

REKLAMASI LAHAN KRITIS BEKAS PENAMBANGAN EMAS MENGUNAKAN METODE BIOREMEDIASI DAN FITOREMEDIASI

Reclamation of Degraded Land Ex Gold Mining Area using Bioremediation And Phytoremediation Methods

Liswara Neneng¹⁾, Dewi Saraswati²⁾

¹⁾ Program Studi Pendidikan Biologi, Universitas Palangka Raya

²⁾ Jurusan Budidaya Pertanian, Universitas Palangka Raya

Jalan Yos Soedarso, Tunjung Nyaho Palangka Raya, Kalimantan Tengah, Kode Pos: 73112

Email: liswara.neneng@yahoo.com

Abstract

Degraded land caused by gold mining activities in Central Kalimantan requires reclamation efforts, in order to restore of soil conditions, due to the damage of topsoil layer, lack of soil nutrients, and reduced of soil fertility. This research aim was to find an appropriate method of biological reclamation in ex gold mining area, by utilizing a combination of several types of microorganisms and mercury phytoremediator plants. The research is an experiment on a pilot scale at an ex gold mining site in Central Kalimantan. Bioremediation method has used a consortium of local isolates *Klebsiella* sp. and *Pseudomonas* sp., and the phytoremediation method was used *Melastoma* sp. and *Cyperus* sp. Dependent variables were soil mercury concentration and soil nutrients. The results showed the application of consortium microorganisms and mercury phytoremediator, were able to reduce soil mercury concentrations in averages 2.5 ppm, soil nutrient levels increased in averages 33%. These increased soil nutrients consist of potassium in averaged 73%, Mg in average 21%, Na in average 19.5%, and Fe in averaged 71%, when compared to controls. The application of consortium of microorganisms combined with mercury plant phytoremediator type *Melastoma* sp., able more to improve soil conditions in ex gold mining area compared to *Cyperus* sp.

Keywords: bioremediation; microorganism consortium; phytoremediator plant

PENDAHULUAN

Sejumlah ribuan hektar hutan di Kalimantan Tengah telah berubah menjadi lahan kritis bekas tambang yang minim vegetasi, dan hanya mampu ditumbuhi beberapa jenis rumput dan perdu, akibat kegiatan penambangan emas secara liar (PETI). Kegiatan ini sudah berlangsung selama puluhan tahun. Lokasi penambangan selalu berpindah-pindah, dan areal bekas penambangan emas ditinggalkan dan dibiarkan dalam keadaan rusak (Distamben Kalteng, 2003). Sebagian besar penambang emas (85,7%), menggunakan merkuri alam proses ekstraksi emas, dan membuangnya

langsung ke lingkungan baik di darat maupun di di sungai (Neneng, 2007). Dampak yang ditimbulkan berupa rusaknya kelestarian lingkungan dan ekosistem secara umum. Kerusakan tanah yang terjadi disebabkan oleh kegiatan penggalian tanah, dan juga karena penggunaan bahan kimia berbahaya yakni merkuri yang merupakan bahan utama dalam proses ekstraksi emas (BAPEDALDA Prov. Kalteng, 2002).

Data terbaru memperlihatkan bahwa pada tanah dari daerah Bekas penambangan emas di daerah Kalimantan Tengah, yang sudah tidak digunakan selama beberapa tahun, masih ditemukan pencemaran merkuri berkisar antara 2,4 ppm hingga 4,17

ppm (Neneng, 2009). Pencemaran merkuri pada tanah, tidak hanya berbahaya bagi manusia dan makhluk hidup lainnya, juga menyebabkan tidak banyak jenis tumbuhan yang mampu tumbuh di dalamnya.

Reklamasi lahan Bekas penambangan emas, tidak cukup dengan proses revegetasi saja, karena masih mengandung merkuri yang berbahaya bagi makhluk hidup. Tumbuh-tumbuhan maupun komponen biotik lainnya yang mampu hidup pada areal yang masih tercemar merkuri sangat terbatas, karena daya toleransi makhluk hidup yang rendah terhadap merkuri.

Latar belakang ini yang mendorong pentingnya suatu solusi berupa metode yang menggabungkan antara proses dekontaminasi merkuri sekaligus revegetasi lahan. Aplikasi penggabungan metode bioremediasi menggunakan konsorsium mikroorganisme dan tumbuhan fitoremediator yang potensial untuk mengurangi tingkat pencemaran merkuri di lingkungan sangat dibutuhkan, agar dapat mempercepat terjadinya proses dekontaminasi sekaligus pemulihan kondisi lahan-lahan di wilayah daratan yang rusak akibat penambangan emas.

Penelitian ini bertujuan untuk menemukan: 1) konsorsium mikroorganisme dan tumbuhan fitoremediator yang efektif menurunkan kadar merkuri pada lahan kritis bekas tambang emas; 2) efektivitas konsorsium *Pseudomonas* sp. dan *Klebsiella* sp. dan tumbuhan fitoremediator merkuri, untuk meningkatkan unsur hara tanah di lahan bekas tambang emas.

