

Kajian *Phytomining* Nikel di Lokasi Penambangan Nikel di Papua Barat

Alya Rohadatul 'Aisy dan Harmin Sulistiyaning Titah
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: harmin_st@its.ac.id

Abstrak—Pengambilan nikel dari dalam tanah di Pulau Gag, Papua Barat masih menggunakan metode konvensional, yaitu dengan penggalian, pengerukan, dan penambangan, yang berpotensi dapat merusak lingkungan, sehingga perlu dilakukan evaluasi dan penerapan teknologi yang ramah lingkungan, seperti *phytomining*. *Phytomining* dalam penerapannya memanfaatkan tumbuhan dengan sifat hiperakumulator dapat menyerap logam nikel dari dalam tanah, tanpa perlu dilakukan penggalian dan penambangan yang dapat merusak kondisi dari tanah tersebut. Proses pengambilan nikel tersebut dilakukan dengan cara menanam tumbuhan yang bersifat hiperakumulator. Adanya penerapan teknologi *Phytomining* tersebut, diharapkan dapat meningkatkan estetika lingkungan dan juga meningkatkan ekonomi dari masyarakat di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat. Mekanisme proses yang terjadi selama kegiatan *phytomining* di lokasi studi, yaitu pemilihan lahan ultramafik yang terkandung nikel di dalamnya, kemudian penanaman dan pembibitan tumbuhan hiperakumulator, penyerapan nikel dari dalam tanah oleh tumbuhan hiperakumulator melalui proses fitostabilisasi, dilanjutkan dengan pengakumulasian Ni di dalam akar tumbuhan, setelah itu dilakukan pemanenan. Proses selanjutnya yaitu penimbangan tumbuhan yang telah dipanen untuk memperoleh berat basah biomassa tumbuhan tersebut, lalu dilakukan metode pasca panen untuk memperoleh logam nikel, yang dapat diolah menjadi berbagai bentuk. Faktor-faktor yang mempengaruhi pelaksanaan *phytomining* nikel, yaitu faktor abiotik (pH, senyawa pengelat, ketersediaan biomassa, dan kelarutan) dan faktor biotik (mikoriza dan bakteri). Tumbuhan yang diterapkan untuk ditanam dalam *phytomining* di lokasi studi kasus, yaitu *Vetivera zizanioides L.*, yang berjenis rumput-rumputan. Jumlah Ni yang dihasilkan pada lahan seluas 0,2 hektar adalah 146.160 kg, sehingga jumlah tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* yang diperlukan sebanyak 4.350 tumbuhan.

Kata Kunci—Nikel, *Phytomining*, Fitostabilisasi, Tumbuhan Hiperakumulator, Pulau Gag Papua Barat.

I. PENDAHULUAN

INDONESIA merupakan negara yang kaya akan budaya, sumber daya manusia, dan juga sumber daya alam. Sumber daya alam yang terdapat di Indonesia memiliki peran penting dalam keberlangsungan hidup manusia, baik sumber daya alam hayati ataupun non-hayati. Keberadaan sumber daya alam di Indonesia dapat menjadi dasar pembangunan nasional dan berpotensi sebagai sumber pendapatan bagi manusianya. Salah satu sumber daya alam non-hayati yang dimiliki Negara Indonesia berupa bahan tambang, yaitu nikel. Negara Indonesia merupakan salah satu Negara penghasil nikel terbanyak yang keberadaannya tersebar di beberapa wilayah, salah satunya Papua Barat, tepatnya di Pulau Gag. Di Pulau Gag Papua Barat, perolehan bahan tambang nikel dilakukan dengan cara menambang, melalui beberapa proses, seperti penggalian, pengerukan, dan penambangan, seperti pada gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penambangan Nikel di Pulau Gag, Papua Barat.

Kegiatan yang dilakukan berpotensi merusak lingkungan sekitar, sehingga perlu dilakukan evaluasi dari metode penambangan yang ada, serta penerapan teknologi untuk menambang nikel dari dalam tanah yang lebih ramah lingkungan, yaitu fitoremediasi.

Fitoremediasi adalah sebuah teknologi yang merupakan bagian dari fitoteknologi pengolahan lingkungan dengan media tumbuhan yang dimanfaatkan untuk mengurangi terjadinya pencemaran di lingkungan. Salah satu pencemaran lingkungan yang terjadi disebabkan oleh adanya kandungan logam berat [1]. Dalam proses penambangan nikel ini, teknologi fitoremediasi yang dijadikan sebagai bahan kajian yaitu *phytomining*. *Phytomining* merupakan sebuah teknologi berbasis penanaman, pemanenan, dan pemrosesan logam oleh suatu tumbuhan hiperakumulator, untuk pemulihan logam dan juga menguntungkan secara ekonomi [2]. Hiperakumulator sendiri mampu untuk mempertahankan dan mengakumulasi suatu unsur logam tertentu dengan konsentrasi tinggi dalam suatu biomassa di atas permukaan tanah, tanpa adanya gejala toksisitas [3].

