah pasca reklamasi secara alami, permukaan teras turun secara serentak dan tidak banyak mengalami perubahan. Sebaliknya, apabila membentuk rongga-rongga di bagian bawah akan mengganggu/merusak bangku teras yang dihasilkan dan juga mengganggu tanaman revegetasi.

Reklamasi kolong bekas penambangan

Reklamasi lahan merupakan upaya untuk memperbaiki atau memulihkan kondisi lahan yang rusak agar dapat berfungsi kembali secara optimal sesuai dengan kemampuannya. Setelah

selesai kegiatan penambangan secara terbuka terjadi kerusakan lahan dengan terbentuknya kolong-kolong ataupun timbunan tanah di sekitarnya. Apabila hal ini tidak segera direklamasi akan sangat potensial merusak lingkungan sekitarnya, terutama akibat erosi dan perubahan iklim mikro yang panas dan kering.

Upaya reklamasi lahan bekas penambangan terbuka dilakukan dengan menutup kembali kolong yang terbuka dengan tanah penutup (*overburden*) hasil galian dari blok tersebut. Tanah penutup diratakan dan dipadatkan dengan sistem teras bangku datar dengan lebar bangku teras >5 m, tinggi vertikal interval <2 m, dan kemiringan tebing teras $\pm 60\%$. Pengaturan bentuk lahan dengan membentuk teras bangku bertingkat. Jumlah bangku teras disesuaikan dengan volume tanah penutup dan ruang yang tersedia di areal penimbunan. Teras bangku merupakan teknik konservasi yang paling efektif mencegah erosi pada tanah yang mempunyai solum dalam dan berstruktur baik, namun dengan biaya konstruksi lebih mahal (Haryati *et al.*, 1989). Beban biaya konstruksi ini menjadi lebih murah, karena dilakukan sejalan dengan biaya untuk kegiatan penambangan itu sendiri. Dengan konstruksi ini diharapkan kapasitas bangku teras meresapkan aliran air permukaan memadai dan juga pemanfaatan bangku teras untuk budidaya tanaman mudah dilakukan. Agar reklamasi lahan ini optimal juga dilengkapi saluran pembuangan air untuk mengurangi kecepatan aliran air limpasan dengan membuat saluran pengelak, saluran pembuangan air, dan dam pengendali.

Akibat konstruksi perataan secara mekanik, kondisi tanah penutup telah mengalami perubahan struktur. Selain memiliki kemampuan infiltrasi-perkolasi untuk meresapkan air permukaan meningkat juga akan mudah ditembus oleh akar tanaman. Pengolahan tanah dalam dapat memperbaiki kondisi fisik yang dicirikan meningkatnya pori aerasi dan menurunnya tingkat ketahanan terhadap penetrasi (Sukmana dan Abujamin, 1986). Setelah seluruh target konstruksi terpenuhi dengan terbentuknya teras bangku datar dan sarana pengendali aliran air

dan sedimen, selanjutnya lahan siap mendapatkan tanah pucuk dari hasil kupasan dari blok berikutnya (di atasnya). Pada areal blok penambangan terakhir yang berada di lereng paling atas atau pada blok penambangan dengan kolong galian yang dalam, apabila penutupan kolong bekas tambang tidak dapat sempurna (terbatasnya tanah penutup/*overburden*) dapat dipertahankan sebagai kolam penampung air. Selain bermanfaat untuk menampung dan menyangga penyediaan air pengairan juga dapat mengurangi risiko aliran permukaan dan erosi tanah pada lereng di bawahnya.

Lapisan tanah pucuk yang berasal dari pengupasan dari blok di atasnya langsung disebarkan pada bangku teras blok yang telah direklamasi. Ketebalan tanah pucuk ini diusahakan >20 cm. Apabila tanah pucuk dari blok di atasnya ini kurang dapat ditambah dengan tanah pucuk penyangga yang berasal dari tanah pucuk pada blok penambangan pertama (lereng paling bawah). Demikian juga apabila kesuburan kimia ataupun biologi dari tanah pucuk ini belum mencukupi dapat diperkaya dengan pemberian bahan organik, pupuk, kapur ataupun pupuk hayati. Setelah blok lahan bekas penambangan ini tertutup lapisan atas (tanah pucuk) ini segera dilengkapi dengan bangunan konservasi (guludan, saluran drainase, rorak, dan lain-lain) agar sumberdaya lahan aman dan mampu mendukung untuk kepentingan peruntukan selanjutnya.