METODE PENELITIAN

Bahan penelitian

Mikroorganisme untuk bioremediasi: *Klebsiella* sp. dan *Pseudomonas* sp. Tumbuhan fitoremediator merkuri: berupa *Cyperus* sp., dan *Melastoma* sp.

Lokasi Penelitian

Aplikasi konsorsium mikroorganisme dan tumbuhan fitoremediator merkuri dilakukan di daerah Hampalit, Kabupaten Katingan, Kalimantan Tengah, yang didominasi oleh areal lahan kritis berpasir Bekas penambangan emas seluas 200 km².

Tahapan Penelitian

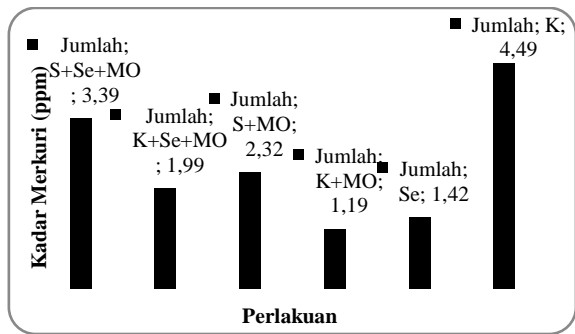
Penelitian ini terdiri dari 2 kegiatan, yakni: 1) implementasi konsorsium mikroorganisme yang berasosiasi dengan tumbuhan fitoremediator pada skala pilot di lapangan; 2) menguji efektivitas beberapa metode reklamasi lahan berpasir bekas penambangan emas, yakni menggunakan metode: a. pengayaan mikroorganisme tanpa seresah; dan b. Pengayaan mikroorganisme + penambahan seresah (sumber karbon). Parameter yang diamati berupa: 1) Konsentrasi merkuri pada lokasi perlakuan, 2) Konsentrasi unsur hara makro dan mikro tanah pada lokasi perlakuan.

Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Pengukuran kadar merkuri menggunakan Merk Shimadzu AA-6200. Pengukuran unsur hara tanah dilakukan menggunakan AAS (*Atomic Absorption Spectrofotometer*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar Hg setelah Aplikasi Bioremediasi dan Fitoremediasi

Perlakuan bioremediasi menggunakan konsorsium *Klebsiella* sp. dan *Pseudomonas* sp., dipadukan dengan fitoremediasi menggunakan tumbuhan karamunting (*Melastoma* sp.), rata-rata mampu menurunkan kadar Hg pada tanah sebesar lebih dari 2,5 ppm atau sebesar rata-rata 26% (Gambar. 1).



Keterangan:

- 1) S : Sampahiring (*Cyperus sp.*)
- 2) Se : Serasah
- 3) K+ : Karamunting (*Melastoma sp.*)
- 4) MO : Mikroorganisme (*Klebsiella sp.*,
Pseudomonas sp.)
- 5) K : Kontrol

Gambar 1. Rerata Kadar Hg pada Lahan Bekas Tambang Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Merkuri merupakan salah satu bentuk logam yang tidak mempunyai manfaat bagi mikroorganisme, juga makhluk hidup secara umum. Beberapa logam, seperti kalsium, kobalt, kromium, copper, besi, potassium, magnesium, mangan, sodium, nikel, dan zink, tergolong ke dalam logam-logam esensial yang bermanfaat penting untuk: mikronutrien dan digunakan dalam proses redoks; menstabilkan molekul melalui interaksi elektrostatik, komponen dari berbagai enzim, dan mengatur tekanan osmotik (Bruins *et al.*, 2000). Merkuri berperan sebaliknya, karena tergolong ke dalam logam non esensial dan berpotensi meracuni mikroorganisme. Merkuri dalam bentuk ion Hg^{2+} dan logam-logam non esensial lain seperti Cd^{2+} , dan Ag^{2+} , cenderung berikatan dengan gugus SH, dan kemudian menghambat aktivitas dan enzim-enzim spesifik (Nies, 1999). Toksisitas logam-logam nonesensial ini terjadi melalui pertukaran tempat logam esensial dari situs pelekatan alaminya atau melalui interaksi ligan. Pada konsentrasi tinggi, baik logam esensial maupun nonesensial dapat merusak membran sel, mengubah spesifikasi enzim, merusak fungsi selular, dan merusak struktur DNA (Bruins *et al.* 2000).

Beberapa mikroorganisme memiliki kemampuan untuk memanfaatkan kontaminan lingkungan sebagai sumber makanan dan sekaligus untuk tumbuh dan berkembang biak di areal kontaminan (Vidali, 2001). Polutan tersebut digunakan sebagai sumber energi, sumber karbon atau akseptor elektron untuk metabolisme mikroorganisme yang bersangkutan. Beberapa bakteri, khamir dan algae mampu mengakumulasi ion logam dalam sel mereka beberapa kali lipat dari konsentrasi logam di lingkungan sekitarnya (Semple, 2003). Peristiwa mutasi dan seleksi turut menghasilkan evolusi pada strain mikroorganisme yang mampu beradaptasi untuk memanfaatkan kontaminan lingkungan, akibatnya mikroorganisme yang memiliki kemampuan untuk memetabolisme kontaminan spesifik, dapat diperoleh pada lokasi yang terkontaminasi (Vidali, 2001).