Tumbuhan dengan sifat hiperakumulator dapat menyerap logam nikel dari dalam tanah, tanpa perlu dilakukan penggalian dan penambangan yang dapat merusak kondisi dari tanah tersebut. Dengan diterapkannya teknologi *phytomining* tersebut, diharapkan dapat meningkatkan estetika lingkungan dan juga meningkatkan ekonomi dari masyarakat di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat. Kajian literatur ini diharapkan dapat memberikan referensi dan informasi terkait penerapan *phytomining* nikel, tumbuhan hiperakumulator yang berpotensi untuk ditanam, serta faktor-faktor apa saja yang mempengaruhi pelaksanaan *phytomining* nikel.

II. METODE KAJIAN

Metode yang digunakan dalam kajian ini terdiri dari ide

kajian, metodologi kajian literatur, serta *outline*. Ide dari kajian ini diperoleh dengan melakukan sebuah analisis, dengan membandingkan kondisi sebenarnya yang ada di lapangan (kondisi eksisting) dengan kondisi yang ideal. Metodologi kajian literatur yang dilakukan ini bertujuan untuk meningkatkan pemahaman terhadap suatu hasil dari kajian, yaitu studi kasus. Terdapat beberapa hal yang dikaji dalam kajian literatur, yaitu membahas dan mengkaji sub-topik yang telah ditentukan secara detail, terdapat *gap* atau permasalahan lingkungan beserta alternatif penyelesaian masalah melalui pendekatan kajian dengan menggunakan berbagai pustaka. penggunaan kata kunci untuk pencarian sumber literatur, seperti nikel, *phytomining*, fitostabilisasi, fitoremediasi, Pulau Gag, dan lain sebagainya. Pembatasan sumber literatur yang akan digunakan sebagai acuan agar sesuai dengan lingkup kajian yang akan dibahas. *Phytomining* ini akan diterapkan pada wilayah penghasil nikel di Indonesia, yaitu Pulau Gag, Papua Barat.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Gambaran Umum Lokasi Studi Kasus

Pulau Gag memiliki letak administratif di Distrik Waigeo Barat, Kabupaten Raja Ampat, Papua Barat. Pulau Gag mempunyai potensi sumber daya yang sangat tinggi, meliputi sumber daya mineral, perikanan, ekosistem mangrove, terumbu karang, rumput laut, dan biota laut lainnya [4]. Dalam menentukan penerapan teknologi *phytomining* di kawasan pertambangan di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat, tentu perlu dilakukan studi pendahuluan mengenai karakteristik lingkungan di lokasi studi kasus. Karakteristik lingkungan tersebut meliputi kondisi lahan yang akan dijadikan lokasi studi, ekosistem di lokasi studi, serta karakteristik lingkungan abiotik dan biotik. Wilayah di Pulau Gag yang terdapat kandungan bijih nikel di dalamnya yaitu sekitar 2/3 bagian dari luas Pulau Gag keseluruhan, sedangkan 1/3 sisanya merupakan daerah vulkanik [5].

Pulau Gag secara fisiologis terletak di sekeliling Laut Halmahera, yang memasuki zona samudera. Pulau Gag merupakan pulau terpencil dengan luasan wilayah 14,5 x 8 km², berbentuk oval, dengan berbagai elevasi ketinggian. Pulau Gag mempunyai 3 bentang alam, yaitu satuan perbukitan curam, satuan bergelombang landai, dan dataran. Sebagian besar wilayah Pulau Gag, tepatnya 2/3 luasan pulau merupakan satuan perbukitan dengan kemiringan yang curam, yang terletak pada bagian tengah sampai dengan selatan Pulau Gag [6]. Keberadaan nikel di daerah Pulau Gag, Papua Barat sesuai dengan kondisi geologinya, di mana batuan induk yang terdapat di Pulau Gag merupakan batuan ultramafik. Berdasarkan data yang diperoleh dari penelitian sebelumnya, seiring dengan bertambahnya kedalaman, maka terdapat pula logam-logam yang kandungannya semakin bertambah (Ni), berkurang (Co), dan cenderung stabil (Fe dan Mg). Selain terdapatnya kandungan logam di dalam tanah, terdapat pula karakteristik fisik dan kimia dari lahan penambangan nikel. Karakteristik tanah yang ada di Pulau Gag berdasarkan hasil rata-rata dari penelitian sebelumnya tercantum pada Tabel 1. Berdasarkan karakteristik tanah di lokasi studi kasus pada tabel 1, kondisi tanah di Pulau Gag termasuk dalam kondisi normal, dengan rentang pH tanah ultramafic pada keadaan normal sebesar 6,0-7,0. Selain itu,

terdapat pula kandungan zat lainnya di dalam tanah yang

Tabel 1.
Karakteristik Lingkungan di Pulau Gag Papua Barat

Karakteristik	Nilai Angka
pH	6,2
Total Organic Compound (TOC)	3,7
Total N	0,16
Total P	7,4 ppm
Total K	12,1 ppm
Alkalinitas (Na)	0,46
Rasio C/N	30,5
Unsur Mikro Ca	6,5
Unsur Mikro Mg	15,8

dapat membantu proses pertumbuhan tumbuhan dan penyerapan logam dari dalam tanah.

