

Tinjauan Terhadap Perencanaan *Phytomining* sebagai Alternatif Tambang Emas Ramah Lingkungan¹

An Overview of Phytomining Planning as an Alternative to Environmentally Friendly Gold Mining

Di Ajeng Arum Kusuma^{a,2}, Haeruddin^b

^{a,b} Program Studi Teknik Pertambangan, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember

ABSTRAK

Paradigma negatif masyarakat mengenai kegiatan pertambangan masih beredar hingga saat ini. Mereka menganggap bahwa pertambangan hanya membawa kerugian untuk lingkungan sekitarnya. Masyarakat merasa khawatir kegiatan penambangan yang dilakukan dapat merusak lingkungan dan membuat mereka kehilangan mata pencaharian sebagai petani. Penambangan emas tidak hanya dapat dilakukan dengan metode konvensional, tetapi juga dengan metode *Phytomining*. *Phytomining* adalah produksi tanaman logam dengan cara menumbuhkan tanaman yang dapat mengakumulasi logam dalam konsentrasi tinggi. *Phytomining* merupakan metode yang ramah lingkungan karena dalam prosesnya tidak menggunakan zat-zat kimia yang dapat membahayakan lingkungan dan masyarakat sekitar. Pada penelitian ini, dilakukan perencanaan pertambangan yang mencakup kegiatan-kegiatan prospeksi, eksplorasi, studi kelayakan (*feasibility study*) yang dilengkapi dengan Analisis Mengenai Dampak Lingkungan (AMDAL), persiapan penambangan dan konstruksi sarana prasarana penambangan, Kesehatan dan Keselamatan Kerja (K3), pengelolaan dan pemantauan lingkungan hidup. Metode *Phytomining* yang digunakan mampu menjadi solusi alternatif kegiatan pertambangan yang ramah lingkungan. Selain itu, masyarakat tidak akan kehilangan pekerjaan dan mendapatkan penghasilan lebih besar karena adanya kegiatan pertambangan. Penambangan dengan metode *Phytomining* sudah banyak diterapkan di negara lain, untuk itu metode ini juga berpotensi dikembangkan di Indonesia.

Kata kunci: *Phytomining*, tambang emas, ramah lingkungan.

ABSTRACT

The community's negative paradigm regarding mining activities is still circulating today. They assume that mining only brings harm to the surrounding environment. The community is worried that the mining activities carried out can damage the environment and make them lose their livelihood as farmers. Gold mining can not only be done by conventional methods, but also by the Phytomining method. Phytomining is the production of metal plants by growing plants that can accumulate metals in high concentrations. Phytomining is an environmentally friendly method because in the process it does not use chemical substances that can harm the environment and the surrounding community. In this study, mining planning is carried out which includes prospecting activities, exploration, feasibility studies (feasibility studies) equipped with Environmental Impact Analysis (AMDAL), mining preparation and construction of mining infrastructure, Occupational Health and Safety (K3), management and environmental monitoring. The Phytomining method used can be an alternative solution for environmentally friendly mining activities. In addition, the community will not lose their jobs and earn more because of mining activities. Mining with the Phytomining method has been widely applied in other countries, for that this method also has the potential to be developed in Indonesia.

Keywords: Phytomining, gold mine, eco-friendly.

¹ Info Artikel: Received: 6 Oktober 2022, Revised: 2 Desember 2022, Accepted: 6 Desember 2022, Published: 22 Desember 2022

² Info: diajengarumkusuma@gmail.com

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan dari Sabang sampai Merauke memiliki kekayaan sumber daya mineral yang tersebar dan beragam jenis. Indonesia merupakan salah satu negara dengan produksi emas (Au) terbesar di Dunia. Industri pertambangan Au menjadi salah satu sektor yang menopang perekonomian nasional. Potensi tambang Au yang baik di Indonesia harus dimanfaatkan secara maksimal, yaitu dengan menerapkan *Good Mining Practice*. Dampak yang ditimbulkan jika tidak menerapkan konsep *Green Mining* yaitu kerusakan alam seperti lubang pada lahan bekas tambang, pohon mati, dan berkurangnya air bersih.

Potensi tambang Au yang baik dapat dimanfaatkan dengan metode penambangan yang tepat. Penambangan Au tidak hanya dapat dilakukan dengan metode konvensional tetapi juga dengan metode lain yaitu *Phytomining*. *Phytomining* adalah produksi tanaman logam dengan cara menumbuhkan tanaman bermassa tinggi yang dapat mengakumulasi konsentrasi logam tinggi (Robert dkk, 1998). Pengembangan teknologi *phytomining* sudah banyak diterapkan pada pertambangan luar negeri seperti di Jerman, USA, dan New Zealand. Metode ini memiliki potensi untuk diterapkan pada pertambangan di Indonesia. Teknik *Phytomining* melibatkan penanaman tanaman spesies tanaman hiperakumulasi logam, memanen biomassa, dan membakarnya untuk menghasilkan *bio-ore*. Jenis tanaman yang telah dikembangkan untuk metode ini salah satunya yaitu akar wangi (*Vetiveria Zizanoides*) (Sheoran dkk, 2013).