Isolat bakteri yang dimanfaatkan untuk bioremediasi merkuri pada lahan bekas tambang emas, pada penelitian ini berasal dari jenis *Pseudomonas sp.* dan *Klebsiella sp.* Bakteri *Pseudomonas sp.* adalah bakteri yang memiliki peran penting bagi keseimbangan alam, dan *Klebsiella sp.* yang merupakan kelompok bakteri yang banyak tersebar di alam (Moore *et al.*, 2006; Essa, *et al.*, 2002b). Kedua isolat bakteri ini mampu mengeliminasi merkuri pada media cair menggunakan mekanisme berbeda. Kombinasi mekanisme kerja yang terjadi antara bakteri *Pseudomonas sp.* dan bakteri *Klebsiella sp.*, sebagai berikut: *Pseudomonas sp.* menggunakan reaksi reduksi enzimatis menggunakan enzim merkuri reduktase, yang akan mengubah Hg^{2+} terlarut menjadi Hg^0 yang volatil (Wagner-Döbler *et al.*, 2000), sedangkan *Klebsiella sp.* mampu menghasilkan hidrogen sulfida (H_2S) pada kondisi aerobik, sehingga dapat mengendapkan Hg^{2+} terlarut menjadi HgS yang tidak larut dalam air. Hal ini menyebabkannya dapat dengan mudah dipisahkan dari larutan (Essa, *et al.*, 2002b). Kombinasi mekanisme kerja ini yang menyebabkan proses reduksi merkuri pada

oleh isolat campuran kedua jenis bakteri ini, lebih besar dibandingkan dengan isolat tunggal.

Pada penelitian ini metode bioremediasi dikombinasikan dengan fitoremediasi, menggunakan jenis tumbuhan sampahiring (*Cyperus* sp.) dan karamunting (*Melastoma*, sp.). Fitoremediasi merupakan pemanfaatan tumbuhan untuk menghilangkan polutan dari tanah atau perairan yang terkontaminasi. Semua tumbuhan mampu menyerap logam dalam jumlah yang bervariasi tetapi beberapa tumbuhan mampu mengakumulasi unsur logam tertentu dalam konsentrasi yang cukup tinggi. Cara ini relatif murah dan memungkinkan sumber pencemar didaur ulang. Proses fitoremediasi dapat terjadi melalui beberapa mekanisme antara lain : biodegradasi dalam rizosfer, fitostabilisasi, fitoakumulasi (fitoekstraksi), rizofiltrasi (system hidroponik untuk pembersihan air), fitovolatilisasi, fitodegradasi, pengendalian hidrolis (Brown *et al.*, 1995)

Ada 6 mekanisme utama yang dilakukan oleh tumbuhan untuk proses fitoremediasi, yakni: 1) Stimulasi bioaktivitas mikroorganisme di areal rhizosfer tanaman; 2) Jaringan tumbuhan dapat mengeluarkan enzim yang dapat mengendapkan dan mengikat polutan-polutan aromatik; 3) Enzim-enzim dari tumbuhan dapat mendegradasi senyawa-senyawa organik; 4). Akar tanaman dapat menyerap dan memecahkan senyawa-senyawa organik (*phytostabilization; in situ stabilization*); 5) Adanya hiperakumulasi dari logam berat atau radioaktif yang terjadi di dalam jaringan tumbuhan, yang kemudian digunakan untuk proses remediasi tanah ataupun air (*phytoextraction, rhizofiltration*)

Adanya kandungan merkuri yang dapat dideteksi pada jaringan tumbuhan, dimungkinkan karena terjadinya proses *phytoextraction, rhizofiltration*. Akar tanaman dapat menyerap kontaminan bersamaan dengan penyerapan nutrient dan air. Massa kontaminan tidak dirombak, tetapi diendapkan di bagian trubus dan daun tanaman. Metode ini digunakan terutama

untuk menyerap limbah yang mengandung logam berat.

Peningkatan Unsur Hara Makro Tanah (N, P, K) setelah Implementasi Bioremediasi dan Fitoremediasi

Unsur hara yang penting untuk tanaman adalah nitrogen, posfor, dan kalium yang memiliki kegunaan yaitu: nitrogen untuk merangsang pertumbuhan tanaman terutama batang, cabang, dan daun. Selain itu juga pertumbuhan klorofil, protein, lemak dan senyawa organik lainnya. Posfor untuk merangsang akar, bunga, buah dan biji. Kalium untuk memperkuat tubuh tanaman agar tidak mudah roboh serta bunga dan buah tidak mudah gugur.