Selain karakteristik tanah di lokasi studi, terdapat pula karakteristik abiotik dan biotik dari lokasi studi, Faktor abiotik merupakan faktor yang mendukung dan memiliki pengaruh yang besar terhadap ketersediaan komponen biotik [7]. Terdapatnya faktor abiotik ini bertujuan agar tetap menjaga keseimbangan dan melengkapi komponen biotik lainnya [8]. Faktor abiotik yang dapat mempengaruhi *phytomining* yaitu, kelarutan (*solubility*), ketersediaan biomassa (*bioavailability*), pH, senyawa pengelat (*chelating agent*), di mana beberapa faktor yang telah dinyatakan tersebut saling berkaitan [9-10]. Sedangkan faktor biotik merupakan faktor yang berpengaruh terhadap terjadinya suatu proses pada tumbuhan [7], yaitu pertumbuhan, penyerapan zat, dan lain sebagainya [8]. Beberapa faktor biotik yang merupakan kunci dari suatu proses yang terjadi pada tumbuhan di antaranya: mikroba, bakteri, jamur (*fungi*), rimpang, hewan, dan tumbuhan lain [7]. Pada penerapan *phytomining*, faktor biotik yang mempengaruhi adalah mikoriza dan mikroorganisme lain. Mikoriza merupakan sebuah simbiosis yang saling menguntungkan (*mutualisme*) antara jamur (*fungi*) dengan sistem perakaran tumbuhan. Mikoriza berperan untuk membantu proses penyerapan zat-zat atau unsur hara yang ada pada tanah, serta berperan untuk meningkatkan pertumbuhan tumbuhan. Efektifitas dari mikoriza sangat dipengaruhi oleh faktor lingkungan abiotik lainnya, seperti pH, konsentrasi zat hara, kadar air, pemupukan, dan temperatur. Selain dipengaruhi oleh faktor lingkungan abiotik, mikoriza juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan biotik, yaitu spesies cendawan, tumbuhan inang, interaksi antar mikrobial, tipe perakaran dari inang, serta kompetisi antar mikoriza [11].

B. Perhitungan Lahan yang Dibutuhkan untuk Phytomining dan Prediksi Kandungan Nikel di Lokasi Studi Kasus

Luas Pulau Gag yaitu sebesar 6.060 hektar, dengan 2/3 bagian dari pulau tersebut terdapat banyak kandungan nikel. Perolehan nikel tersebut akan dilakukan dengan menerapkan suatu proses yang lebih ramah lingkungan, yaitu *phytomining*. *Phytomining* merupakan salah satu teknologi fitoremediasi. *Phytomining* adalah sebuah teknologi untuk mengeksplorasi logam kadar rendah yang berharga, dengan memanfaatkan biomassa tumbuhan, yang berfungsi sebagai media pengekstraksi logam dari dalam tanah. Berdasarkan literatur lain, *phytomining* adalah proses yang digunakan untuk ekstraksi logam dengan berbagai proses, seperti penanaman tumbuhan hiperakumulator, pemanenannya,

Tabel 2.
Persentase Kandungan Ni pada Kedalaman 0-2 meter

Section (m)	Kedalaman awal (0-1m)	Kedalaman akhir (1-2m)
0	1,30	1,45
5	1,51	1,60
10	1,51	1,50
15	1,32	1,31
20	1,23	1,24
25	1,15	1,12
Rata-rata Kandungan Ni pada Kedalaman total 2m		2,71

pembakaran, dan pengumpulan logam bijih rendah [12]. Beberapa keuntungan dalam penerapan *phytominig*, yaitu dapat menciptakan peluang kerja, 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, serta dapat membantu meningkatkan pendapatan dan infrastruktur yang ada [13].

Langkah awal dalam penerapan *phytominig* nikel yaitu menentukan lahan dan memperkirakan luasan lahan yang akan diterapkan *phytominig* nikel, di mana dalam penerapannya perlu dilakukan pembagian area untuk penanaman tumbuhan hiperakumulator nikel [6]. Luas lahan yang akan dihitung sebagai contoh yaitu sebesar 0,2 hektar, atau sama dengan 2.000 m², dengan kedalaman sekitar 2 meter. Sehingga, dapat diperoleh volume dari tanah yang terkandung nikel, yaitu:

$$\begin{aligned} \text{Volume Tanah} &= \text{Luas Lahan} \times \text{Kedalaman} \\ &= 2.000 \text{ m}^2 \times 2 \text{ m} \\ &= 4.000 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Pulau Gag mempunyai topografi yang tidak merata. terdapat beberapa lapisan tanah yang mengandung nikel di Pulau Gag [6]. Densitas tanah ultramafik pada bagian teratas, yaitu 1,35 g/cm³ [14]. Berdasarkan perhitungan volume tanah sebelumnya, maka dapat dilakukan perhitungan untuk memperoleh berat tanah, dengan cara mengalikan volume tanah dengan densitas tanah, sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Berat Tanah} &= \text{Volume Tanah} \times \text{Densitas Tanah} \\ &= 4.000 \text{ m}^3 \times 1.350 \text{ kg/m}^3 \\ &= 5.400.000 \text{ kg} \\ &= 5.400 \text{ ton} \end{aligned}$$