Phytomining dapat menjadi alternatif untuk penambangan di lahan berkadarnya rendah, pengolahan kembali limbah tambang, pemanfaatan Au di lahan reklamasi bekas tambang, dan optimalisasi pemanfaatan pada lahan bekas tambang Au yang masih mengandung Au dalam kadar rendah dan tidak menguntungkan jika dieksploitasi dengan metode konvensional (Van der Ent dkk, 2015). *Phytomining* merupakan metode penambangan alternatif dari pertambangan terbuka yang menimbulkan dampak baik bagi lingkungan. *Phytomining* tidak membahayakan lingkungan dan tidak mengganggu permintaan energi yang rendah, dapat memulihkan tanah, tidak mencemari air tanah karena tidak menggunakan bahan kimia yang berbahaya, dan tidak ada efek erosi tetapi sebaliknya menahan erosi. Karena itu, metode penambangan Au dengan *phytomining* ini diharapkan dapat menjadi alternatif penambangan yang ramah lingkungan.

TEORI DASAR

Konsep dan Mekanisme *Phytomining*

Pemanfaatan tanaman untuk menyerap logam dikenal dengan istilah *phytoekstraksi*. *Phytoekstraksi* yang digunakan untuk memperoleh logam-logam berharga disebut *phytomining*. Dalam prakteknya terdapat tiga tahapan utama penerapan *phytomining* yaitu menanam jenis tanaman yang dapat mengakumulasi logam dalam konsentrasi tinggi (hiperakumulator), pemanenan biomassa, dan pembakaran biomassa untuk menghasilkan *bio-ore*. Penerapan *phytomining* saat ini lebih banyak ditujukan pada logam Au, karena nilai ekonomi Au yang cukup tinggi. Sejak awal abad 20, telah dilaporkan terkait akumulasi Au oleh tanaman, terutama pohon-pohonan. Penelitian menunjukkan bahwa tanaman konifer dapat mengakumulasi sejumlah kecil Au dalam jaringannya. Hal tersebut mendorong beberapa perusahaan tambang untuk menjadikan tanaman sebagai bioindikator keberadaan Au di tanah. Dalam proses fitoekstraksi, logam berat diserap oleh akar tanaman dan

ditranslokasikan ke tajuk untuk diolah kembali atau dibuang pada saat tanaman dipanen (Chaney dkk, 1995 dan Hidayati, 2005). Hiperakumulasi Au didefinisikan sebagai akumulasi Au yang mencapai konsentrasi lebih dari 1 mg/kg berat kering tanaman (pada kondisi normal tanaman hanya dapat menyerap sebesar 0,01 mg/kg Au) (Anderson dkk, 1999). Karakteristik tumbuhan yang ideal untuk digunakan dalam *phytomining* adalah sebagai berikut: memiliki tingkat pertumbuhan yang tinggi; produksi biomassa tajuk yang lebih banyak; memiliki percabangan akar yang banyak dan terdistribusi secara luas; mampu mengakumulasi sejumlah besar logam dari tanah atau substrat (hiperakumulator); mampu mentranslokasi logam dari akar ke tajuk; toleran terhadap logam yang bersifat racun; mampu beradaptasi pada lingkungan serta iklim tertentu; tahan terhadap hama dan penyakit; mudah untuk dikultivasi dan dipanen tidak dikonsumsi oleh herbivora untuk menghindari kontaminasi dalam rantai makanan (Ali dkk, 2013).

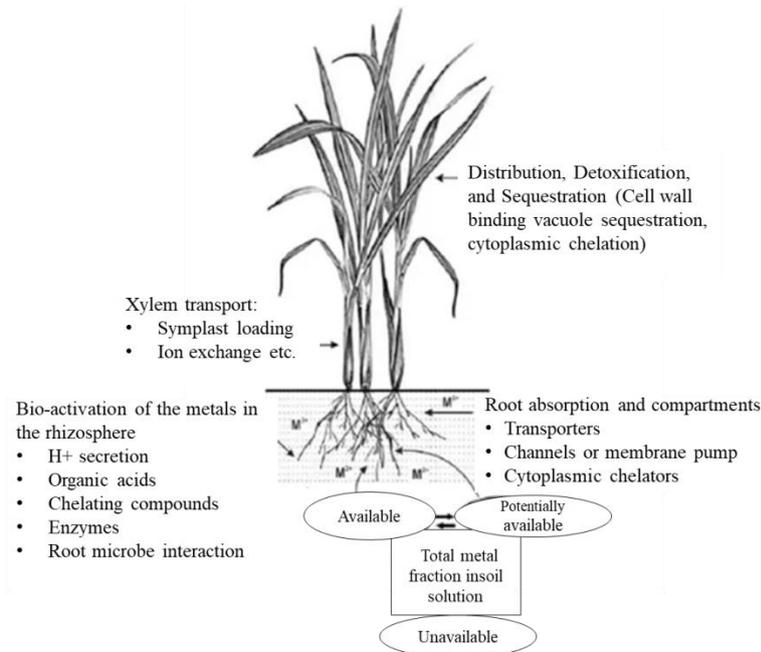
Mekanisme penyerapan logam oleh tanaman

Mekanisme penyerapan logam oleh tumbuhan (Gambar 1) terdiri dari tiga tahapan yaitu:

1. Pelarutan logam-logam dalam matriks tanah dengan cara pengasaman (*acidification*) zona perakaran (*rhizosphere*); sekresi ligan oleh akar; aktivitas mikroorganisme yang memproduksi senyawa yang membantu pelarutan logam di zona perakaran.
2. Penyerapan logam oleh akar merupakan langkah awal proses akumulasi logam pada tanaman. Ada dua cara transport air, nutrisi, dan logam pada tanaman (dari korteks ke pusat akar) yaitu :
 - a. Transport pasif: logam-logam terlarut dapat memasuki simplas akar dengan melalui plasma membran sel endodermis akar.
 - b. Transport aktif: logam-logam terlarut masuk melalui ruang antar sel.
3. Translokasi ke tajuk, distribusi, detoksifikasi dan sekuestrasi ion logam. Setelah logam-logam berada dalam pembuluh *xylem*, logam tersebut akan segera ditranslokasikan ke bagian tajuk. Beberapa jenis protein berperan dalam proses translokasi ini.

