

Kajian Fitoremediasi untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas

Koesma Nurina Ghassani dan Harmin Sulistiyaning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ghaishghassani1998@gmail.com

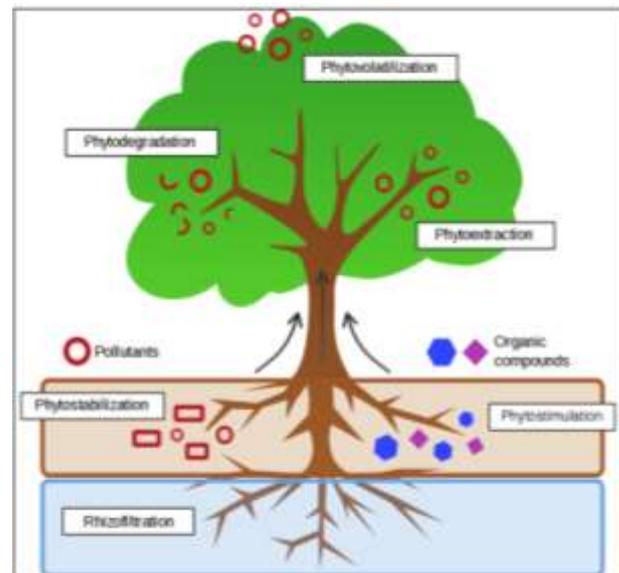
Abstrak—Banyaknya pengalihan fungsi lahan menjadi kawasan industri pertambangan, dimana pembangunan industri tersebut berdampak positif dan juga berdampak negatif bagi pembangunan pertanian, antara lain yaitu jika pembuangan limbah industri tidak melalui pengolahan terlebih dahulu (IPAL), hasil pembuangan limbahnya berpotensi untuk mencemari lingkungan, khususnya terhadap tanah-tanah pertanian, diantaranya adalah logam berat, yang berpotensi terhadap pencemaran lingkungan pertanian, yaitu Merkuri (Hg), Timbal (Pb), Kadmium (Cd), Krom (Cr), Tembaga (Cu), Seng (Zn), Kobalt (Co), dan Nikel (Ni). Oleh karena itu, perlu dicari alternatif penanggulangannya melalui penelitian rehabilitasi lahan. Penyingkiran polutan logam berat menggunakan metode fitoremediasi dengan mekanisme fitoekstraksi menggunakan tumbuhan hiperakumulator yang mampu mengikat Merkuri (Hg) secara cepat dan tepat. Jenis tumbuhan yang digunakan adalah Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) pada fitoremediasi *in-situ* dan *ex-situ* secara *single plant species*. Sedangkan tumbuhan yang digunakan untuk fitoremediasi *ex-situ* secara *mixed plants species* adalah Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) dan Rumput Gajah Kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*). Presentase keberhasilannya berada diantara 90-100%.

Kata Kunci—Fitoremediasi, Kacang Kalopo, Logam Berat, Rumput Gajah Kate, Tambang Emas.

I. PENDAHULUAN

ALIH fungsi lahan area pertanian menjadi kawasan industri pertambangan emas merupakan awal terjadinya pencemaran lingkungan. Pencemaran lingkungan pertanian menyebabkan menurunnya kualitas dan kuantitas produk pertanian. Pembuangan limbah industri, yang belum mempunyai pengolahan limbah tempat untuk pembuangan (IPAL), sebagai sumber kerusakan sumberdaya lahan pertanian. Salah satu jenis limbah yang potensial merusak lingkungan adalah jenis yang termasuk dalam Bahan Beracun Berbahaya (B3), diantaranya logam berat. Logam berat yang terdapat di lingkungan pertanian berpengaruh negatif karena beracun dalam seluruh aspek kehidupan makhluk hidup. Walaupun pada konsentrasi yang rendah, ion logam berat dapat berpengaruh langsung pada kesehatan manusia karena terakumulasi pada rantai makanan. Seperti sumber-sumber polusi lingkungan lainnya, logam berat dapat ditransfer ke area yang sangat jauh di lingkungan, selanjutnya berpotensi mengganggu kehidupan biota lingkungan dan pada akhirnya berpengaruh terhadap kesehatan manusia walaupun dalam jangka waktu yang lama dan jauh dari sumber polusi utamanya [1].

Hasil penelitian yang dilakukan terhadap tanah pada lahan pertanian di sekitar kawasan industri pertambangan emas, juga menunjukkan bahwa kadar Hg dalam tumbuhan sangat



Gambar 1. Ilustrasi proses fitoremediasi polutan.

tinggi. Kandungan Hg dalam tanah tersebut telah mencapai angka 6,73 ppm dan kadar dalam jerami dan beras berturut-turut mencapai angka 5,34 ppm dan 0,43 ppm Tim Penelitian Baku Mutu Tanah Puslittanak (2000). Nilai ambang batas kandungan Hg dalam tanah sawah menurut baku mutu tanah untuk penggunaan pertanian yaitu sebesar 0,5 ppm [2]. Sedangkan ambang batas cemaran Hg dalam makanan (tepung dan hasil olahannya) yang diizinkan adalah sebesar 0,05 ppm [3]. Pemberian Bahan Organik yang dikombinasikan dengan pencucian bisa menurunkan kandungan Hg dalam beras sampai dibawah batas ambang. [2].