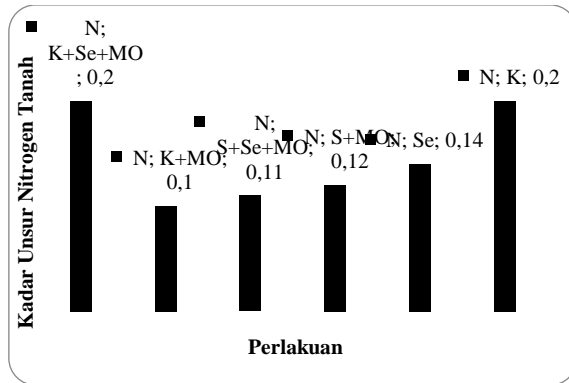
Unsur hara makro yang dianalisis adalah kandungan nitrogen, posfor, dan kalium. Dari 3 jenis unsur hara yang diuji, kandungan posfor dan kalium meningkat setelah diberi perlakuan bioremediasi dan fitoremediasi. Peningkatan posfor rata-rata sebesar 33% dibandingkan kontrol (Gambar 5), sedangkan peningkatan kandungan kalium rata-rata sebesar 73% (Gambar 6). Pada penelitian ini, kandungan unsur hara nitrogen tidak mengalami peningkatan.

Kesuburan tanah bergantung pada kondisi fisik, kimiawi, dan biologis tanah. Kondisi fisik tanah meliputi kedalaman efektif, tekstur, struktur, kelembaban, dan tata udara tanah. Kondisi kimiawi tanah meliputi: reaksi tanah (pH tanah), KTK, kejenuhan basa, bahan organik, banyaknya unsur hara, cadangan unsur hara, dan ketersediaan hara bagi tanaman. Kondisi biologis tanah meliputi: aktivitas mikrobia perombak bahan organik dalam proses humifikasi, dan pengikatan nitrogen bebas dari udara. Evaluasi kesuburan tanah dapat dilakukan melalui beberapa cara, yaitu melalui pengamatan gejala defisiensi pada tanaman secara visual.

Kandungan Unsur Hara Nitrogen (N)

Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kandungan nitrogen pada tanah lahan

Bekas tambang emas rata-rata 2%, sedangkan data standard unsur hara N pada tanah subur umumnya mengandung unsur N rata-rata sebesar 2,5 % (Gambar 4).



Gambar 4. Rerata Kadar Unsur Nitrogen Tanah Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Ketersediaan N bagi tanaman berhubungan dengan nisbah C/N yang tinggi sehingga yang diserap tanaman terbatas. Salah satu ciri bahan organik yang sukar terdekomposisi adalah nisbah C/N yang tinggi. Nisbah C/N yang tinggi ditunjukkan dengan nilai karbon C dalam jumlah tinggi, akibatnya akan menekan pertumbuhan mikroorganisme yang selanjutnya bahan organik sukar terdekomposisi.

Unsur N merupakan bagian dari semua sel hidup dan merupakan bagian penting dari semua protein, enzim dan proses metabolisme yang terlibat dalam sintesis dan transfer energi. Nitrogen merupakan bagian dari klorofil, pigmen hijau dari tanaman yang bertanggung jawab untuk fotosintesis. Membantu tanaman dengan pertumbuhan cepat, benih meningkat dan produksi buah dan meningkatkan kualitas dan produksi tanaman daun. Nitrogen sering berasal dari aplikasi pupuk dan dari udara (legum mendapatkan mereka N dari air, suasana atau curah hujan berkontribusi sedikit nitrogen sangat).

Nitrogen (N) merupakan hara makro utama yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman. Kandungan nitrogen dalam tanaman 1-4% dari berat

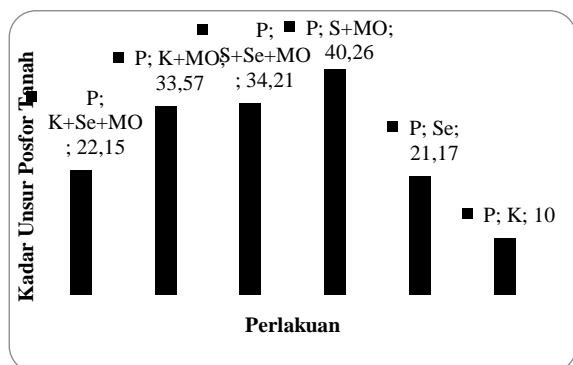
kering tanaman. Tanaman dapat mengambil N dalam bentuk ammonium (NH_4^+) atau nitrat (NO_3^-) dan bersenyawa dengan persenyawaan karbon untuk membentuk persenyawaan asam amino dan protein. Pada netral (di dekat pH 7), mikroba konversi pH NH_4^+ untuk nitrat (nitrifikasi) cepat, dan umumnya tanaman mengambil nitrat. Pada tanah asam (pH <6), nitrifikasi lambat, dan tanaman dengan kemampuan untuk mengambil NH_4^+ mungkin memiliki keuntungan.