Jenis-jenis tanaman yang dapat digunakan untuk *phytomining*

Karakteristik tumbuhan hiperakumulator adalah tahan terhadap unsur logam dalam konsentrasi tinggi pada jaringan akar dan tajuk, tingkat laju penyerapan unsur dari tanah yang tinggi dibanding tanaman lain, memiliki kemampuan mentranslokasi dan mengakumulasi unsur logam dari akar ke tajuk dengan laju yang tinggi. Pada kondisi normal konsentrasi Zn, Cd, atau Ni pada akar adalah 10 kali lebih tinggi dibanding konsentrasi pada tajuk, tetapi pada tumbuhan hiperakumulator, konsentrasi logam pada tajuk melebihi tingkat konsentrasi pada akar (Brown dkk, 1995). Saat ini telah dilakukan fitomining Au menggunakan tanaman Akar Wangi (*Vetiveria Zizanioides*) untuk mengekstrak atau mengakumulasi Au dari sedimen tersebut. Tidak hanya Akar Wangi, fitomining Au telah dikembangkan dengan menggunakan berbagai spesies tanaman, seperti bunga matahari (*Helianthus annuus*), sawi (*Brassica juncea*), jagung (*Zea mays*) dan bunga berkheya (*Berkheya Coddii*) (Anderson dkk, 1999 dan Wilson dkk, 2011).



Gambar 1 Mekanisme penyerapan logam oleh tanaman (Sumber: Antono dkk, 2014)

Batas konsentrasi dan potensi *phytomining*

Konsentrasi logam mulia dalam biomassa memiliki dampak yang signifikan terhadap kelayakan ekonomi ekstraksi, tetapi nilai ambang batas ini belum sepenuhnya ditentukan. Nilai kritis dan faktor konsentrasi dilambangkan sebagai hasil bagi tingkat *cut-off* dengan kandungan logam di kerak bumi. Nilai emas yang menguntungkan disarankan pada 6 mg/kg dengan konsentrasi ekonomi biomassa sebesar 0,06-0,6 mg/kg. Selain itu, ambang batas mungkin lebih rendah dengan alasan pertumbuhan harga logam mulia yang luar biasa dan perkembangan teknologi ekstraksi. Konsentrasi berharga tersebut mungkin dapat dicapai untuk abu biomassa yang digunakan untuk fitoekstraksi. Jika proses pengayaan juga diperhitungkan, maka kandungan logam berharga dalam *bio-ore* dapat melebihi batas ekonomis. Misalnya, massa biomassa kayu seharusnya berkurang 90-99% melalui proses pembakaran. Akibatnya, tingkat logam mulia termasuk Au dalam sisa-sisa padat akan bertambah dari sepuluh menjadi seratus kali dibandingkan konsentrasi dalam biomassa. Keekonomian *phytomining* Au umumnya tergantung pada beberapa faktor-faktor yang meliputi konsentrasi logam mulia dalam tanah dan tanaman, produksi biomassa, efisiensi proses pengayaan dan ekstraksi. Lebih penting lagi, harga logam memainkan peran penting dalam aspek komersial operasi. Logam mulia sangat mahal, dan harga pasarnya cenderung meningkat secara konsisten (Dinh dkk, 2022).

Pemrosesan biomassa

Bio-ore mengandung lebih sedikit kontaminan daripada bijih konvensional, karena selektif terhadap akumulasi tanaman ke logam dari tanah. Selanjutnya, *bio-ore* juga tidak mengandung sulfida, karena pengolahannya tidak memberikan kontribusi emisi belerang ke atmosfer (Schrama dkk, 2017 dan Sheoran dkk, 2013). Beberapa metode telah diusulkan dan diimplementasikan dalam pemrosesan *hyperaccumulator* biomassa seperti pengomposan, pembakaran, gasifikasi atau hidrometalurgi. Metode umum yang digunakan untuk proses pelindian Au adalah sianidasi. Namun senyawa golongan sianida berbahaya bagi lingkungan. Aspek lingkungan menyebabkan dikembangkannya proses pelindian Au dengan

menggunakan senyawa non-sianida. Metode ekstraksi Au yang umum oleh industri adalah pirometalurgi, hidrometalurgi, dan biohidrometalurgi. Pada pirometalurgi, Au diekstrak dengan memberikan temperatur dan tekanan tinggi pada mineral, sedangkan pada hidrometalurgi Au diekstrak dengan melarutkan mineral dalam larutan kimia. Sumber Au kedua di dunia berasal dari hasil pemurnian menggunakan metode hidrometalurgi. Dalam metode biohidrometalurgi, proses pemurnian Au dibantu dengan menggunakan mikroorganisme. Berbagai macam pelarut telah diteliti untuk digunakan pada metode hidrometalurgi. Umumnya digunakan pelarut asam karena memiliki kemampuan untuk melarutkan logam. Beberapa asam yang dapat digunakan adalah H_2SO_4 , HNO_3 , H_2O_2 , dan HCl (Hidayati, 2005). Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa proses klorinasi terbukti memiliki kinetika reaksi yang lebih cepat dibandingkan dengan sianidasi. Ion klorida (Cl^-) diketahui memiliki keelektronegatifan tinggi sehingga dapat dengan mudah berikatan dengan ion logam bermuatan positif. Metode klorinasi umumnya digunakan untuk *recovery* logam-logam mulia, yakni Pt, Pd, dan Au (Cui dkk, 2008).