Fitoremediasi adalah suatu metode yang dapat digunakan untuk membersihkan/mengangkut pencemaran adalah dengan memperkerjakan tumbuhan yang memiliki kemampuan sangat tinggi untuk mengangkut berbagai pencemaran yang ada (*multiple uptake hyperaccumulator plant*) ataupun tumbuhan yang memiliki kemampuan mengangkut pencemaran yang bersifat tunggal (*specific uptake hyperaccumulator plant*). Tumbuhan memiliki kemampuan untuk menyerap ion-ion dari lingkungannya ke dalam tubuh melalui membran sel. Dua sifat penyerapan ion oleh tumbuhan adalah: 1) faktor konsentrasi; kemampuan tumbuhan dalam mengakumulasi ion sampai tingkat konsentrasi tertentu, bahkan dapat mencapai beberapa tingkat lebih besar dari konsentrasi ion di dalam mediumnya, 2) perbedaan kuantitatif akan kebutuhan hara yang berbeda pada tiap jenis tumbuhan. Serta perbaikan kualitas lahan tercemar logam berat menggunakan tumbuhan hiperakumulator merupakan metode perlakuan yang paling murah



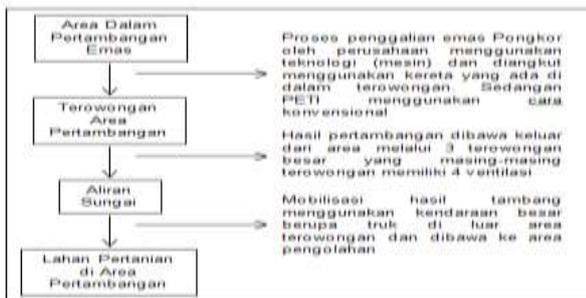
Gambar 2. Ilustrasi proses fitoekstraksi pada tumbuhan.



Gambar 3. Area pertanian sekitar pertambangan pongkor.



Gambar 4. Terowongan pertambangan emas pongkor pt antam Tbk. ubpe pongkor.



Gambar 5. Diagram alir proses pertambangan emas dalam menghasilkan merkuri (hg).

dibandingkan perlakuan lain [4].

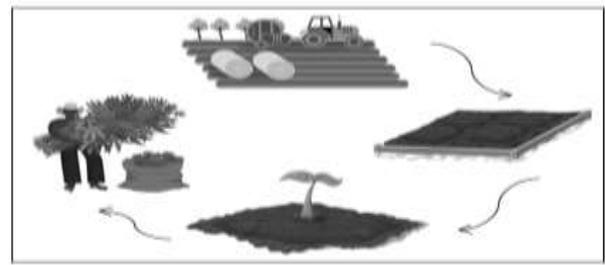
II. METODE PENELITIAN

A. Kajian Pustaka

Kajian pustaka dilakukan dengan melakukan penelusuran bagian referensi yang berkaitan dengan masalah pencemaran logam berat pada lahan pertanian di kawasan industri. Selain itu dilakukan kajian referensi yang berkaitan dengan fitoremediasi pencemaran logam berat dengan menggunakan tumbuhan. Hasil penelusuran pustaka ini dilakukan untuk penyusunan kembali menggunakan bahasa penulis. Adapun jenis pustaka yang dipelajari, yaitu buku teks, jurnal, laporan penelitian, laporan seminar/proceeding, dan buletin.

1) Pencemaran Tanah Oleh Logam Berat

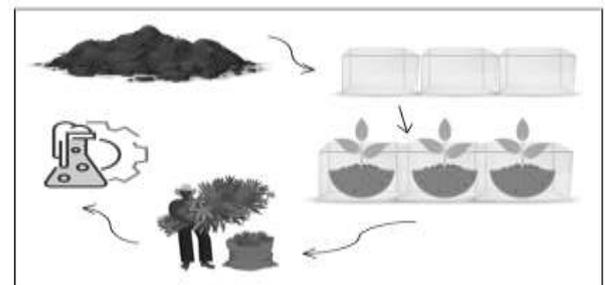
Ketika suatu zat berbahaya/beracun telah mencemari permukaan tanah, maka ia dapat menguap, tersapu air hujan



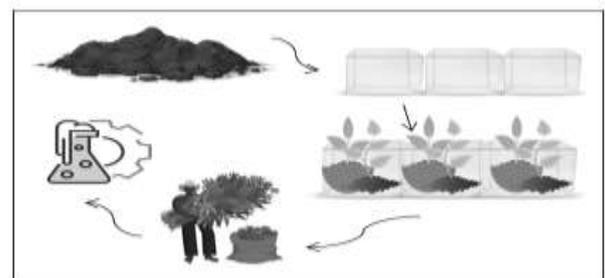
Gambar 6. Sketsa fitoremediasi secara *in-situ* dengan *single plant species*.



Gambar 7. Rektor dalam rumah kaca sederhana yang digunakan dalam proses fitoremediasi secara *ex-situ*.



Gambar 8. Sketsa fitoremediasi secara *ex-situ* dengan *single plant species*.



Gambar 9. Sketsa fitoremediasi secara *ex-situ* dengan *mixed plants species*.

dan atau masuk ke dalam tanah. Pencemaran yang masuk ke dalam tanah kemudian terendap sebagai zat kimia beracun di tanah. Zat beracun di tanah tersebut dapat berdampak langsung kepada manusia ketika bersentuhan atau dapat mencemari air tanah dan udara di atasnya.