BIOREHABILITASI LAHAN BEKAS PENAMBANGAN TERBUKA UNTUK MEMPERBAIKI KUALITAS SUMBERDAYA LAHAN DAN HAYATI TANAH

Hasil kegiatan reklamasi areal bekas tambang telah terbentuk teras bangku datar, sarana pengendali drainase dan sedimentasi, dan tanah lapisan atas dengan ketebalan dan kesuburan yang lebih baik. Namun struktur tanah masih mengalami kerusakan dengan terputusnya saluran-saluran pori antara lapisan atas dan lapisan bawah, sehingga apabila terjadi hujan dapat mengakibatkan tertahannya aliran

resapan air dan sedimen yang terlarut dapat menyumbat saluran-saluran pori yang ada. Tersumbatnya saluran pori akan menahan aliran air dan menurunkan kapasitas tanah meresapkan air, sehingga meningkatkan aliran permukaan dan erosi tanah. Pembentukan saluran pori tanah secara bersambungan antar lapisan tanah merupakan faktor penting yang perlu segera diupayakan agar aliran resapan air ke dalam tanah menjadi lebih besar dan lancar.

Haryati *et al.* (1995) mendapatkan bahwa akibat konstruksi pada teknik konservasi tanah, bangunan konservasi teras bangku datar merupakan teknik konservasi tanah yang terbaik untuk mengurangi besarnya aliran permukaan dan erosi tanah pada tahun pertama. Namun mulai pada tahun ke-2 pengaruh bangunan-bangunan konservasi tersebut sudah relatif sama dan bahkan mulai tahun ke-3 teras bangku datar justru mengalami aliran permukaan lebih besar dibandingkan dari konstruksi konservasi yang lain. Namun untuk erosi tanah sampai tahun ke-4 teras bangku datar lebih rendah, dan tahun ke-5 sudah relatif sama dengan bangunan konservasi yang diuji (Tabel 3). Hal ini terjadi karena perlakuan konstruksi teras bangku datar dilakukan dengan mengupas tanah lapisan atas dan selanjutnya diratakan, sehingga terjadi kerusakan struktur tanah dan pemutusan saluran-saluran kapiler/pori. Pada tahun pertama kapasitas pori/rongga tersedia masih mampu menampung aliran air yang ada. Di pihak lain penutupan pori oleh partikel-partikel tanah halus hasil dari konstruksi teras bangku datar sebelumnya lebih intensif dibandingkan dengan perlakuan lainnya, sehingga aliran permukaan justru mengalami peningkatan. Namun dengan adanya peningkatan pemadatan tanah oleh adanya material-material halus yang menutup pori sedikit memperkuat tahanan tanah terhadap gerusan aliran air permukaan pada teras bangku datar yang relatif masih lemah/lambat. Akibatnya erosi tanah sampai tahun ke-4 pada teras bangku datar masih lebih rendah dibanding bangunan konservasi yang lain. Upaya menjaga saluran pori tanah tetap aman dan mampu menghubungkan antar lapisan merupakan langkah yang penting agar fungsi resapan air

Tabel 3. Pengaruh berbagai teknik konservasi tanah terhadap aliran permukaan dan erosi pada tanah *Typic Eutropepts* di Ungaran