Faktor-faktor dalam perencanaan *phytomining*

Faktor-faktor yang diperhatikan dalam perencanaan *phytomining* yaitu pertama mengetahui gambaran umum lokasi yang sudah ditentukan. Karakteristik lingkungan yang meliputi kondisi lahan, geologi batuan, ekosistem, serta kondisi lingkungan abiotik dan biotik. Keberadaan emas sesuai dengan kondisi geologinya, oleh karena itu setiap daerah yang mengandung emas memiliki kondisi geologi yang berbeda-beda. Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa batuan yang mengandung emas berasal dari paparan gunung api, dengan komposisi andesitik yang mengalami kloritisasi dan piritisasi. Perlapisan daerah tersebut memiliki barisan kemiringan lapisan terhadap horizontal yang merupakan aliran *andesite aphyric basaltic* dan aliran breksi, aliran *andesite porphyritic* dan aliran breksi, tuff dan breksi tuff, *limestone* dan breksi vulkanik, tuff dan batuan pasir dan juga terdapat *phorpyry quartz minor intrusive*. Penelitian awal geologi permukaan dan data hasil uji laboratorium terhadap contoh batuan pada beberapa daerah singkapan yang menunjukkan bahwa terdapat potensi kandungan beberapa mineral logam berharga yaitu Au, Pb, Cu dan Ag (Arifin, 2019). Selain faktor kondisi geologi, faktor abiotik dan biotik harus diperhatikan. Faktor abiotik bertujuan untuk tetap menjaga keseimbangan dan melengkapi komponen biotik lainnya. Faktor abiotik yang mempengaruhi *phytomining* yaitu, kelarutan, ketersediaan biomassa, pH, senyawa pengelat. Sedangkan faktor biotik merupakan faktor yang berpengaruh terhadap terjadinya proses pada tumbuhan, yaitu mikroba, bakteri, jamur, hewan, dan tumbuhan. Contohnya Mikoriza yang berperan untuk membantu penyerapan zat atau unsur hara tanah.

Kedua, faktor perhitungan lahan yang dibutuhkan untuk *phytomining* dan prediksi kandungan emas. Langkah selanjutnya yaitu menentukan lahan dan memperkirakan luasan lahan yang akan diterapkan *phytomining* emas, dimana dalam penerapannya perlu dilakukan pembagian area untuk penanaman hiperakumulator emas. Jika sudah dilakukan pengukuran luas lahan dan presentase kandungan emas, maka akan didapat jumlah emas yang berada pada lokasi tersebut. Perhitungan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Volume tanah} = \text{Luas lahan} \times \text{Kedalaman} \quad (1)$$

$$\text{Berat tanah} = \text{Volume tanah} \times \text{Densitas} \quad (2)$$

$$\text{Jumlah Emas} = \% \text{Kandungan Au di tanah} \times \text{Berat tanah} \quad (3)$$

Ketiga, faktor pemilihan spesies tumbuhan dan perhitungan jumlah tanaman yang diperlukan. Tanaman hiperakumulator yang akan dipilih harus mempunyai perakaran yang padat dan dapat menjangkau daerah yang luas, mampu memproduksi biomassa dalam jumlah banyak, serta pertumbuhannya cepat dan dapat beradaptasi dalam berbagai kondisi.

Jumlah tanaman yang diperlukan dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{Jumlah tumbuhan} = \frac{\text{Berat kering tumbuhan yang diperlukan}}{\text{Berat kering 1 tumbuhan pilihan}} \quad (4)$$

Faktor yang terakhir yaitu desain *phytomining*. Desain penanaman tumbuhan yang paling banyak digunakan yaitu *single plant species*. Kelebihan dari desain ini yaitu dapat diterapkan pada berbagai skala, skala besar atau kecil, serta dapat fokus terhadap satu tumbuhan saja. Sedangkan kekurangannya yaitu membutuhkan tumbuhan dalam jumlah banyak (Rohadatul dkk, 2022).