Para penambang emas tradisional menggunakan merkuri untuk menangkap dan memisahkan butir-butir emas dari butir-butir batuan. Endapan Hg ini disaring menggunakan kain untuk mendapatkan sisa emas. Selain itu, komponen merkuri juga banyak tersebar di karang, tanah, udara, air, dan organisme hidup melalui proses fisik, kimia, dan biologi yang kompleks. Merkuri dapat terakumulasi di lingkungan dan dapat meracuni hewan, tumbuhan, dan mikroorganisme. Senyawa Hg organik yang paling umum adalah methyl mercury, suatu zat yang dapat diserap oleh sebagian besar organisme dengan cepat dan diketahui berpotensi

Tabel 1.
Baku Mutu Logam Berat Merkuri (Hg) pada Tanah

Negara	Konsentrasi Minimum (mg/kg)	Konsentrasi Maksimum (mg/kg)
Cina	0,003	150.000
Cina	0,030	1.350
Belgium	0,030	4.190
Amerika Serikat	<0.010	56.400
Malaysia	0,002	0,860
Thailand	0,010	0.270
Eropa	<0,003	1.600

Tabel 2.
Analisis Tanah Awal di Pertambangan Pongkor

Analisis Tanah	Nilai	Kriteria*
Tekstur :		
- Pasir (%)	19	*
- Debu (%)	46	*
- Liat (%)	35	*
pH :		
- H ₂ O	4,6	Masam
- KCl	4,2	*
Bahan organik :		
- C (%)	1,34	Rendah
- N (%)	0,14	Rendah
- C/N (%)	10	Rendah
HCl 25% (mg/100g)		
- P ₂ O ₅	87	Sangat Tinggi
- K ₂ O	22	Sedang
Total Hg (ppm)	38,11	Sangat Tinggi**

Tabel 3.
Kandungan Logam Berat dalam Tanah Secara Alamiah (µg/g)

Logam	Rerata (µg/kg)	Kandungan	Kisaran Non Populasi
As	100		5 – 3000
Co	8		1 – 40
Cu	20		2 – 3000
Pb	10		2 – 2000
Zn	50		10 – 300
Cd	0,06		0,05 – 0,7
Hg	0,03		0,01 – 0,3

menyebabkan toksisitas terhadap sistem saraf pusat.

Pada lokasi penambangan emas ditemukan merkuri dalam bentuk merkuri (Hg⁰), merkuri monovalen (Hg¹⁺), dan merkuri bivalen (Hg²⁺). Dimana di lokasi pertambangan tersebut terjadi proses pengolahan biji emas yang mana menggunakan proses amalgamasi (penggilingan) dan proses pembentukan amalgam di dalam amalgamator (tromol). Proses pengolahan tromol adalah material yang tercecer pada proses penggilingan ditampung dalam bak penampung, lalu diolah kembali hingga tidak terkandung emas. Setelah dipastikan kandungan emas tidak terdeteksi para penambang akan membuang ke tanah dan aliran sungai sekitar lokasi pertambangan walaupun diketahui kandungan merkuri masih ada. Dimana keseluruhan proses diatas dilakukan di dekat sungai untuk mempermudah pembuangan limbah.

2) Fitoremediasi

Fitoremediasi adalah teknologi untuk memperbaiki suatu lahan dengan menggunakan tumbuhan [5]. Salah satu mekanisme pengikatan logam berat dalam tanah oleh tumbuhan pengikat logam dilakukan melalui penyerapan. Disimpulkan bahwa fitoremediasi merupakan alternatif teknologi pengolahan tanah tercemar yang ramah lingkungan, efektif, dan mempunyai biaya yang lebih rendah dibandingkan pengolahan lainnya. Tumbuhan yang

Tabel 4.
Kelebihan dan Kekurangan Fitoremediasi *In-situ* dan *Ex-situ*

Metode	Kelebihan	Kekurangan
<i>In-situ</i>	1. Mengurangi gangguan terhadap lokasi 2. Pengolahan pencemaran yang lebih dalam 3. Kontak yang minimal dengan cemaran volatil 4. Mengurangi biaya transpor	1. Diperlukan data geohidrologi 2. Pengendalian kondisi reaksi dan hasil akhir yang sulit 3. Monitoring yang lebih hati-hati 4. Perlu rekayasa lebih lanjut untuk suplai O ₂ dan nutrient
<i>Ex-situ</i>	1. Optimasi kondisi pengolahan 2. Pengendalian proses 3. Pengolahan lebih cepat 4. Mikroorganisme khusus dapat diimplementasikan	1. Diperlukan kegiatan pemindahan bahan pencemar 2. Biaya yang diperlukan cukup mahal 3. Materi volatil kurang terkontrol pada saat kegiatan pemindahan limbah

Tabel 5.
Kandungan Hg dalam Sampel Akar dan Daun Tumbuhan Kacang Kalopo serta Media Tanam

Kode Sampel	Waktu Kontak (hari)	Hasil Tumbuhan	Reduksi	Kandungan Hg (mg/kg)
R ₀	0	-		8,4200
T ₁	30	1,6229		1,9284
A ₁	30	1,1666		3,7538
D ₁	30	0,5765		6,1140
T ₂	40	0,4524		0,1188
A ₂	40	0,4265		2,0478
D ₂	40	0,2666		5,0476
T ₃	50	0,0122		0,0702
A ₃	50	0,0058		2,0247
D ₃	50	0,0097		5,0087

Tabel 6.
Kandungan Hg dalam Sampel Akar dan Daun Tumbuhan Kacang Kalopo dan Rumput Gajah Kate serta Media Tanam

Kode Sampel	Waktu Kontak (hari)	Hasil Tumbuhan	Reduksi	Kandungan Hg (mg/kg)
R ₀	0	-		8,4200
T ₁	30	1,6332		1,8874
A ₁	30	1,5766		2,1135
D ₁	30	1,0178		4,3490
T ₂	40	0,4461		0,1032
A ₂	40	0,2039		1,2981
D ₂	40	0,2905		3,1872
T ₃	50	0,0250		0,0032
A ₃	50	0,2958		0,1149
D ₃	50	0,1620		2,5393

digunakan untuk proses fitoremediasi mempunyai bentuk yang beraneka ragam, baik yang berwujud seperti alang-alang maupun membentuk jalinan berupa rumput. Tumbuhan hiperakumulator merupakan tumbuhan yang dapat hidup pada keadaan dimana konsentrasi logam berat yang tinggi, tumbuhan ini juga dapat menyerap logam dalam tanah (Gambar 1).