Berikut ini merupakan persentase kandungan nikel di lokasi studi pada kedalaman 0 sampai 2 meter yang ditunjukkan pada tabel 2. Berdasarkan tabel 2, maka diperoleh rata-rata persentase nikel yang terkandung pada kedalaman 0-2 meter tersebut sebesar 2,71%, maka dengan kedalaman 2 meter, luas lahan 0,2 hektar, serta berat tanah sebesar 5.400.000 kg, maka dapat dihitung jumlah nikel yang terkandung dengan cara mengalikan persentase rata-rata kandungan nikel pada kedalaman total (2 m) dengan berat tanah, sehingga jumlah nikel yang terkandung adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Nikel} &= \% \text{Kandungan Ni di Tanah} \times \text{Berat Tanah} \\ &= 2,71\% \times 5.400.000 \text{ kg} \\ &= 146.160 \text{ kg} \end{aligned}$$

C. Pemilihan Spesies Tumbuhan dan Perhitungan Jumlah Tumbuhan yang Diperlukan

Dalam penerapannya, *phytominig* memanfaatkan suatu

proses tumbuhan, yaitu fitoekstraksi dan fitostabilisasi. Fitoekstraksi merupakan salah satu cara tumbuhan dalam memproses pencemar, yang merupakan bagian dari fitoremediasi. Selain proses tumbuhan fitoekstraksi, pada penerapan *phytominig* ini juga memanfaatkan proses tumbuhan lainnya, yaitu fitostabilisasi. Fitostabilisasi adalah salah satu cara tumbuhan dalam memproses pencemar dengan cara membatasi pergerakan dan ketersediaan logam di dalam tanah dengan media akar [15]. Fitostabilisasi sendiri merupakan salah satu cara tumbuhan dalam memproses pencemar, yang merupakan bagian dari fitoremediasi. Fitostabilisasi dalam penerapannya memanfaatkan tumbuhan yang memiliki toleransi terhadap logam berat (tumbuhan hiperakumulator), untuk diakumulasikan pada bagian akar tumbuhan, dan mengurangi ketersediannya di dalam tanah. Dalam penerapan *phytominig* kali ini, proses tumbuhan yang dimanfaatkan yaitu fitostabilisasi [16]. *Phytominig* sendiri mempunyai beberapa tahapan, di antaranya pembudidayaan (*cropping*), pemanenan (*harvesting*), pengeringan (*drying*), pengabuan (*ashing*), dan *smelting bio-ore* [19-20].

Pemilihan spesies tumbuhan hiperakumulator menjadi penentu utama dalam penerapan proses fitostabilisasi. Keefektifan proses fitostabilisasi dapat meningkat, apabila memanfaatkan tumbuhan yang mempunyai sifat yang toleran terhadap logam berat, karena dalam penerapan fitostabilisasi ini, bagian akar tumbuhan menjadi hal terpenting dalam melakukan proses pengikatan logam berat, menstabilkan struktur tanah, dan mencegah tanah dari terjadinya erosi. Tumbuhan hiperakumulator yang akan dipilih harus mempunyai perakaran yang padat dan dapat menjangkau daerah yang luas, mampu memproduksi biomassa dalam jumlah banyak, serta pertumbuhannya yang cepat, dan dapat beradaptasi dalam berbagai kondisi yang ada di lingkungan sekitar [16]. Untuk meningkatkan efisiensi fitostabilisasi, perlu ditambahkan bahan organik atau anorganik lain pada tanah yang terkontaminasi logam berat [19]. Penerapan tersebut dapat menambah kandungan bahan organik dan nutrisi penting pada tanah, dan dapat meningkatkan pengaruh terhadap sifat fisik-kimia dan biologi, yang dapat meningkatkan perkembangbiakan tumbuhan dan juga *water holding capacity*. Mikroorganisme yang hidup pada bagian akar tumbuhan, seperti bakteri dan mikoriza, dapat membantu proses berlangsungnya fitostabilisasi. Mikroorganisme tersebut dapat meningkatkan efisiensi pemindahan logam berat dengan cara mengadsorpsi logam berat tersebut ke dalam dinding sel, memproduksi senyawa pengelat, dan melakukan proses presipitasi. Selain itu, bakteri dan mikoriza tersebut dapat meningkatkan permukaan dan kedalaman akar tumbuhan untuk melakukan proses fitostabilisasi dan melakukan filtrasi yang menjadi penghalang terjadinya translokasi ion logam dari akar menuju ke tajuk tumbuhan [16],[18].