Analisis ekonomi *phytomining* dan model kemungkinan ekonomi

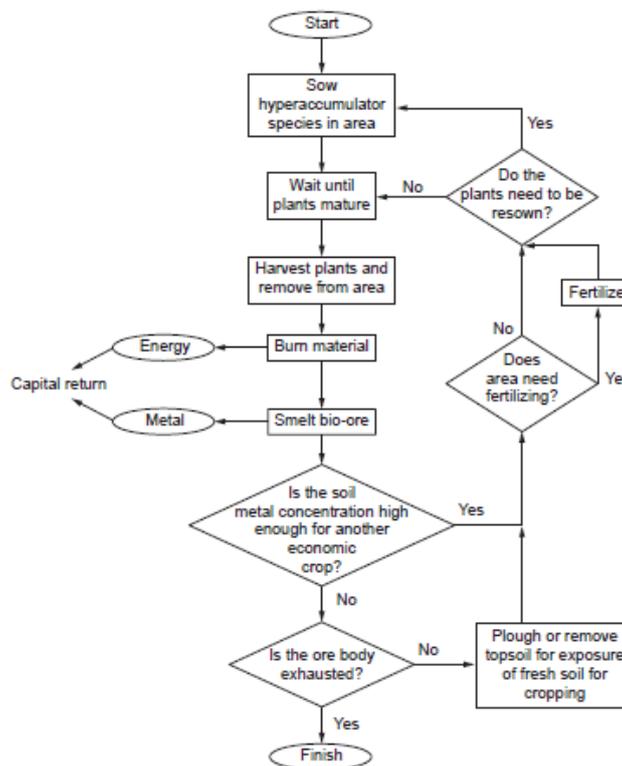
Analisis ekonomi metode *phytomining* yang diterapkan di Mexico oleh Wilson-Corral ditunjukkan pada tabel 1. Analisis ini disesuaikan dengan keadaan Indonesia dengan nilai *Gross Profit* atau laba kotor. Nilai *gross profit* tersebut didapatkan dari nilai total *value of crop/ha* yang dikurangkan dengan *cost of producing biomass/ha* dan *cost of gold*. Berdasarkan model ekonomi tersebut, metode *phytomining* menunjukkan potensi untuk diterapkan pada tambang rakyat bergantung pada biaya operasi, kemampuan penyerapan emas oleh tanaman, dan harga komoditas emas. Percobaan di Mexico dilakukan dalam skala besar dan dengan perolehan *recovery* emas yang cukup tinggi bila dibandingkan dengan percobaan yang dilakukan di Lombok tahun 2011, Sukabumi tahun 2014, dan Lombok Tengah tahun 2015 (Wilson dkk, 2011).

Tabel 1 Analisis Ekonomi *Phytomining* Emas

Concept	Note	Cost US (\$)	Rupiah (Rp)	Jumlah uang setara 2020 (Rp)
Agricultural cost (per ha)		1630	14.743.350	21.104.368
Price of chemical (\$)	\$8/Kg			
Application rate @0.25 g	Total volume			
Chemical/kg soil	Need: 180 Kg			
Cost of chemical		1440	13.024.800	18.644.349
Cost of chemical application		500	4.522.500	6.473.732
Crop monitoring		2200	19.899.00	28.484.423
	Cost of Producing Biomass/ha	5770	52.189.650	74.706.874
Biomass per ha	8330			
Kg dry weight/year				
Au concentration/year	55.6			
Plant (mg/kg DW) ASH Conversion	0.83 t	2075	18.768.375	26.865.990
DW to ash @100%				
Operating cost (solvent extraction)	\$1000/tonne	830	7.507.350	10.746.396
Capital cost	\$480/tonne	400	3.618.000	5.178.986
	Cost of gold Recorvery/ha	3305	29.893.725	42.791.372

Gold recovered (assume 100%)	463 g			
Market price of gold \$US/oz	1623.9			
Market price of gold \$US/g	52.21			
Value of gold extracted us\$		24173	218.644.785	312.979.075
		24173	218.644.785	312.979.075
Gross profit/ha (Value-cost)		15098	136.561.410	195.480.829

Sebuah model sistem *phytomining* ekonomi ditunjukkan pada Gambar 3 sistem membedakan antara tanaman tahunan dan tanaman abadi serta memperhitungkan pemupukan dan kesuburan tanah. Di daerah tropis itu harus memiliki tanaman musiman di setiap bulan, dengan demikian dapat menjaga pabrik pembakaran sibuk di sepanjang tahun. Hal ini juga telah disarankan oleh R.L. Chaney bahwa biomassa dapat disimpan di lapangan atau di dekat pabrik pembakaran agar pembakaran sesuai dengan kebutuhan energi.



Gambar 3 Model sistem ekonomi *phytomining* yang memungkinkan (Sumber: Brooks dkk, 1992)

Ada dua skenario dapat dilakukan untuk melakukan *phytomining*. Pertama adalah pengembangan skala besar proyek komersial yang melibatkan kilometer persegi tanah yang kaya akan logam, yang berasal dari batuan ultramafik atau berkadar rendah mineralisasi. Skenario kedua yang mungkin lebih mungkin adalah *phytomining* oleh petani kecil di seluruh sebuah wilayah, di mana seorang petani mungkin menanam beberapa hektar bahan tanaman dan mengumpulkannya untuk diproses di lahan terdekat. Kegiatan ini sebaiknya berada di dekat kota besar, dimana limbah industri dapat digunakan sebagai bahan baku untuk pabrik insinerasi, yang pada gilirannya bisa memasok uap untuk memproduksi pasokan lokal listrik. Negara yang menerapkan *phytomining* skala kecil adalah Brasil, di mana ada area mineralisasi nikel yang luas dan tanah ultrabasa yang tidak ekonomis untuk mengekstrak logam secara konvensional. Petani di Brasil telah mencoba dan gagal menanam

tanaman seperti kacang kedelai tanah ultrabasa kaya nikel dan dapat diatasi dengan menanam tanaman hiperakumulator nikel yang baik (Brooks dkk, 1992).