Salah satu faktor penting unsur N adalah pengaruhnya terhadap karbohidrat di dalam tanaman. Hal ini terjadi bilamana unsur hara N disuplai dalam jumlah besar maka akan menurunkan level karbohidrat. Tetapi jika suplai N terbatas sekali, maka level karbohidrat di dalam tanaman akan meningkat. Dengan demikian penggunaan unsur N akan berpengaruh langsung terhadap sintesis karbohidrat didalam sel tanaman dan selanjutnya akan berpengaruh terhadap ketegaran (vigor) tanaman (Nyakpa, dkk, 1988). Tanaman yang kekurangan N akan menyebabkan tanaman tumbuh kerempeng dan tersendat-sendat. Daun menjadi hijau muda, terutama daun yang sudah tua, lalu berubah menjadi kuning. Selanjutnya daun mengering mulai dari bawah ke bagian atas. Jaringan-jaringannya akan mati, mengering lalu mengeras.. Unsur hara N umumnya bersifat higroskopis, reaksi kerjanya cepat, mudah tercuci dan mudah terbakar oleh sinar matahari (Lingga dan Marsono, 2000)

Tanaman yang kekurangan N menunjukkan gejala daun mengecil berwarna pucat sampai hijau kekuningan. Jika kronis atau kekurangan Nitrogen berkelanjutan, warna daun menjadi cokelat kekuningan dan kering; tanaman kerdil dan produksi kurang serta memanjangnya akar tidak normal; daun-daun sebelah bawah tampak hangus dan mati sebelum waktunya. Sementara itu ujung tanaman tetap hijau muda.

Kandungan Unsur Hara Posfor (P)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitomerediasi menyebabkan kandungan rata-rata unsur P dalam tanah meningkat lebih dari 100% dibandingkan kontrol (Gambar 5).



Gambar 5. Rata-rata Kadar Unsur Posfor Tanah Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Fitoremediasi dan Bioremediasi

Data standard unsur hara posfor (P) pada tanah subur umumnya mengandung unsur P rata-rata sebesar 16,21 ppm. Unsur P merupakan unsur hara yang sangat stabil didalam tanah sehingga kelarutannya sangat rendah. Unsur P diserap oleh tanaman dalam bentuk ion $H_2PO_4^{2-}$ dan HPO_4^{2-} . Secara umum P tanah dapat dibedakan atas P-organik dan P-anorganik. Namun pupuk P mudah terikat oleh logam-logam seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} yang akibatnya setiap pemupukan P akan menyebabkan penimbunan P dalam tanah berupa P tidak larut (Nyakpa, dkk, 1988). Unsur hara P yang terkandung dalam tanaman sekitar 0,1-0,4% dari berat kering tanaman. Unsur hara ini diperlukan untuk pembelahan sel dan perkembangan jaringan tanaman yang membentuk titik tumbuh tanaman. Unsur P juga memacu dan memperkuat pertumbuhan tanaman dewasa umumnya dan meningkatkan produksi biji-bijian. Pembentukan inti sel, berperan dalam pembelahan sel dan perkembangan jaringan meristematik (Sutedjo dan Kartasapoetra, 1991)

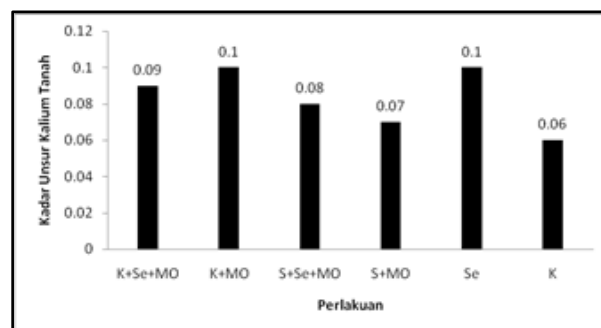
Umumnya tanah memerlukan posfor. Tanah akan lebih cepat kritis jika kekurangan posfor daripada kekurangan

nitrogen Hal ini disebabkan mikroba dalam tanah masih dapat mengikat nitrogen yang tersedia untuk tanaman. Posfor kelarutannya rendah, tetapi posfor tidak mudah tercuci, sementara itu nitrogen mudah tercuci. Tanaman yang kekurangan P, pertumbuhan terhambat, daunnya berubah warna ke lewat tua dan sering tampak mengkilap kemerahan. Tepi daun cabang serta batang terdapat warna merah ungu yang lambat laun berubah menjadi kuning, Tanaman kadang tinggi dan kurus (Pracaya, 2007).

Penyebab kekurangan posfor antara lain terjadi persaingan pengambilan posfor didalam tanah antara tanaman dengan mikroorganisme dan didalam tanah terjadi kekurangan air (Pracaya, 2007).

Kandungan Unsur Hara Kalium (K)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitomerediasi menyebabkan kandungan rata-rata unsur K dalam tanah meningkat sebesar 46% dibandingkan kontrol (Gambar 6).