Pada penerapan *phytominig* nikel tentu membutuhkan media tumbuhan yang akan digunakan dalam proses penyerapan logam nikel yang terdapat di dalam tanah ultramafik. Jenis tumbuhan tersebut dapat berupa tumbuhan berkayu (*Sarcotheca celebica*, *Knema matanensis*, *Phyllanthus insulae-japen*), perdu (*Thlaspi caerulescens* dan *Melastoma malabathricum*), dan rumput-rumputan (*Vetovera zizanioides L.*, *Phalaris arundinacea*, dan *Pennisetum*

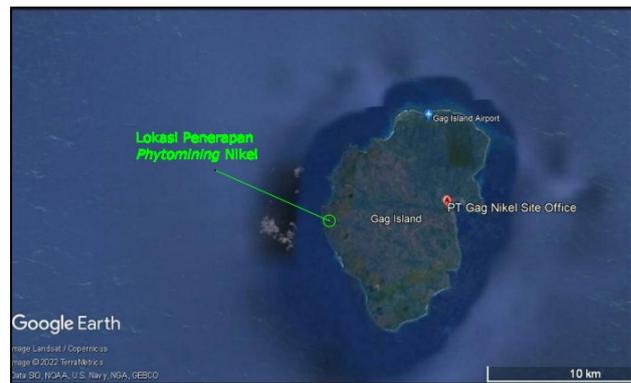


Gambar 2. Tumbuhan Hiperakumulator Terpilih (*Vetivera zizanioides L.*).

purpureum). Pemilihan spesies tumbuhan yang akan digunakan dalam penerapan *phytomining*, yaitu merupakan tumbuhan endemik atau *native plants*, yang keberadaannya diketahui dapat tahan terhadap kondisi ekstrim, serta dapat tumbuh di wilayah tanah dengan kandungan logam yang tinggi, memiliki tingkat pertumbuhan yang cepat, serta dapat menghasilkan biomassa tumbuhan yang banyak [10]. Jenis rumput-rumputan lebih sesuai digunakan dalam phytoekstraksi logam dibandingkan dengan jenis herba V-10 (*shrubs*) atau pohon (*trees*) karena tingkat pertumbuhannya yang cepat, memiliki biomassa yang besar (tumbuhan yang dapat dipanen beberapa kali dalam satu kali periode pertumbuhan sangat berpotensi untuk dimanfaatkan dalam ekstraksi logam) dan lebih mampu beradaptasi pada lingkungan yang ekstrim [21]. Dalam penerapan teknologi *phytomining*, terdapat tumbuhan yang digunakan untuk mengambil logam dari dalam tanah, di mana tumbuhan tersebut harus mempunyai sifat hiperakumulator terhadap suatu logam.

Karakteristik tumbuhan yang dapat ditanam untuk proses *phytomining*, yaitu memiliki tingkat pertumbuhan yang tinggi, bersifat hiperakumulator (mampu mengakumulasi logam dari dalam tanah dalam jumlah banyak), bersifat toleran terhadap logam berat beracun, dapat beradaptasi terhadap lingkungan dan iklim, memiliki ketahanan terhadap jangkitan penyakit, mudah dikembangbiakkan dan dipanen, dan merupakan tumbuhan endemik [22]. Metode penerapan penanaman tumbuhan di lokasi studi kasus adalah *single plant species*, dengan menggunakan tumbuhan berjenis rumput-rumputan, yaitu Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* (Rumput Vetiver atau Akar Wangi). Kelebihan dari penerapan penanaman tumbuhan dengan *single plant species*, yaitu dapat diterapkan pada berbagai skala, baik skala besar ataupun kecil, serta dapat fokus terhadap satu tumbuhan saja untuk penerapannya, sedangkan kekurangan dari *single plant species* sendiri, yaitu dalam penerapannya membutuhkan spesies tumbuhan dalam jumlah banyak [23]. Dalam pemilihannya, memerlukan ketepatan yang sangat tinggi, supaya tumbuhan yang terpilih tersebut dapat tumbuh dengan optimal pada lokasi studi kasus. Tumbuhan hiperakumulator terpilih dapat dilihat pada gambar 2.