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dan lingkungan dalam *phytomining*

Faktor-faktor K3 yang harus diperhatikan dalam melakukan kegiatan pertambangan dengan metode *phytomining* adalah:

a. Kelengkapan APD (Alat Pelindung Diri)

APD berfungsi untuk melindungi diri bahaya-bahaya yang diakibatkan saat bekerja. APD yang digunakan yaitu sepatu boot *safety*, kacamata *safety*, rompi *safety*, *safety helmet*, masker, dan kotak P3K.

b. Usia

Golongan usia tua cenderung mengalami kecelakaan kerja karena golongan muda mempunyai reaksi dan kegesitan yang lebih tinggi. Namun usia muda pun sering pula mengalami kasus kecelakaan, karena kecerobohan, kurang perhatian, kurang disiplin, cenderung menuruti kata hati dan sikap suka tergesa-gesa.

c. Pengalaman Kerja

Berdasarkan berbagai penelitian, dengan meningkatnya pengalaman dan keterampilan akan disertai dengan penurunan angka kecelakaan. Hal ini karena tingkat kewaspadaan yang bertambah baik sejalan dengan pertumbuhan usia dan lamanya kerja ditempat kerja yang bersangkutan (Awaludin dkk, 2020).

d. Konsistensi Terhadap Peraturan

Peraturan yang telah dibuat oleh perusahaan harus dipatuhi. Kecelakaan kerja sering terjadi karena bertentangan dengan Buku Panduan K3 perusahaan.

e. Pembinaan atau Pelatihan K3

Untuk mencegah terjadinya kecelakaan perlu dilakukan pembinaan dan sosialisasi untuk keselamatan kerja terhadap semua karyawan agar dapat meniadakan potensi yang berbahaya ditempat kerja. Kegiatan yang dapat dilakukan yaitu *safety talk* atau penyuluhan dengan memberi motivasi dan pemasangan poster, *safety committee* dengan mengusahakan terciptanya suasana kerja yang aman, menanamkan disiplin, serta pelatihan seperti mengikuti kursus-kursus K3 dan latihan menggunakan peralatan K3.

Phytomining merupakan metode penambangan yang ramah lingkungan dan alternatif dari pertambangan terbuka yang menimbulkan dampak bagi lingkungan. *Phytomining* tidak membahayakan lingkungan, tidak merusak ekosistem, tidak menimbulkan bencana ekologis, tidak mencemari air tanah, tidak ada efek erosi tetapi sebaliknya menahan erosi, dan tidak mengurangi lahan pertanian, karena lahan tetap ditanami tumbuhan pilihan yang dapat menghasilkan Au. Metode ini juga lebih ekonomis digunakan daripada metode konvensional jika digunakan di lahan yang kandungan mineralnya tidak terlalu luas.

Strategi dalam perencanaan *phytomining*

Metode penambangan *phytomining* memiliki keuntungan, yaitu karbon dioksida yang dihasilkan saat proses peleburan lebih sedikit, merupakan teknologi yang ramah lingkungan, berguna dalam proses ekstraksi dari satu atau dua logam, teknologi yang lebih murah bila dibandingkan dengan proses penambangan bijih logam dengan metode konvensional dan tidak akan menimbulkan dampak buruk bagi lingkungan. Selain itu, *phytomining* tidak mengganggu permintaan energi yang rendah, dapat memulihkan tanah, tidak mencemari air tanah karena tidak menggunakan bahan kimia yang berbahaya, tidak menimbulkan bencana ekologis, tidak merusak ekosistem, dan tidak ada efek erosi tetapi sebaliknya menahan erosi.

Dari keuntungan tersebut, masyarakat tidak perlu khawatir akan kehilangan lahan pertanian atau perkebunan karena lahan yang mengandung Au akan tetap ditanami tumbuhan dan tidak menimbulkan cebakan seperti pada pertambangan konvensional. Hasil panen yang didapatkan akan berbeda, yaitu panen Au. Masyarakat akan mendapatkan banyak keuntungan dari adanya kegiatan pertambangan ini, terutama dalam hal ekonomi. Hasil panen *phytomining* Au lebih ekonomis daripada hasil pertanian atau perkebunan. Selain itu, dengan adanya kegiatan pertambangan juga akan menyerap banyak tenaga kerja dan membuka peluang usaha bagi masyarakat sekitar seperti membuka tempat makan di sekitar lahan pertambangan.

Strategi potensial untuk peningkatan *phytomining* yang pertama adalah persiapan penelitian kandungan Au yaitu sebagai berikut:

- a. Pembuatan Rencana Operasional: kerangka acuan kerja dibuat sebagai panduan dalam pelaksanaan kegiatan penelitian, didalamnya terdapat tahapan pelaksanaan kegiatan, personil pelaksana serta jadwal kegiatan.
- b. Studi Literatur: pengumpulan referensi mengenai ekstraksi emas dengan metode *phytomining*.
- c. Persiapan Administratif: koordinasi dengan instansi terkait dengan penelitian, diskusi dan konsultasi dengan narasumber.
- d. Persiapan Bahan dan Peralatan: persiapan bahan (contoh tanaman, ampas *polybag*/pot, bahan kimia) serta peralatan (cangkul, sekop) untuk pengambilan contoh tanaman dan penanaman (Antono dkk, 2014).