Gambar 6. Rerata Kadar Kalium Tanah Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Data standard unsur hara K pada tanah subur umumnya mengandung unsur K rata-rata sebesar 0,4 me/100 g, diambil dan diserap tanaman dalam bentuk: K+Kalium (K) Berfungsi dalam proses fotosintesa, pengangkutan hasil asimilasi, enzim dan mineral termasuk air. meningkatkan daya tahan/kekebalan tanaman terhadap penyakit, membantu pembentukan protein dan karbohidrat, berperan memperkuat

tubuh tanaman, mengeraskan jerami dan bagian kayu tanaman, agar daun, bunga dan buah tidak mudah gugur, meningkatkan daya tahan tanaman terhadap kekeringan dan penyakit, meningkatkan mutu dari biji/buah.

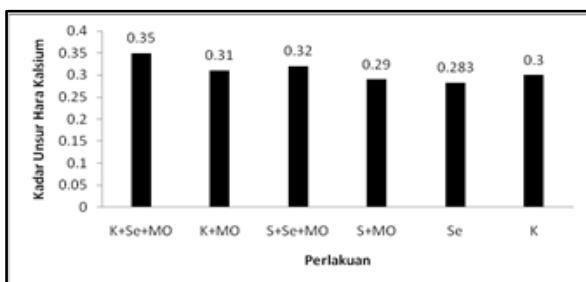
Tanaman yang kekurangan unsur K memiliki gejala: batang dan daun menjadi lemas/rebah, daun berwarna hijau gelap kebiruan tidak hijau segar dan sehat, ujung daun menguning dan kering, timbul bercak coklat pada pucuk daun.

Data Unsur Hara Mikro Tanah

Unsur hara mikro tanah yang dianalisis adalah unsur hara kalsium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), dan besi (Fe). Jenis unsur hara Mg, Na, dan Fe rata-rata mengalami peningkatan setelah diberi perlakuan bioremediasi menggunakan gabungan isolat *Klebsiella* sp. dan *Pseudomonas* sp. dikombinasikan dengan tumbuhan fitoremediator. Unsur hara Mg rata-rata meningkat sebesar 21% setelah perlakuan fitoremediasi dan bioremediasi (Gambar 8), unsur hara Na rata-rata sebesar 19,5%, unsur hara Fe rata-rata sebesar 71% (Gambar 9), sedangkan unsur hara Ca tidak mengalami peningkatan setelah diberikan perlakuan (Gambar 7).

Kandungan Unsur Hara Kalsium (Ca)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitoremediasi tidak menyebabkan kandungan rata-rata unsur Ca dalam tanah meningkat dibandingkan kontrol (Gambar 7).



Gambar 7. Rerata Kadar Unsur Hara Kalsium Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah

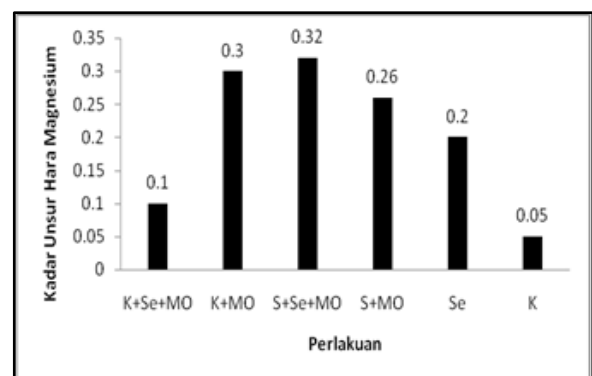
Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Data standard unsur hara Ca pada tanah subur umumnya mengandung unsur Ca rata-rata sebesar 8 me/100 g. Unsur hara kalsium diserap dalam bentuk ion Ca^{2+} . Fungsi ion Kalsium yang penting adalah mengatur permeabilitas dari dinding sel. Peranan yang penting dari kalsium terdapat pada pertumbuhan ujung-ujung akar dan pembentukan bulu-bulu akar. Bila kalsium ditiadakan maka pertumbuhan keduanya akan terhenti, dan bagian-bagian yang telah terbentuk akan mati dan berwarna coklat kemerah-merahan.

Peran penting lainnya dari kalsium adalah: memperkeras batang tanaman dan menetralkan asam-asam organik yang dihasilkan pada saat metabolisme. Kalsium yang terdapat dalam batang dan daun dapat menetralkan senyawa atau suasana keasaman tanah.

Kandungan Unsur Hara Magnesium (Mg)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitoremediasi menyebabkan kandungan rata-rata unsur Mg dalam tanah meningkat sebesar 21% dibandingkan kontrol (Gambar 8).