3) Fitoekestaksi

Metode fitoremediasi dengan menggunakan mekanisme fitoekestaksi merupakan penyerapan kontaminan/polutan oleh akar tumbuhan dan translokasi atau akumulasi senyawa itu ke bagian tumbuhan seperti akar, daun atau batang. Tumbuhan tersebut dinamakan tumbuhan hiperakumulator. Setelah polutan terakumulasi, tumbuhan dapat dipanen dan

tumbuhan tersebut tidak boleh dikonsumsi tetapi harus dimusnahkan dengan insinerator atau ditimbun dalam landfill.

Fitoekstraksi juga disebut fitoakumulasi, mengacu pada serapan dan translokasi kontaminan logam di dalam tanah oleh akar tanaman. Fitoekstraksi terutama digunakan untuk tanah yang terkontaminasi [6]. Untuk menghilangkan kontaminasi dari tanah, pendekatan ini menggunakan tanaman untuk menyerap, memusatkan, dan mengendapkan logam beracun dari tanah yang terkontaminasi ke dalam biomassa di atas tanah (pucuk, daun, dan anggota tumbuhan lainnya). Ada beberapa keuntungan dari fitoekstraksi [7-8]. Biaya fitoekstraksi cukup murah jika dibandingkan dengan metode konvensional. Selain itu kontaminan dapat dikurangi atau dihilangkan secara permanen dari tanah. Selanjutnya, jumlah polutan yang harus diserap secara substansial berkurang (hingga 95%) dan dalam beberapa kasus, kontaminan dapat didaur ulang dari biomassa tumbuhan yang terkontaminasi (Gambar 2) [7-8].

4) Tumbuhan Kacang Kalopo dan Rumput Gajah Kate

Tumbuhan hiperakumulator merupakan tumbuhan yang mampu mengakumulasi logam dengan konsentrasi 100 kali lebih besar dari tumbuhan “normal” yang tumbuh di lingkungan yang sama. Tumbuhan ini mampu mengakumulasi logam berat sehingga hal tersebut merupakan fenomena kompleks dan langka yang terjadi pada spesies tumbuhan dengan kapasitas serapan logam yang tinggi [9].

Tumbuhan Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) dapat dimanfaatkan sebagai tanaman fitoremediator karena tumbuhan ini dapat tumbuh dengan cepat pada semua tekstur tanah, sebagai pionir untuk merehabilitasi lahan yang terdegradasi karena arose maupun limbah tambang, sebagai penutup tanah karena tumbuhan ini mampu mencapai ketebalan 40-60 cm yang tergantung pada kesuburan tanah, dan tumbuhan ini tahan terhadap kekeringan dengan suhu mencapai 36°C. Berdasarkan analisis dengan metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) menunjukkan bahwa tumbuhan Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) terbukti menyerap logam Hg sebesar 0,6800 ppm [10].

Rumput Gajah Kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*) merupakan jenis tumbuhan berupa rumput unggul karena produktivitas dan kandungan zat gizi cukup tinggi. Tumbuhan ini dapat hidup di berbagai tempat, toleran naungan, respon terhadap pemupukan dan menghendaki tingkat kesuburan tanah yang tinggi. Rumput Gajah Kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*) tumbuh membentuk rumpun dengan perakaran serabut yang kompak dan terus menghasilkan anakan apabila dipanen secara teratur. Berdasarkan analisis dengan metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) menunjukkan bahwa tumbuhan Rumput Gajah Kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*) terbukti menyerap logam Hg sebesar 0,5470 ppm [11].

B. Studi Kasus

Studi kasus dalam penulisan Tugas Akhir ini adalah tinjauan kasus pencemaran logam berat limbah industri di lahan pertanian kawasan industri pertambangan emas dengan referensi dari berbagai pustaka yang telah dipelajari. Data yang digunakan adalah data sekunder yang diperoleh dari jurnal, surat kabar, dan *website*. Metode studi literatur adalah serangkaian kegiatan yang berkenaan dengan metode

pengumpulan data pustaka, membaca dan mencatat, serta mengelolah bahan penelitian [12].

Sehingga studi kasus yang dikaji adalah pencemaran logam berat, khususnya merkuri (Hg) pada lahan pertanian sekitar kawasan industri penambangan emas di Gunung Pongkor, Desa Bantar Karet, Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Tanah Area Pertambangan Emas Pongkor

Kabupaten Bogor dikenal dengan tanah yang subur sehingga adanya pertanian besar di setiap daerah, khususnya daerah dengan daratan tinggi. Pertanian di Kabupaten Bogor terdiri dari pertanian tumbuhan pangan, sayuran dan hortikultura serta perkebunan. Adanya kegiatan pertambangan di area Gunung Pongkor mengakibatkan adanya perubahan fungsi lahan, yang mana semakin tahun maka proses pertambangan semakin bertambah, baik yang dilakukan secara legal oleh perusahaan maupun illegal. Sehingga dengan begitu memberikan pengaruh yang cukup signifikan terhadap lahan-lahan yang ada disekitar Gunung Pongkor, yang mana tanah pertanian milik warga maupun Negara di sekitar area penambangan saat ini mengalami penurunan kualitas.