Adapun langkah-langkah yang dapat dilakukan adalah pengambilan sampel dan uji pendahuluan. Contoh yang diambil dapat berupa lumpur sedimen sebanyak 2.500 kg pada lokasi *sediment pond*, ampas pengolahan emas sebanyak 500 kg pada lokasi TPS (Tempat Penyimpanan Sementara) ampas. Selain itu, dilakukan pengambilan tanaman lokal yang hidup pada lokasi sedimen pond dan TSF. Tanaman-tanaman ini diduga kuat memiliki karakteristik hiperakumulator terhadap logam Au (Antono dkk, 2014). Sampel yang didapatkan kemudian diuji dengan kegiatan skrining dan pengujian kandungan Au pada tanaman. Prosedur pengujian logam Au pada tanaman adalah sebagai berikut:

- a. Dilakukan penimbangan berat basah sampel tanaman. Kemudian dilanjutkan dengan pengeringan pada oven dengan suhu 105°C selama 1 x 24 jam untuk mengurangi kadar air pada tanaman. Kemudian dilanjutkan dengan penimbangan berat kering.
- b. Sampel tanaman kering tersebut kemudian digerus menggunakan *ring mill*. Kemudian diambil sampel seberat 3 gram untuk tiap tanaman.
- c. Dilakukan proses pegabuan dengan *furnace* pada suhu 550°C selama lebih kurang 3 jam. Kemudian abu ditimbang.
- d. Proses pelarutan dengan *aqua regia* (15 ml HCl ditambah 5 ml HNO₃ kemudian dipanaskan pada suhu 100°C. Proses pelarutan dilakukan hingga diperoleh sisa abu yang berwarna putih.
- e. Proses penyaringan dengan menggunakan kertas saring *whattman* 40 kedalam labu ukur 25 ml (ditepatkan dengan larutan HNO₃ dengan perbandingan 1:24). Kemudian larutan dimasukkan kedalam botol sampel.
- f. Dilakukan pengukuran kandungan Au dalam tanaman dengan menggunakan GT-AAS.

Strategi yang kedua yaitu memperhatikan faktor-faktor sebagai berikut:

- a. Tanaman hiperakumulator: tanaman hiperakumulator dengan biomassa tinggi lebih baik daripada biomassa rendah dengan syarat tidak ada *trade-off* dari kandungan logam yang

lebih rendah (Knox dkk, 2000). Semakin tinggi kemampuan hiperakumulator suatu tanaman, maka semakin banyak logam Au yang didapatkan.

- b. pH tanah: pH tanah mempengaruhi kelarutan unsur logam sehingga mempengaruhi ketersediaan mineral logam dalam tanah untuk dapat diserap tanaman. Jika pH menurun sampai di bawah 6.5-5.3 maka proporsi kelarutan kandungan Cd dan Zn meningkat (Salt, 2000). Berdasarkan penelitian tersebut, dapat dinyatakan bahwa logam Au yang dapat diekstraksi sebanding dengan konsentrasi dan pH bahan pengekstrak.
- c. Pemberian pupuk: pupuk digunakan untuk menghasilkan tanaman fitoekstraksi dengan hasil yang tinggi. Penambahan pupuk seperti nitrogen, fosfor, kalium pada tanah dapat menurunkan pH tanah sehingga meningkatkan ketersediaannya mineral logam dan juga menunjang pertumbuhan tanaman.
- d. Penggunaan khelat: pemberian senyawa khelat dalam tanah dapat memacu ketersediaan dan transfer logam dari akar ke tajuk. Dalam mekanisme pengkhelatan, senyawa khelat memiliki kemampuan membentuk kompleks logam organik yang larut dalam air. Pembentukan kompleks khelat logam ini lebih mudah diserap akar dan ditranslokasi ke tajuk. Khelat sintetik yang biasa digunakan adalah *amonium tiosianit* untuk Au (Salt, 2000).
- e. Seleksi tanaman dengan kultur jaringan: seleksi tanaman dengan kultur jaringan adalah salah satu cara untuk mengoptimalkan potensi tanaman untuk fitoekstraksi. Metode ini dapat menciptakan karakteristik tanaman yang baru. Sistem "*Survival of the fittest*" menjamin terseleksinya sel-sel dengan toleransi yang paling tinggi terhadap logam dan memiliki penampilan terbaik (Brooks, 1992).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pembahasan di atas dapat disimpulkan bahwa *phytomining* memiliki keunggulan dibandingkan pertambangan konvensional. *Phytomining* lebih ramah lingkungan, tidak membahayakan ekosistem, kesehatan, dan bencana ekologis, serta membuka peluang usaha bagi masyarakat sekitar. Perencanaan *phytomining* yang dapat dilakukan yaitu dengan mengetahui kondisi geologis, kondisi abiotik dan biotik, perhitungan lahan dan prediksi besar potensi emas, pemilihan spesies tumbuhan dan perhitungan jumlah tanaman, rencana desain penanaman tanaman *phytomining*, persiapan kegiatan penelitian kandungan Au, skrining dan pengujian kandungan Au tanaman, melakukan analisis ekonomi dan model kemungkinan ekonomi, mengetahui jenis-jenis tanaman yang akan digunakan, mengetahui batas konsentrasi dan potensi *phytomining*, mengetahui strategi potensial untuk meningkatkan *phytomining* yaitu dengan menggunakan hiperakumulator dengan biomassa tinggi, pH yang rendah, pemberian pupuk dan khelat, serta menyeleksi tanaman dengan kultur jaringan. Pemrosesan biomassa dapat dilakukan dengan tiga cara yaitu seperti pengomposan, pembakaran, gasifikasi atau hidrometalurgi. Perencanaan tambang juga mencakup K3 serta pemantauan lingkungan sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, H., Khan, E., Sajad, M.A., (2013). *Phytoremediation of heavy metals - Concept and Applications. Chemospher*, 9, pp. 869-881.
- Anderson, C.W.N., Brooks, R., Stewart, R., Simcock, R., Robinson, B., (1999). *The Phytoremediation and Phytomining of Heavy Metals. Pacrim 99, Ball, Indonesia*, pp. 127-135.
- Antono, H.T, Ali R.K., M. Lutfi, Wahyu A.S., Sri H., Herni K., Wulandari S., Lasmaria S.,