Konstruksi teknik konservasi tanah	Tahap/tahun pengamatan				
	Tahun ke-1 (1988/89)	Tahun ke-2 (1989/90)	Tahun ke-3 (1990/91)	Tahun ke-4 (1991/92)	Tahun ke-5 (1992/93)
Teras bangku datar :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	4.918	4.102	7.258	2.946	581
• Erosi tanah (t/ha)	25,0	2,3	0,6	3,3	1,3
Teras bangku miring :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	9.812	4.175	7.340	2.403	479
• Erosi tanah (t/ha)	45,1	1,8	0,8	3,1	1,5
Teras gulud :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	8.518	3.824	3.963	1.886	512
• Erosi tanah (t/ha)	50,9	10,1	6,0	6,0	0,7
Taras kredit :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	9.311	4.292	5.989	1.791	441
• Erosi tanah (t/ha)	45,5	12,5	10,9	11,1	2,1
Pertanaman lorong :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	9.638	5.834	6.300	1.804	425
• Erosi tanah (t/ha)	100,9	37,7	23,5	9,5	1,0
Rata-rata :					
• Aliran permukaan (m ³ /ha)	8.439	4.445	6.170	2.166	487
• Erosi tanah (t/ha)	53,5	12,9	8,4	6,6	1,3

Sumber : Haryati *et al.* (1995)

tetap terjaga dan selanjutnya dapat mencegah peningkatan erosi tanah.

Pemanfaatan cacing tanah endogaesis untuk biorehabilitasi lahan bekas penambangan terbuka

Upaya untuk membangun saluran pori tanah yang dapat menghubungkan antar lapisan tanah dapat dilakukan dengan memanfaatkan cacing tanah dari kelompok *endogaesis* yang mampu membuat liang di dalam tanah. Enami *et al.* (1999) menyampaikan bahwa cacing tanah memiliki manfaat besar di dalam tanah, liang-liang yang dihasilkan berperan sebagai saluran udara, air ataupun tempat menembus akar, dan kasing yang dihasilkan merupakan makro-agregat yang stabil. Cacing tanah *endogaesis* mampu membuat liang sampai mencapai kedalaman 1 m (Richard, 1978). Liang cacing tanah *Lumbricus terrestris* berdiameter $\pm 0,80$ cm dapat menghubungkan antara horison A (lapisan atas) dan horison B (lapisan bawah)

(Nelson dan Hole, 1964 dalam Fanning dan Fanning, 1989). Inokulasi cacing tanah *endogaesis Pheretima hupiensis* pada tanah *Ultisol* dengan diikuti pemberian mulsa vertikal bahan organik sampai lapisan argilik dapat menurunkan kepadatan horison argilik dari 1,19 g/cm³ menjadi 1,08 g/cm³ (Subowo, 2002). Pemberian cacing tanah pada *Oxic Dystropepts* dapat meningkatkan laju infiltrasi dan K-dd, serta menurunkan Al-dd (Brata, 1999).

Selain itu, dengan tertimbunnya tanah pucuk yang subur berikut bahan organik saat konstruksi reklamasi, maka cacing tanah akan terdorong untuk masuk ke lapisan yang lebih dalam dengan membuat liang-liang cacing. Saluran pori tanah antar lapisan dapat terhubung oleh liang-liang cacing tanah, sehingga laju dan kapasitas aliran resapan air ke dalam tanah lapisan dalam dapat berlangsung baik. Adanya liang-liang cacing tanah juga dapat mendorong berkembangnya aktivitas organisme aerobik yang banyak terdapat di dalam tanah,

seperti fungi, bakteri ataupun fauna tanah lainnya. Tiunov *et al.* (2001) mendapatkan bahwa pada dinding liang cacing tanah kaya akan keragaman jenis dan jumlah biomasa dari *Nematoda*, *Protozoa*, *Flegellata*, *Amoeba*, dan *Mikroba*, serta kandungan N dan P lebih tinggi dibandingkan dengan tanah di luar liang. Hal ini menunjukkan bahwa adanya aktivitas cacing tanah *endogaesis* dapat meningkatkan dan melindungi keanekaragaman hayati tanah. Berkembangnya organisme tanah akan mempercepat pemulihan struktur dan kesuburan tanah yang rusak akibat penambangan.