Permasalahan yang dihadapi petani di wilayah sekitar Kawasan Pertambangan Emas Gunung Pongkor, Kecamatan Nanggung, Kabupaten Bogor adalah produktivitas tanah rendah, erosi dan sedimentasi, kerusakan ekosistem sehingga kelestariannya terganggu. Disamping itu juga konsentrasi Hg di air dan tanah pertanian berada diatas ambang batas maksimum sehingga berbahaya bagi kesehatan manusia. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemberdayaan masyarakat disekitar kawasan pertambangan emas di Gunung Pongkor Bogor, dalam upaya meningkatkan produktivitas tanah dan merehabilitasi lahan kritis tercemar Hg, serta mencegah terjadinya erosi dan sedimentasi. Gambar 3 menunjukkan keadaan area hutan dan pertanian di sekitar pertambangan pongkor yang telah mengalami penurunan kesuburan akibat aktivitas pertambangan secara legal maupun ilegal.

Konsentrasi Hg alami dalam tanah sangat tergantung pada geokimia bahan induknya. Hal ini dapat menjelaskan variabilitas spasial Hg pada litologi yang heterogen. Kandungan pH tanah, kandungan bahan organik, deposisi atmosfer, irigasi limbah, aplikasi pupuk dan pestisida dan aktivitas manusia lainnya juga dapat mempengaruhi konsentrasi Hg di tanah. Beberapa kegiatan industri, seperti produksi listrik, pembakaran batu bara, praktik pertanian, dapat mengeluarkan sejumlah besar Hg ke lingkungan (Tabel 1) [13].

B. Pencemaran Tanah oleh Limbah Industri Pertambangan Emas Pongkor

Gunung Pongkor merupakan kawasan yang masuk dalam kawasan Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS). Di lokasi ini terdapat kegiatan penambangan emas legal yaitu PT Antam Tbk. UBPE Pongkor dan penambangan emas ilegal yang dilakukan oleh PETI. PT Antam Tbk. UBPE Pongkor adalah merupakan perusahaan BUMN yang melakukan aktivitas penambangannya sejak tahun 1994. Sistem penambangannya menggunakan penambangan

bawah tanah (tambang *underground*). Metode penambangan yang digunakan adalah metode *cut and fill*, yaitu mengambil bijih emas dari perut bumi kemudian mengisi kembali rongga yang kosong akibat proses penambangan dengan material campuran semen dan tailing yang telah didetoksifikasi. Gambar 4 menunjukkan visual dari dua terowongan pertambangan emas yang memiliki terowongan sebanyak 3 dengan masing-masing memiliki 4 lubang besar sebagai ventilasi. Terowongan ini belum diakumulasi dengan terowongan ilegal yang dilakukan oleh PETI.

Para penambang ilegal (PETI) membuat lubang dengan menebang pohon dan kayunya digunakan untuk penyangga di dalam lubang, sehingga vegetasi rusak bahkan hilang dan menyebabkan erosi. Penambangan sistem terbuka konvensional banyak mengubah bentang lahan dan keseimbangan ekosistem permukaan tanah, menurunkan produktivitas tanah dan mutu lingkungan [14].

Tanah yang tercemar logam berat memiliki efek terhadap lingkungan dan kesehatan manusia karena biomagnifikasi. Biomagnifikasi merupakan peningkatan konsentrasi logam sebagai unsur, mulai dari konsentrasi rendah sampai tinggi [15]. Logam berat di tanah tidak dapat mengalami biodegradasi sehingga pembersihan kontaminan menjadi pekerjaan yang berat dan mahal. Pembersihan polutan dengan cara konvensional (*removal*) memerlukan biaya yang sangat mahal, sehingga perlu dikembangkan teknologi alternatif yang lebih murah. Pada kasus lain, sebagian besar tanah yang tercemar logam berat kesuburannya sangat rendah [16]. Diantara semua unsur logam berat, Hg menduduki urutan pertama dalam hal sifat racunnya, dibandingkan dengan logam berat lainnya, kemudian diikuti oleh logam berat antara lain Cd, Ag, Ni, Pb, As, Cr, Sn, Zn (Tabel 2) [17].

C. Upaya Rehabilitasi Tanah dengan Metode Fitoremediasi

Perkembangan riset fitoekstraksi Hg telah mendeteksi bahwa mekanisme akumulasi Hg dalam tumbuhan terjadi karena ion-ion Hg (Hg^{2+}) sehingga mudah ditranslokasi ke tajuktumbuhan dan disimpan di tempat-tempat penyimpanan, seperti vakuola subseluler dan sel epidermal daun. Selain itu, juga telah dideteksi adanya transporter spesifik seperti *glutathione conjugates* sebagai transporter Hg yang memompa ion-ion Hg ke dalam vakuola. Riset tumbuhan hiperakumulator Hg diawali dengan riset penyebaran Hg di lingkungan yang tercemar. Penyebaran cemaran kandungan Hg telah terbukti berdampak pada tanah, air, dan udara. Hal ini telah terbukti bahwa kadar Hg di udara dan tumbuhan epifit semakin tinggi dengan makin dekatnya jarak dari aktivitas penambangan.

Akumulasi logam dalam tumbuhan tidak hanya tergantung pada kandungan logam dalam tanah, tetapi juga tergantung pada unsur kimia tanah, jenis logam, pH tanah, dan spesies tumbuhan (Tabel 3) [18].