Gambar 8. Rerata Kadar Unsur Hara Magnesium Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

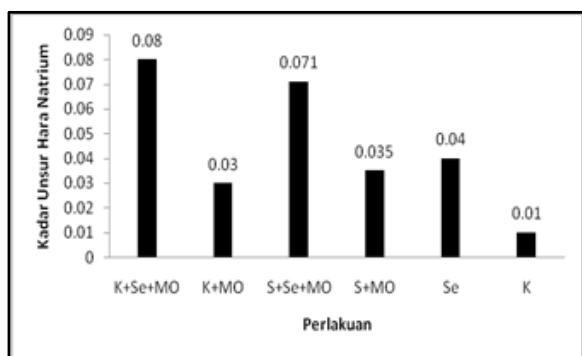
Berdasarkan data standard unsur hara Mg pada tanah subur umumnya mengandung unsur Mg rata-rata sebesar 1,6

me/100 g. Bentuk senyawa yang diambil dan diserap oleh tanaman adalah: Mg^{2+} , dan merupakan bagian dari hijau daun yang tidak dapat digantikan oleh unsur lain, kecuali didalam hijau daun Mg terdapat sebagai ion didalam air sel. Walaupun zat mineral ini diserap tanaman dalam jumlah yang sedikit jika dibandingkan dengan zat mineral makro lain (diantaranya N, P dan Ca), Mg dalam bentuk Mg^{2+} mempunyai peranan penting dalam penyusunan klorofil.

Menurut G. H. Collings (1955) kadar magnesium dari klorofil tanaman adalah 2,7 persen. Fungsi magnesium bagi tanaman adalah: a) Magnesium merupakan bagian tanaman dari klorofil; b) Merupakan salah satu bagian enzim yang disebut organic pyrophosphatase dan carboxy peptisida; c) Berperan dalam pembentukan buah.

Kandungan Unsur Hara Natrium (Na)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitomerediasi menyebabkan kandungan rata-rata unsur Na dalam tanah meningkat sebesar 19,5% dibandingkan kontrol (Gambar 9).



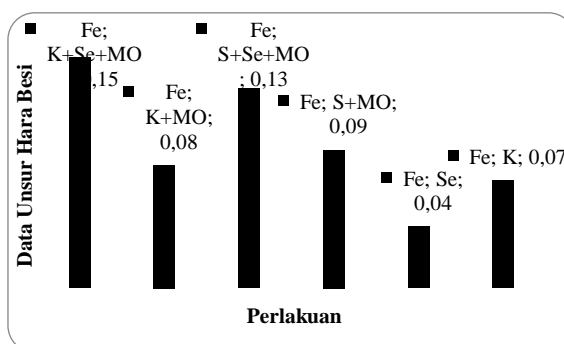
Gambar 9. Rerata Kadar Unsur Hara Natrium Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Data standar unsur hara Na pada tanah subur umumnya mengandung unsur Na rata-rata sebesar 0,5 me/100 g. Natrium berperan penting untuk memperbaiki pertumbuhan tanaman, apabila tanaman yang dimaksud menunjukkan gejala kekurangan Kalium (K). Natrium bekerja

untuk menghalangi atau mencegah pengambilan atau penyerapan K yang berlebihan.

Kandungan Unsur Hara Besi (Fe)

Hasil implementasi bioremediasi dan fitomerediasi menyebabkan kandungan rata-rata unsur Fe dalam tanah meningkat sebesar 71% dibandingkan kontrol (Gambar 10).



Gambar 10. Rata-rata Kadar Unsur Hara Besi Pada Lahan Bekas Penambangan Emas setelah Perlakuan Bioremediasi dan Fitoremediasi

Zat besi (Fe) merupakan unsur mikro yang diserap dalam bentuk ion ferri (Fe^{3+}) ataupun ferro (Fe^{2+}). Mineral Fe antara lain olivin ($(Mg,Fe)_2SiO_4$), pirit, siderit ($FeCO_3$), gutit ($FeOOH$), magnetit (Fe_3O_4), hematit (Fe_2O_3) dan ilmenit ($FeTiO_3$). Besi dapat juga diserap dalam bentuk khelat (ikatan logam dengan bahan organik), sehingga pupuk Fe dibuat dalam bentuk khelat. Khelat Fe yang biasa digunakan berupa Fe-EDTA, Fe-DTPA. Fe dalam tanaman sekitar 80%, terdapat dalam kloroplas atau sitoplasma. Penyerapan Fe lewat daun lebih cepat dibandingkan dengan penyerapan lewat akar, terutama pada tanaman yang mengalami defisiensi Fe. Hal ini menyebabkan pemupukan lewat daun sering diduga lebih ekonomis dan efisien. Fungsi Fe antara lain sebagai penyusun klorofil, protein, enzim, dan berperan dalam perkembangan kloroplas.

Fungsi lain Fe adalah sebagai pemindah elektron dalam proses metabolisme. Proses tersebut antara lain

melalui reduksi N₂, reduktase sulfat, reduktase nitrat. Kekurangan Fe menyebabkan terhambatnya pembentukan klorofil, dan juga menyebabkan penyusunan protein menjadi tidak sempurna. Defisiensi Fe menyebabkan kenaikan kadar asam amino pada daun dan penurunan jumlah ribosom secara drastis, dan akan mengakibatkan pengurangan aktivitas semua enzim.

Penelitian ini dimaksudkan sebagai bagian dari upaya untuk reklamasi lahan bekas tambang emas, yang tersebar di berbagai wilayah Indonesia, terutama di Kalimantan. Upaya untuk meningkatkan kesuburan tanah saja, tidak cukup jika tidak diintegrasikan dengan upaya untuk mengurangi kontaminan merkuri yang terdapat di dalam tanah.