Kascing yang dihasilkan yang merupakan makroagregat stabil dapat bertahan lebih dari 1 tahun (Blanchart *et al.*, 1991 dalam Martin, 1991). Cacing tanah juga mampu mengangkat kembali bahan tanah subur yang ada di lapisan bawah dalam bentuk kascing, sehingga lebih tahan terhadap tekanan erosi. Cacing tanah merupakan fauna tanah yang mampu hidup relatif lama, ada spesies yang mampu hidup 1-10 tahun (Coleman and Crossley, 1996). Peranan biorehabilitasi ini dapat berjalan terus menerus dalam kurun waktu yang lama. Demikian juga dengan kemampuannya berkembang biak (*reproduksi*) secara alami, maka sumbangan cacing tanah meningkatkan kesuburan tanah dan melindungi tanah dari tekanan erosi berlangsung secara terus menerus sesuai ketersediaan daya dukung untuk kehidupan cacing tanah tersebut.

Untuk memaksimalkan nilai manfaat cacing tanah dapat dilakukan dengan pemberian pakan bahan organik secara vertikal sampai tanah lapisan dalam. Jelajah cacing tanah akan masuk ke lapisan lebih dalam, sehingga dapat memperkuat resapan air, menekan erosi tanah, dan mendukung organisme tanah lainnya masuk ke dalam tanah.

Pemanfaatan tanaman legum sebagai tanaman pionir revegetasi lahan bekas penambangan terbuka

Untuk mempercepat upaya pemulihan kualitas lahan bekas penambangan terbuka, penanaman tanaman penutup tanah hendaknya

dapat secepatnya dilakukan. Apabila jumlah tanah lapisan atas tidak memadai, sistem pertanaman secara pot dapat dilakukan dengan meningkatkan dosis dan intensitas pemupukannya. Pada tahap awal dapat dikembangkan untuk pertanaman tanaman legum penutup tanah cepat tumbuh (*fast growing species*) seperti : *Calopogonium* sp., *Pueraria* sp. (koro benguk), *Centrosema* sp., Kerandang, dan lain-lain. Selanjutnya secara bertahap dikembangkan tanaman legum berakar dalam seperti: Sengon, Lamtoro, dan lain-lain. ataupun tanaman berakar dalam lainnya sesuai target rehabilitasi yang ingin dicapai. Untuk memperkuat bangunan teras bangku yang sudah dibentuk pada bibir-bibir teras secepatnya ditanami tanaman berakar dalam agar dapat memperkuat konstruksi tebing teras yang rawan longsor.

Pengembangan tanaman legum sebagai tanaman pionir diperlukan karena daya dukung tanah masih relatif lemah. Tanaman legum mampu memanfaatkan N₂-udara hasil bersimbiosis dengan bakteri *Rhizobium*, dan bahan organik yang dihasilkan kaya hara N yang merupakan hara makro esensial bagi tanaman dan merupakan faktor pembatas utama pada tanah-tanah bukaan baru di kawasan tropika. Dengan kondisi ini, maka akan mampu mempercepat pemulihan kesuburan tanah.

Hasil penelitian Munawar (1999) menunjukkan bahwa pengolahan tanah pada lahan bekas penambangan batubara memberikan pengaruh meningkatkan pertumbuhan diameter batang tanaman legum pohon pada umur 10 bulan setelah tanam lebih besar dibandingkan dengan perlakuan inokulasi *endomikoriza* (Tabel 4). Hal ini disebabkan tanah awal bekas penambangan memiliki kepadatan tanah tinggi dan populasi mikoriza pada dasarnya telah cukup tersedia (Tabel 1). Akibatnya pengolahan tanah yang mampu menurunkan kepadatan tanah dapat memberikan pengaruh lebih nyata dibandingkan dengan perlakuan inokulasi mikoriza. Keadaan ini sejalan dengan kondisi tanah hasil reklamasi yang miskin hara N dan memiliki aerasi yang baik pada tanah lapisan bawah, sehingga pertumbuhan akar tanaman legum pohon lebih berkembang dan dukungan pasokan N tinggi.