Sumber logam berat dalam tanah berasal juga berasal dari bahan induk pembentuk tanah itu sendiri, seperti Cd banyak terdapat pada batuan sedimen *schales* (0,22 ppm berat), Cr pada batuan beku ultrafanik (2,980 ppm berat), Hg pada batuan sedimen pasir (0,29 ppm berat), Pb pada batuan granit (24 ppm berat) [19].

Diketahui bahwa proses pertambangan emas memiliki berbagai cara yang berbeda disetiap tempatnya. Khususnya

pertambangan Pongkor, dimana di area tersebut terdapat dua cara pertambangan yang dilakukan oleh perusahaan yang memiliki izin dan oleh PETI. Dimana proses pertambangan oleh perusahaan menggunakan teknologi yang dapat meminimalkan cecceran pada luar area tambang, sedangkan proses pertambangan oleh PETI masih menggunakan cara konvensional yang dapat mengakibatkan adanya cecceran yang luas di luar area tambang. Dimana hal ini merupakan pemicu awal untuk munculnya polutan Merkuri (Hg) di area luar pertambangan, yaitu aliran sungai dan lahan pertanian sekitar (Gambar 5).

D. Skenario Penanganan Pencemaran Tanah

Tumbuhan memiliki perbedaan sensitivitas terhadap logam berat dan memperlihatkan kemampuan yang berbeda dalam mengakumulasi logam berat. Semua tumbuhan memiliki kemampuan menyerap logam tetapi dalam jumlah yang bervariasi. Sejumlah tumbuhan dari banyak famili terbukti memiliki sifat hipertoleran, yakni mampu mengakumulasi logam dengan konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuknya, sehingga bersifat hiperakumulator. Dalam proses fitoekstraksi ini logam berat diserap oleh akar tumbuhan dan ditranslokasikan ke tajuk untuk diolah kembali atau dibuang pada saat tumbuhan dipanen [20]. Skenario penanganan pencemaran logam berat merkuri (Hg) di tanah pertanian area pertambangan emas Pongkor menggunakan fitoremediasi *in-situ* dan *ex-situ* (Tabel 4).

E. Skenario Penanganan dengan Fitoremediasi In-situ

Pada area pertanian yang telah tercemar Hg di sekitar pertambangan emas Pongkor dilakukan fitoremediasi dengan menggunakan tumbuhan yang terpilih yaitu *Calopogonium mucunoides* atau nama lokal tumbuhan Kacang Kalopo. Tumbuhan Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) dapat memperbaiki sifat fisika tanah melalui peningkatan bahan organik, serta meningkatkan ketersediaan air tanah (Gambar 6) [21].

Luas tanah yang dilakukan rehabilitasi adalah 400 m² (ditentukan). Maka, perhitungan fitoremediasi secara *in-situ* adalah sebagai berikut :

Tanah pertanian yang tecemar Hg	= 400 m ²
Kedalaman tanah yang tercemar Hg	= 0,3 m
Volume tanah	= 120 m ³
Densitas tanah lempung	= 0,0015 kg/cm ³
Berat tanah yang telah tercemar	= 180 ton

Hasil analisis dengan metode *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) menunjukkan bahwa tumbuhan kacang kalopo (*Calopogonium mucunoides*) terbukti menyerap logam Merkuri (Hg) sebesar 0,6800 ppm atau 0,6800 mg Hg/Kg berat kering [10]. Sehingga tumbuhan kacang kalopo (*Calopogonium mucunoides*) diperlukan sebanyak

$$= \frac{\text{berat tanah tercemar}}{\text{kemampuan uptake 1 tumbuhan}}$$

$$= \frac{180.000 \text{ kg}}{0,6800 \text{ mg Hg/Kg}} = 264.706 \text{ mg}$$

Maka, jumlah tumbuhan kacang kalopo yang dibutuhkan sebanyak:

$$= \frac{264.706 \text{ mg berat kering tumbuhan}}{120 \text{ mg}}$$

$$= 2.206 \text{ tumbuhan kacang kalopo}$$

Presentase penurunan Merkuri (Hg) oleh tumbuhan kacang kalopo (*Calopogonium mucunoides*) pada tanah pertanian di area pertambangan emas Pongkor adalah sebesar 90-100%, dikarenakan tumbuhan tersebut mampu menyingkirkan polutan Merkuri (Hg) yang ada didalam tanah [10]. Adanya rentang presentase 10% dari keberhasilan reduksi polutan yang seharusnya 100% adalah karena ketika dilakukannya fitoremediasi secara *in-situ* ada beberapa faktor yang dapat menghambat keberhasilan fitoremediasi, yaitu adanya sifat dari tanah yang tercemar, kondisi iklim, kedalaman kontaminan, dan kesuburan tanah.

F. Skenario Penanganan dengan Fitoremediasi Ex-situ

Proses penyingkiran polutan dilakukan dengan menggunakan metode fitoremediasi secara *ex-situ*, yang mana dilakukan secara langsung di area pertanian yang telah tercemar Merkuri (Hg). Tumbuhan dibiarkan tumbuh dalam media tanam berupa tiga buah reaktor dan dipanen untuk dianalisis kadar logam berat Merkuri (Hg) dengan variasi waktu kontak tiap 10 hari setelah ditanam selama 30 hari yaitu pada hari ke-40 dan ke-50. Pengujian sampel menggunakan instrumen *Merkuri Analyzer* yang dilengkapi dengan sumber cahaya EDL (*Electrodeless Low Pressure Mercury Lamp*) pada panjang gelombang 253,7 nm [11].