Berikut merupakan perhitungan jumlah tumbuhan yang



Gambar 3. Lokasi Penerapan *Phytomining* Nikel di Pulau Gag, Papua Barat.

diperlukan dalam penerapan *phytomining* nikel oleh Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* Kemampuan akumulasi Ni oleh Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* adalah sebesar 8,33 mg/kg.

$$\begin{aligned} \text{Berat Kering Tumbuhan yang Diperlukan} &= \text{Kandungan Ni di dalam Tanah} \times \text{Kemampuan Uptake Ni/kg Berat Kering Tumbuhan} \\ &= 146.140 \text{ kg} \times 8,33 \text{ mg/kg} \\ &= 1.217.512,8 \text{ mg Berat Kering Tumbuhan} \end{aligned}$$

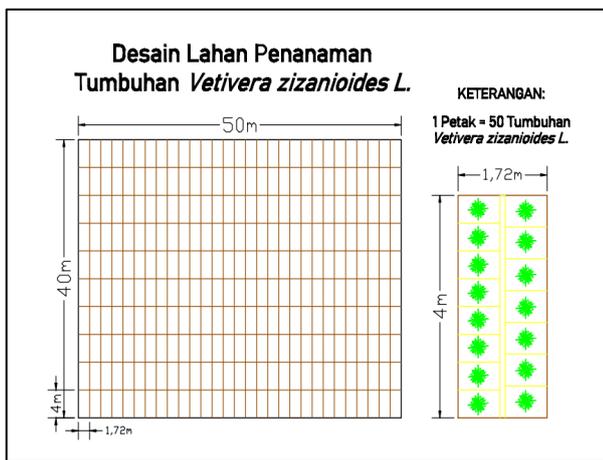
Berat kering tumbuhan yang diperlukan secara total adalah 1.217.512,8 mg berat kering tumbuhan. Bila setiap tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* mempunyai berat kering sebesar 280 mg, maka jumlah tumbuhan yang diperlukan dapat diperoleh dengan cara membagi hasil dari berat kering total yang diperlukan untuk penerapan *phytomining* dengan berat kering dari setiap tumbuhan *Vetivera zizanioides L.*, sehingga jumlah tumbuhan yang dibutuhkan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Tumbuhan } Vetivera zizanioides L. &= \frac{\text{Berat kering tumbuhan yang diperlukan}}{\text{Berat kering 1 tumbuhan } V. zizanioides L.} \\ &= \frac{1.217.512,8 \text{ kg}}{280 \text{ mg}} \\ &= 4.350 \text{ Tumbuhan } Vetivera zizanioides L. \end{aligned}$$

D. Rencana Desain *Phytomining* di Lokasi Studi Kasus

Rencana desain yang akan diterapkan di lokasi studi kasus adalah *single plant species*, dengan menggunakan tumbuhan berjenis rumput-rumputan, yaitu Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* (Rumput Vetiver atau Akar Wangi) sebanyak 4.350 tumbuhan, yang akan ditanamkan pada lahan dengan luas 0,2 hektar atau 2.000 m². Kelebihan dari penerapan penanaman tumbuhan dengan *single plant species*, yaitu dapat diterapkan pada berbagai skala, baik skala besar ataupun kecil, serta dapat fokus terhadap satu tumbuhan saja untuk penerapannya, sedangkan kekurangan dari *single plant species* sendiri, yaitu dalam penerapannya membutuhkan spesies tumbuhan dalam jumlah banyak [24].

Penerapan *phytomining* pada wilayah tersebut dirasa efektif, karena mempunyai ketinggian sekitar 50 sampai 60 meter, dengan posisi lahan sedikit miring, dan terdapat banyak kandungan nikel di dalamnya, sehingga diterapkan penanaman tumbuhan hiperakumulator nikel, yaitu *Vetivera zizanioides L.* atau pada umumnya disebut Rumput Vetiver atau Tumbuhan Akar Wangi. Lokasi Penerapan *Phytomining* Nikel dapat dilihat pada gambar 3 dan berikut merupakan desain penanaman *Vetivera zizanioides L.* pada lokasi studi, seluas 0,2 Ha atau 2000 m² (50 m x 40 m). Gambar 4



Gambar 4. Desain Penanaman Tumbuhan di Lokasi Studi Kasus

merupakan desain penanaman tumbuhan pada lokasi studi.

E. Mekanisme Proses Phytomining Nikel di Lokasi Studi Kasus

Secara umum, yang termasuk dalam mekanisme hiperakumulasi yaitu, stimulasi penyerapan logam di akar, pengurangan penyerapan logam di vakuola akar, pemuatan xilem yang efisien dan transportasi xilem, penyerapan logam yang kuat dan kompartemen di daun. Berdasarkan penerapan teknologi *phytomining* nikel, terdapat beberapa mekanisme proses yang terjadi di lokasi studi, yang bertempat di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat. Berikut merupakan mekanisme proses *phytomining* nikel yang terjadi di lokasi studi:

1. Penerapan *phytomining* pada wilayah ultramafik pada zona lapisan atas, zona laterit, dan zona saprolit.
2. Penanaman atau pembibitan Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* pada wilayah yang telah ditetapkan. Penanaman tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* diterapkan dengan cara stek batang tumbuhan tersebut, kemudian ditumbuhkan pada media *polybag* selama 2 minggu, kemudian dilakukan pemindahan tumbuhan pada lokasi yang telah disiapkan, lalu dilakukan penanaman sesuai dengan desain penerapan, dan dilakukan penyiraman. Sebelum dilakukan pemindahan tumbuhan, dilakukan penyesuaian tanah pada lokasi studi terlebih dulu. Tumbuhan *V. zizanioides L.* dibiarkan tumbuh selama kurang lebih 24 bulan. Pada saat pertumbuhan, bagian daun dan tajuk tumbuhan *V. zizanioides L.* dipangkas secara berkala untuk dimanfaatkan sebagai kompos atau dapat diolah menjadi barang lain.
3. Tumbuhan hiperakumulator nikel tumbuh dan menyerap kandungan Ni yang terdapat di dalam tanah, kemudian mengakumulasi pada bagian akar tumbuhan, tanpa adanya perpindahan menuju ke bagian tajuk tumbuhan, serta penambahan *chelating agents* atau bahan organik lainnya, yang mendukung pertumbuhan dan penyerapan logam oleh tumbuhan hiperakumulator.
4. Tumbuhan hiperakumulator yang telah mengandung Ni dengan konsentrasi tertentu akan dipanen bagian akarnya untuk dikeringkan, kemudian dilakukan proses pengabuan untuk memperoleh bijih Ni, sedangkan bagian tajuk tumbuhan akan digunakan sebagai pakan ternak dan/atau kompos untuk penerapan *phytomining* selanjutnya.

5. Bijih Ni yang telah terolah, selanjutnya dilakukan proses peleburan dan pemurnian bijih untuk memperoleh logam Ni.

F. Metode Pasca Panen Nikel di Lokasi Studi Kasus

Berikut merupakan prosedur pengujian yang dilakukan di lokasi studi kasus:

1. Pemanenan biomassa tumbuhan *Vetivera zizanioides L.*, kemudian dilakukan penimbangan untuk memperoleh berat basah tumbuhan tersebut.
2. Proses pengeringan dengan oven dilakukan pada suhu 105°C selama 1 hari, atau pada suhu 80°C selama 2 hari, untuk memperoleh biomassa tumbuhan dalam keadaan kering.
3. Dilakukan penimbangan biomassa tumbuhan yang telah dioven, untuk memperoleh berat kering dari tumbuhan tersebut.
4. Proses pengabuan dengan menggunakan *furnace* pada suhu $\pm 450^\circ\text{C}$ selama ± 8 jam, hingga sampel mengering dan menjadi abu.
5. Dilakukan penambahan dari salah satu larutan berikut: H_2SO_4 , NH_4OH , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.
6. Abu biomassa tersebut dilarutkan dengan larutan tersebut, kemudian dilakukan pengadukan menggunakan autoklaf, untuk menstabilkan Ni dengan elemen tidak murni lainnya, seperti Fe.
7. Hasil pengadukan tersebut dipulihkan dengan cara mereduksi logam menggunakan proses elektrokimia, sehingga dapat diperoleh logam nikel dalam berbagai bentuk.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan kajian mengenai penerapan *phytomining* nikel yang bertempat di lokasi pertambangan nikel di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat, maka dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Mekanisme proses yang terjadi selama kegiatan *phytomining* di lokasi studi, yaitu penentuan wilayah penerapan *phytomining*, penanaman tumbuhan *Vetivera zizanioides L.*, penyerapan dan pengakumulasi logam oleh tumbuhan, penambahan *chelating agents* atau bahan organik lainnya untuk mendukung pertumbuhan dan mempercepat proses penyerapan logam dari dalam tanah oleh tumbuhan, pemanenan tumbuhan, pengeringan biomassa tumbuhan, pengabuan, peleburan, pelindian, pemulihan, dan pemurnian untuk memperoleh logam nikel. Selain mekanisme yang terjadi pada penerapan *phytomining*, terdapat pula faktor-faktor yang mempengaruhi pelaksanaan *phytomining*, yaitu faktor abiotik (pH, kelarutan, ketersediaan biomassa, senyawa pengelat) dan faktor biotik (mikoriza dan bakteri). (2) Jenis tumbuhan yang dapat digunakan dalam penerapan *phytomining* Ni di Pulau Gag, Raja Ampat, Papua Barat, yaitu berjenis rumput-rumputan, di mana tumbuhan tersebut adalah Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* (Tumbuhan Vetiver atau Akar Wangi). Berdasarkan jenis akarnya, Tumbuhan *Vetivera zizanioides L.* mempunyai jenis akar serabut, tanpa adanya stolon dan rhizoma, serta saling terkait antara satu dengan yang lain, sehingga dapat tumbuh secara masih dan secara tegak lurus menembus bagian dalam tanah hingga mencapai sekitar 2-4 meter. Selain itu, Tumbuhan Vetiver atau Akar Wangi ini dapat bertahan dalam kondisi apapun,