Tabel 4. Pertumbuhan diameter batang tanaman legum pohon setelah 10 bulan reklamasi pada lahan bekas penambangan batubara terbuka di Bengkulu Utara

No. Perlakuan	Diameter batang umur 10 bulan			
	<i>Acacia</i>	Sengon	Turi	Rata-rata
..... cm				
I 1.1. Mikoriza	2,91	5,10	7,44	5,15
1.2. Tanpa mikoriza	2,07	4,18	7,60	4,61
II 2.1. Olah tanah	2,90	5,80	8,14	5,61
2.2. Tanpa olah tanah	2,09	3,48	6,91	4,16

Sumber : Munawar (1999)

Pemeliharaan tanaman dilakukan dengan pemupukan, penyulaman, pengendalian gulma, penyiangan, serta pemberantasan hama dan penyakit. Apabila ekosistem lahan telah mencapai kondisi keseimbangan (*klimaks*) dapat ditingkatkan nilai peruntukan lahannya dengan mengembangkan tanaman-tanaman pilihan yang bernilai ekonomi tinggi. Pemilihan vegetasi untuk mencapai kondisi *klimaks ekosistem* baru dengan tingkat erosi rendah, produktivitas optimum dan lingkungan lestari perlu kiranya dilakukan selektif dengan jenis tanaman yang tepat, sehingga komponen-komponen pelaku ekosistem sebagai produsen (*flora*), konsumen (*fauna*), maupun pengurai (*mikroorganisme*) dapat segera terbentuk.

KESIMPULAN

Penambangan sistem terbuka konvensional banyak mengubah bentang lahan dan keseimbangan ekosistem permukaan tanah, menurunkan kualitas dan produktivitas tanah dan mutu lingkungan. Untuk menghindari dampak negatif tersebut penambangan terbuka harus ramah lingkungan dengan berorientasi pada pelestarian sumberdaya lahan dan hayati tanah. Hal ini dapat diupayakan dengan: (1) penambangan dilakukan secara blok dengan dimulai dari lereng paling bawah, (2) reklamasi/ penimbunan lahan dilakukan secara langsung setelah selesai penambangan, (3) bentukan permukaan lahan dengan terasering dengan lebar bangku teras datar > 5 m, beda tinggi antar bangku teras < 2 m, kemiringan tebing $\pm 60^\circ$ %,

(4) kupasan tanah lapisan atas (*topsoil*) ditempatkan kembali pada lapisan atas dengan ketebalan > 20 cm dan diperkaya dengan kapur, pupuk organik, pupuk anorganik ataupun pupuk hayati, (5) *biorehabilitasi* dengan pemberdayaan cacing tanah *endogaesis* dan penanaman tanaman legum sebagai tanaman pionir, dan (6) pemeliharaan tanaman sampai mencapai klimaks ekosistem sesuai yang diharapkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1999. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 41, Tahun 1999, tentang Kehutanan.
- Barus, A. dan H. Suwardjo. 1986. Pengaruh kehilangan lapisan atas tanah dan tanaman penutup terhadap produktivitas *Haplorthox* di Citayam. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk 5:37-41.
- Brata, K.R. 1999. The Introduction of Earthworm as Biological Tillage Agent for the Improvement of Soil Physical and Chemical Properties in Upland Agriculture. Pp 80-85. In Proc. Inter. Sem. Toward Sustainable Agriculture in Humid Tropics Facing 21st Century, Bandar Lampung Indonesia, September 27-28.
- Coleman, D.C. and D.A. Crossley, Jr. 1996. Fundamentals of Soil Ecology. Academic Press. San Diego. New York. Boston. London. Sydney. Tokyo. Toronto. Hlm 205.
- Dariah, A., A. Abdurachman, dan D. Subardja. 2010. Reklamasi Lahan Bekas