- Nia R H., Marsen A., dan Hasnia A., (2014). *Optimalisasi Penerapan Phytomining Pada Pertambangan Emas*. Puslitbang Teknologi Mineral dan Batubara - tekMIRA.
- Arifin, M. A., 2019. *Gerakan Sosial dan Perubahan Kebijakan: Studi Kasus Gerakan Masyarakat Silo Dalam Pencabutan Izin Usaha Tambang Emas Di Jember*.
- Awaludin, Gde Dharma A., Yusuf P., (2020). “Kajian Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (K3) Pada Area Pengolahan Batu Andesit di PT. Niat Karya Di Kecamatan Utan Kabupaten Sumbawa Besar”. *Jurnal Ulul Albab*, 24(1), pp. 26-34.
- Brooks, R.R. et al., (1992). *The serpentine vegetation of Goiás State, Brazil, in The Vegetation of Serpentine Soils (Baker, A.J.M. et al., eds)*, pp. 67–81
- Brown SL, Chaney RL, Angle JS, Baker JM., (1995a). *Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator Thlaspi caerulescens grown in nutrient solution*. *Soil Sci Soc Am J*, pp. 59:125-133.
- Brown SL, Chaney RL, Angle JS, Baker JM. (1995b). *Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator Thlaspi caerulescens and Silene vulgaris grown on sludge-amended soils in relation to total soil metals and soil pH*. *Environ Sci Technol*, 29, pp. 1581-1585.
- Chaney RL et al., (1995). *Potential use of metal hyperaccumulators*. *Mining Environ Manag*, 3, pp. :9-11.
- Cui, J., Zhang, L., (2008). “Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review”. *Journal Hazard Mater*, 158 (2–3), pp. 228–256.
- Dinh, T., Dobo, Z. and Kovacs, H., (2022). “Phytomining of noble metals—A review”. *Chemosphere*, pp. 286.
- Hidayati, N., 2005. *Fitoremediasi dan Potensi Tumbuhan Hiperakumulator*, pp. 35-40.
- Knox AS, Seaman J., Andriano D.C., Pierzynski G., (2000). *Chemostabilization of metals in contaminated soils*. Di dalam: *Wise DL, Trantolo DJ, Cichon EJ, Inyang HI, Stottmeister U (ed). Bioremediation of Cotaminated Soils*. New York: Marcek Dekker Inc, pp. 811-836.
- Robert R. et.al., (1998). *Phytomining. Prespective*, 3(9), pp. 359-361.
- Robinson, B.H., Brooks, R.R. dan Clothier, B.E., (1999). “Soil amendments affecting nickel and cobalt uptake by Berkheya Coddii: Potential Use for Phytomining and Phytoremediation”. *Annals of Botany*. Pp. 84: 689-694.
- Rohadatul, A. Aisy dan Harmin Sulistiyaningsih T., (2022). “Kajian Phytominnig Nikel di Lokasi Penambangan Nikel di Papua Barat”. *Jurnal Teknik*, 11(2), pp. D63-D68.
- Salt DE., (2000). *Phytoextraction: present applications and future promise*. Di dalam: *Wise DL, Trantolo DJ, Cichon EJ, Inyang HI, Stottmeister U (ed). Bioremediation of Contaminated Soils*. New York: Marcek Dekker Inc, pp. 729-743.
- Schrama, F.N.H., Beunder, E.M., Berg, B.V. and Boom, R., (2017). *Sulphur removal in ironmaking and oxygen steelmaking, Ironmaking And Steelmaking*.
- Sheoran, V., Sheoran, A.S. and Poonia, P., (2013). “Phytomining of gold: A review”. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, pp. 42–50.
- Van der Ent, A.V., Baker, A.J.M., Reeves, R.D., Chaney, R.L., Anderson, C.W.N., Meech, J.A., Erskine, P.D., Simonnot, M-O., Vaughan, J., Morel, J.L., Echevarria, G., Fogliani, B., Rongliang, Q., and Mulligan, D.R., (2015). *Agromining: Farming for Metals in the Future. Environmental Aciencie and Technology*, 49, pp. 4773-4780.
- Wilson-Corral, V., Anderson, C., Rodriguez-Lopez, M., Arenas-Vargas, M. dan Lopez-Perez, J., (2011). “Phytoextraction of gold and copper from mine tailings with Helianthus annuus L. and Kalanchoe serrata L”. *Minerals Engineering*, 24(13), pp. 1488–1494.