Hasil implementasi perpaduan bioremediasi dan fitoremediasi melalui penelitian ini, tidak saja mampu untuk mengurangi konsentrasi merkuri di dalam tanah, tetapi sekaligus juga mampu meningkatkan unsur hara tanah. Hal ini dapat terjadi karena aplikasi mikroorganisme yang digunakan, memiliki kemampuan untuk proses dekomposisi bahan organik maupun anorganik yang terdapat di dalam tanah.

KESIMPULAN

Aplikasi konsorsium mikroorganisme berupa gabungan isolat *Klebsiella* sp. dan *Pseudomonas* sp. yang dipadukan dengan tumbuhan fitoremediator merkuri mampu menurunkan Hg tanah sebesar rata-rata 2,5 ppm, meningkatkan unsur hara posfor rata-rata sebesar 33%, kalium 73%, Mg 21%, Na 19,5%, dan Fe 71%. Aplikasi konsorsium mikroorganisme dipadukan dengan tumbuhan fitoremediator merkuri dari jenis *Melastoma* sp., lebih mampu memperbaiki kondisi tanah dibandingkan tumbuhan *Cyperus* sp. Penambahan serasah pada metode bioremediasi dan fitoremediasi, dapat meningkatkan kandungan unsur hara dan jumlah populasi mikroorganisme tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- APHA. (1988). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Ed. 20.3111 B. USA: American Public Health Association. APHA Washington DC.
- Argonne. (2007). *Phytoremediation of Soil and Groundwater*. Environmental Science Division. A.U.S. Department of Energy Laboratory. Chicago Argonne. LLC. <http://www.evs.anl.gov> [28 Oktober 2008].
- Colomé, J. S., Kubinski, A. M., Cano, R. J., & Grady, D. V. (1986). *Laboratory exercises in microbiology* (No. 576 C692-1). New York, US: West Publishing, 1986.
- EPA. (2005). *A Citizen's Guide to Phytoremediation*. <http://www.cluin.org> or <http://www.epa.gov> [28 Oktober 2008].
- Hidayati, N. (2005). Fitoremediasi dan potensi tumbuhan hiperakumulator. *Hayati Journal of Biosciences*, 12(1), 35-40.
- Hofman & Anne. (2006). *Phytoremediation Rhizoremediation*. Diakses dari <http://www.engg.ksu.edu>
- Moore, C. J. (2000). A review of mercury in the environment:(its occurrence in marine fish). *South Carolina State Documents Depository*.
- Neneng, L. (2006). *Karakterisasi dan Identifikasi Bakteri Pereduksi Merkuri dari Sungai Kahayan Kalimantan Tengah*. [Penelitian Mandiri].
- Neneng, L. (2007). *Uji Efektivitas Bioremediasi Merkuri Oleh Isolat Bakteri Pereduksi Merkuri dalam Bioreaktor Sederhana*. [Penelitian Mandiri].
- Neneng, L. (2007). *Pengaruh Kondisi Lingkungan Terhadap Efektivitas Bioremediasi Merkuri oleh Isolat Bakteri dan Sosialisasi Aplikasinya dalam Bioreaktor Sederhana kepada Penambang Emas di DAS Kahayan Kalimantan Tengah*. [Disertasi]. Tidak

dipublikasikan. Program Pascasarjana
Universitas Negeri Malang.

Neneng, L. (2008). Eksplorasi Isolat Bakteri
Potensial untuk Bioremediasi Merkuri
(Hg) dari Areal Penambangan Emas di
Sungai Kahayan Kalimantan Tengah.
Jurnal Agritek. 16: 189 – 194.

Portier, R. J. (1991). Application of Adapted
Microorganisms for Site Remediation
of Contaminated Soil and Ground
Water. *Dalam* A. M. Martin (Ed.),
Biological Degradation of Wastes
(hlm. 247-259). London: Elsevier
Applied Science.

SBIR Success Stories. (2006).
*Phytoremediation of Arsenic-
Contaminated Soils*. Edenspace
system Corporation.
<http://www.edenspace.com> [28
Oktober 2008].

Suhendrayatna. (2001). *Bioremoval Logam
Berat dengan Menggunakan
Mikroorganisme: suatu Kajian
Kepustakaan*. [Makalah]. Disajikan
dalam *Seminar on-Air Bioteknologi
untuk Indonesia Abad 21*, Kerjasama
antara Sinergy Forum dan PPI Tokyo
Istitute of Technology. 1-14 Februari.

Wagner-Döbler, I., Von Canstein, H., Li, Y.,
Timmis, K. N., & Deckwer, W. D.
(2000). Removal of mercury from
chemical wastewater by
microorganisms in technical
scale. *Environmental science &
technology*, 34(21), 4628-4634.

Waite, S. 2000. *Statistical Ecology in
Practice: A Guide to Analysing
Environmental and Ecological Field
Data*. Prentice Hall.