- Penambangan Untuk Perluasan Areal Pertanian. Jurnal Sumberdaya Lahan 4(1)1-12.
- Enami, Y., H. Shirashi, and Y. Nakamura. 1999. Use of Soil Animals as Bioindicators of Various Kinds of Soil Management in Northern Japan. JARQ 33:85-89.
- Fanning, D.S. and M.C.B. Fanning. 1989. Soil Morphology, Genesis and Classification. John Wiley and Sons. New York/Chichester/Brisbane/Toronto/ Singapore. Hlm 365.
- Greb, B.W. and D.E. Smika. 1985. Topsoil Removal on Chemical and Physical Properties. Pp 316-327. *In* Soil Erosion and Conservation (Swaffy, Moldenhouer, and Andrew Lo, eds). Soil Conservation Society of America 7515, Northeast Ankeny Road, Ankeny, Iowa, USA,
- Haryati, U., Haryono, dan A. Abdurachman. 1995. Pengendalian Erosi dan Aliran Permukaan serta Produksi Tanaman Pangan dengan Berbagai Teknik Konservasi pada Tanah *Typic Eutropepts* di Ungaran, Jawa Tengah. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk 13:40-50.
- Haryati, U., M. Thamrin, dan Suwardjo. 1989. Evaluasi Beberapa Model Teras Pada Tanah Latosol Gumasari. Pross. Pert. Teknis Pen. Tanah Bid. Konservasi Tanah dan Air. Hlm 187-195.
- Hermawan, A., A. Phoppy, dan M.D. Pertiwi. 2009. Penanganan Dampak Negatif Penambangan Timah pada Sistem Produksi Pertanian: Tinjauan teoritis analisis ekonomi. Buku I, Semilokas Inovasi Sumberdaya Lahan. Hlm 347-362.
- Hidayati, N. 2000. Degradasi Lahan Pasca Penambangan Emas dan Upaya Reklamasinya: Kasus Penambangan Emas di Jampang-Sukabumi. Buku I. Hlm 283-293. *Dalam* Pros. Kongres Nasional HITI.
- Martin, A. 1991. Short and Long-term Effects of the Endogeic Earthworm *Milsonia anomata* (Omodeo) (Megascolecidae, Oligochaeta) of Tropical Savana, on Soil Organic Matter. Biol. Fertil. Soils 11:234-238.
- Munawar. 1999. Coal-mine Soil Reclamation and Its Possible Agricultural Uses in Bengkulu. Pros. Sem. Toward Sustainable Agriculture in Humid Tropics Facing 21st Century 107-124.
- Munir. 1996. Geologi dan Mineralogi Tanah. Pustaka Jaya, Jakarta. Hlm 290.
- Pitty, A.F. (1979). Geography and Soil Properties. Methuen and Co Ltd. Pp101- 114.
- Richard, B.N. 1978. Introduction to the Soil Ecosystem. Longman, London and New York. Pp 43-45.
- Subardja, D. 2009. Karakteristik dan Potensi Lahan Bekas Tambang Timah di Bangka Belitung untuk Pertanian. Buku I, Semilokas Inovasi Sumberdaya Lahan, Hlm 189-197.
- Subardja, D., A. Kasno, Sutono, dan H. Sosiawan. 2010. Identifikasi dan Karakterisasi Lahan Bekas Tambang Timah untuk Pencetakan Sawah Baru di Perlang Bangka Tengah. Buku Panduan: Semnas SDL Pertanian, Bogor, 30 Nopember-1 Desember 2010. Hlm 213-216.
- Subowo. 2002. Pemanfaatan Cacing Tanah (*Pheretima hupiensis*) untuk Meningkatkan Produktivitas *Ultisol* Lahan Kering. Disertasi Program Pasca Sarjana IPB. Hlm 95.
- Sukmana, S. dan S. Abujamin. 1986. Pengaruh Pengolahan Dalam pada *Eutropepts* Bekas Sawah terhadap Sifat Fisik Tanah dan Hasil Tanaman Semusim. Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk 5:42-48.
- Swift, M.J., K.A. Dvorak, K. Mulongoy, M. Musoko, N. Sanginya, and G. Tian. 1994. The Role of Soil Organisms in The Sustainable of Tropical Cropping Systems. *In* Soil Science and Sustainable Land Management in The Tropics (Syers and Rimmer, Edts). Cab International in Association with The British Society of Soil Science. Hlm 155-172.
- Tiunov, A.V., M. Bonkowski, J. Alpei, and S. Scheu. 2001. Microflora, Protozoa and Nematoda in *Lumbricus terrestris* burrow walls: a laboratory experiment. Pedobiologia 45:46-60.