Reaktor yang digunakan sebanyak 3 buah dan merupakan reaktor tertutup (tanpa lubang). Masing-masing reaktor diberi label (Reaktor A, Reaktor B, dan Reaktor C) pada Gambar 7. Luas masing-masing reaktor = 0,125 m²
Volume masing-masing reaktor = 0,1 m³
Volume tanah tercemar pada masing-masing reaktor
Reaktor A (T₁, T₂, T₃) = 3 kg tanah tercemar
Reaktor B (A₁, A₂, A₃) = 6 kg tanah tercemar
Reaktor C (D₁, D₂, D₃) = 9 kg tanah tercemar

Proses penyingkiran polutan Merkuri (Hg) dilakukan menggunakan fitoremediasi *ex-situ* dengan metode fitoekstraksi. Fitoekstraksi memiliki proses berupa tumbuhan akan menyerap dan mengakumulasi kontaminan logam dari tanah sampai ke bagian tumbuhan di atas permukaan tanah pada Gambar 8 dan Gambar 9.

Setiap reaktor akan dilakukan perlakuan yang sama dalam hal penelitian, sebagai berikut :

- Diambil sampel tanah sebanyak ± 1 gram
- Dimasukkan ke dalam *Erlenmeyer* 100 mL
- Ditambahkan larutan H₂SO₄ sebanyak 5 mL
- Ditambahkan 5 mL larutan HNO₃ : HClO₄ (1:1)
- Dipanaskan hingga jernih dan mengeluarkan asap putih
- Disaring dan ditepatkan dengan aquades dalam labu ukur 50 mL
- Dibaca serapan Hg menggunakan *Merkuri Analyzer*

Penambahan larutan H₂SO₄ sebanyak 5 mL bertujuan untuk pemrosesan bijih mineral dan pengaturan keasaman (pH) dari sampel tanah cemar tersebut. Sedangkan penambahan larutan HNO₃ : HClO₄ (1:1) sebanyak 5 mL bertujuan sebagai reagen pendestruksi, untuk mempercepat dekomposisi matriks, dan menghindari hilangnya / terjadinya kontaminasi analit. Berdasarkan hasil pengukuran menggunakan *Merkuri Analyzer* kandungan Hg pada awal

tanah sebesar, R₀ = 8,4200 mg/kg.

1) Fitoremediasi Ex-situ dengan Single Plant Species

Masing-masing reaktor (Reaktor A, Reaktor B, dan Reaktor C) ditanami 4 individu tumbuhan kacang kalopo (*Calopogonium mucunoides*) yang memiliki fenotip hampir sama (akar, batang, dan daunnya), lalu tumbuhan tersebut dibiarkan tumbuh selama 30 hari di dalam reaktor. Setiap penambahan 10 hari sebanyak 2 kali (hari ke-40 dan hari ke-50) setelah hari ke-30 dilakukan pengukuran kandungan Hg yang ada di dalam masing-masing reaktor (Tabel 5).

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas. Presentase efisiensi tumbuhan Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) pada pelutan Merkuri (Hg) adalah sebesar 33,3%. Dikarenakan hanya Reaktor A yang berhasil mengikat polutan hingga batas maksimum menurut baku mutu Negara Thailand.

2) Fitoremediasi Ex-situ dengan Mixed Plants Species

Masing-masing reaktor (Reaktor A, Reaktor B, dan Reaktor C) ditanami 2 individu tumbuhan kacang kalopo (*Calopogonium mucunoides*) dan 2 individu tumbuhan rumput gajah kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*) yang memiliki fenotip hampir sama (akar, batang, dan daunnya), lalu tumbuhan tersebut dibiarkan tumbuh selama 30 hari di dalam reaktor. Setiap penambahan 10 hari sebanyak 2 kali (hari ke-40 dan hari ke-50) setelah hari ke-30 dilakukan pengukuran kandungan Hg yang ada di dalam masing-masing reaktor (Tabel 6).

Maka, berdasarkan hasil perhitungan diatas. Presentase efisiensi tumbuhan Kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*) dan Rumput Gajah Kate (*Pennisetum purpureum CV. Mott*) pada pelutan Merkuri (Hg) adalah sebesar 66,67%. Dikarenakan hanya Reaktor A dan B yang berhasil mengikat polutan hingga batas maksimum menurut baku mutu Negara Thailand.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Pencemaran logam berat yang terjadi di lahan pertanian sekitar kawasan Pertambangan Emas Pongkor mengakibatkan produktivitas tanah rendah, erosi dan sedimentasi, kerusakan ekosistem sehingga kelestariannya terganggu. Khususnya konsentrasi Merkuri (Hg) pada tanah pertanian berada di ambang batas maksimum sehingga berbahaya bagi lahan pertanian dan kesehatan manusia. Merkuri (Hg) menyebabkan toksisitas dalam tanah, menurunkan kualitas pertanian, merusak hasil pertanian apabila kadar merkuri tinggi, dan membahayakan kesehatan manusia melalui konsumsi pangan yang dihasilkan dari tanah yang tercemar. Sedangkan pada manusia dapat menyebabkan menderita gejala kerusakan otak, gangguan bicara, kerusakan pada pendengaran dan suara, serta hilangnya keseimbangan sehingga tidak dapat berjalan.

Berdasarkan hasil studi kasus pencemaran logam berat Merkuri (Hg) di kawasan Pertambangan Emas Pongkor menyatakan bahwa fitoremediasi secara *in-situ* mampu lebih efisien dalam mengikat cemar Merkuri (Hg) yang ada di lahan tersebut. Presentase keberhasilannya berada diantara 90-100%, sedangkan fitoremediasi *ex-situ* secara *single plant species* maupun *mixed plants species* masih meninggalkan kandungan Merkuri (Hg) cukup banyak, sehingga masih

melebihi ambang batas yang dianjurkan oleh Dirjen POM, 1989 dan baku mutu Negara Thailand. Sehingga masih diperlukannya kajian lanjutan mengenai perihal fitoremediasi secara *in-situ* maupun *ex-situ* tanah tercemar logam berat Merkuri (Hg) pada area pertambangan Pongkor oleh PT Antam Tbk. UBPE Pongkor dan Penambang Tanpa Izin (PETI), dikarenakan mengingat jumlah tanah yang tercemar Hg cukup luas dan merusak fungsi tanah sehingga berdampak kepada aktivitas warga sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suhendrayatna, "Bioremoval Logam Berat dengan Menggunakan Mikroorganisme," *Seminar Bioteknologi untuk Indonesia*. Sinergi Forum-PPI, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, 2001.
- [2] Haryono and S. Soemono, "Rehabilitation of soils polluted by mercury (Hg) due to gold mining using leaching and organic matter in green house," *Indones. Soil Clim. J.*, no. 29, p. 133511, 2009, doi: 10.2017/jti.v0n29.2009.%p.
- [3] Dirjen POM, *Lampiran Surat Keputusan Dirjen Pengawasan Obat dan Makanan No. 037251B/SKNIII/89 Tentang Batas Minimum Cemaran Logam dalam Makanan 2 Th. 1995*, 1st ed. Jakarta: Dirjen Pengawasan Obat dan Makanan, 1989.
- [4] M. M. Lasat, "Phytoextraction of metals from contaminated soil: A review of plant/soil/metal interaction and assessment of pertinent agronomic issues," *J. Hazard. Subst. Res.*, vol. 2, no. 1, p. 5, 1999, doi: 10.4148/1090-7025.1015.
- [5] S. Mangkoedihardjo, R. Ratnawati, N. Alfianti, and others, "Phytoremediation of hexavalent chromium polluted soil using *Pterocarpus indicus* and *Jatropha curcas* L.," *World Appl Sci J*, vol. 4, no. 3, pp. 338–342, 2008.
- [6] B. R. Glick, "Using soil bacteria to facilitate phytoremediation," *Biotechnol. Adv.*, vol. 28, no. 3, pp. 367–374, 2010, doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.02.001.
- [7] H. Sarma, "Metal hyperaccumulation in plants: a review focusing on phytoremediation technology," *J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 4, no. 2, pp. 118–138, 2011.
- [8] N. Sarwar *et al.*, "Phytoremediation strategies for soils contaminated with heavy metals: modifications and future perspectives," *Chemosphere*, vol. 171, pp. 710–721, 2017, doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.116.
- [9] B. D. Krisnayanti and C. Anderson, "Gold phytomining: A new idea for environmental sustainability in Indonesia," *Indones. J. Geosci.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–7, 2014, doi: 10.17014/ijog.v1i1.171.
- [10] N. Hidayanti, "Mekanisme fisiologis tumbuhan hiperakumulator logam berat," *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 14, no. 2, pp. 75–82, 2013, doi: 10.29122/jtl.v14i2.1424.
- [11] Y. S. Samar, A. Mariwy, and J. B. Manuhutu, "Fitoremediasi merkuri (Hg) menggunakan tanaman kacang Kalopo (*Calopogonium mucunoides*)," *Sci. Map J.*, vol. 1, no. 2, pp. 93–98, 2019, doi: 10.30598/jmsvol1issue2pp93-98.
- [12] M. Zed, *Metode Penelitian Kepustakaan*, 1st ed. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia, 2004.
- [13] L. De Temmerman, L. Vanongeval, W. Boon, M. Hoenig, and M. Geypens, "Heavy metal content of arable soils in Northern Belgium," *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 148, no. 1, pp. 61–76, 2003.
- [14] G. Subowo, *Penambangan Sistem Terbuka Ramah Lingkungan dan Upaya Reklamasi Pasca Tambang untuk Memperbaiki Kualitas Sumber Daya Lahan dan Hayati Tanah*, 1st ed. Bogor: Balai Penelitian Tanah, 2011.
- [15] M. Roy and L. M. McDonald, "Metal uptake in plants and health risk assessments in metal-contaminated smelter soils," *L. Degrad. Dev.*, vol. 26, no. 8, pp. 785–792, 2015, doi: 10.1002/ldr.2237.
- [16] A. F. Usman, B. Budimawan, and P. Budi, "Kandungan logam berat Pb-cd dan kualitas air di Perairan Biringkassi, Bungoro, Pangkep," *J. Agrokompleks*, vol. 4, no. 9, pp. 103–107, 2015.
- [17] J. Juhriah, S. Suhadiyah, and R. Mandasari, "Respon pertumbuhan tanaman jengger ayam merah *celosia plumosa* (Voss) burv pada tanah tercemar logam berat Kadmium (Cd)," *J. Ilmu Alam dan Lingkung.*, vol. 8, no. 1, 2017, doi: 10.20956/jal.v8i15.3042.
- [18] Darmono, *Logam dalam Sistem Biologi Makhluk Hidup*, 1st ed. Jakarta: Universitas Indonesia, 1995.
- [19] B. J. Alloway, *Heavy Metals in Soils*, 2nd ed. New York: Blackie Academic and Professional-Chapman and Hall, 1995.
- [20] Y.-M. Li *et al.*, "Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations," *Plant Soil*, vol. 249, no. 1, pp. 107–115, 2003.
- [21] A. R. Arsyad, Y. Farni, and others, "Aplikasi pupuk hijau (*Calopogonium mucunoides* dan *Pueraria javanica*) terhadap air tanah tersedia dan hasil kedelai," *J. Hidrolitan*, 2011.