baik pada suhu tinggi mencapai 55°C ataupun rendah mencapai -14°C, dengan kemampuan untuk menoleransi berbagai faktor edafik, dengan rentang pH 3,3 hingga 9,5. (3) Hasil pengkajian studi kasus penerapan teknologi *phytomining* di Pulau Gag, Papua Barat, yaitu terdapat kandungan Nikel sebanyak 146.160 kg pada lahan seluas 0,2 Hektar, di mana pengambilan nikel tersebut dilakukan oleh tumbuhan hiperakumulator nikel, yaitu *Vetivera zizanioides* L. dengan kedalaman 2 m. Jumlah Tumbuhan Vetiver atau Akar Wangi yang diperlukan, yaitu sebanyak 4.350 tumbuhan. Penerapan *phytomining* di Pulau Gag menggunakan sistem *single plant species*, yaitu dengan penanaman satu jenis tumbuhan pada wilayah yang akan diterapkan *phytomining* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B. V. Tangahu, H. S. Titah, and S. Mangkoedihardjo, *Teknologi Remediasi Lingkungan*. Yogyakarta: Mobius, 2018.
- [2] A. van der Ent *et al.*, "Agromining: farming for metals in the future?," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 8, pp. 4773–4780, 2015, doi: 10.1021/es506031u.
- [3] A. van der Ent, A. J. M. Baker, R. D. Reeves, A. J. Pollard, and H. Schat, "Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction," *Plant Soil*, vol. 362, no. 1–2, pp. 319–334, 2013, doi: 10.1007/s11104-012-1287-3.
- [4] Pemerintah Kabupaten Raja Ampat, "Peta Administratif Kabupaten Raja Ampat," *Dinas Komunikasi Informatika Persandian dan Statistik*, 2016. <https://rajaampatkab.go.id/administrasi>.
- [5] G. Arofat, "Manajemen stockpile dalam meningkatkan keefektifan dan keteraturan stockpile PT Gag Nikel," in *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 2019, pp. 159–166.
- [6] S. Permanadewi, J. Wahyudiono, and A. Tampubolon, "Cebakan nikel laterit di Pulau Gag, Kabupaten Raja Ampat, Provinsi Papua Barat," *Buletin Sumber Daya Geologi*, vol. 12, no. 1, pp. 55–70, 2017.
- [7] S. Wahyuningsih, Achyani, and H. Santoso, "Faktor biotik dan abiotik yang mendukung keragaman tumbuhan paku (pteridophyta) di kawasan hutan gisting permai Kabupaten Tanggamus Lampung," *BioloVA*, vol. 2, no. 1, pp. 64–71, 2021, doi: 10.24127/bioloVA.v2i1.293.
- [8] N. D. H. Sitanggang and Yulistiana, "Peningkatan hasil belajar ekosistem melalui penggunaan laboratorium alam," *Form. J. Ilm. Pendidik. MIPA*, vol. 5, no. 2, pp. 156–167, 2015, doi: 10.30998/formatif.v5i2.335.
- [9] M. Rahmansyah, N. Hidayati, and T. Juhaeti, "Tumbuhan akumulator untuk fitoremediasi lingkungan tercemar merkuri dan sianida penambangan emas," *Lemb. Ilmu Pengetah. Indones.*, 2009.
- [10] H. T. Antonio *et al.*, "Optimalisasi penerapan *phytomining* pada pertambangan emas," Bandung, 2014.
- [11] N. Garg and S. Chandel, "Arbuscular mycorrhizal networks: process and functions," *Agron. Sustain. Dev.*, vol. 30, pp. 581–599, 2010, doi: 10.1051/agro:2009054.
- [12] T. Rosenkranz, C. Hipfinger, C. Ridard, and M. Puschenreiter, "A nickel *phytomining* field trial using *Odontarrhena chalcidica* and *Noccaea goesingensis* on an Austrian serpentine soil," *J. Environ. Manage.*, vol. 242, pp. 522–528, 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.04.073.
- [13] P. Kumari, P. Kumar, and T. Kumar, "An overview of *phytomining* : a metal extraction process from," *J. Emerg. Technol. Innov. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 1367–1376, 2019.
- [14] J. M. Supit and M. A. Asy'ari, "Pengamatan unsur geokimia batuan ultramafik mineral," *J. Poros Tek.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–6, 2013.
- [15] A. Sumiahadi and R. Acar, "A Review Of Phytoremediation Technology: Heavy Metals Uptake By Plants," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 142, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/142/1/012023.
- [16] A. Yan, Y. Wang, S. N. Tan, M. L. Mohd Yusof, S. Ghosh, and Z. Chen, "Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land," *Front. Plant Sci.*, vol. 11, no. 359, pp. 1–15, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00359.
- [17] P. N. Nkrumah *et al.*, "Current status and challenges in developing nickel *phytomining*: an agronomic perspective," *Plant Soil*, vol. 406, no. 1–2, pp. 55–69, 2016, doi: 10.1007/s11104-016-2859-4.
- [18] V. Sheoran, A. S. Sheoran, and P. Poonia, "Phytomining: a review," *Miner. Eng.*, vol. 22, no. 12, pp. 1007–1019, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>.
- [19] A. Burges, I. Alkorta, L. Epelde, and C. Garbisu, "From phytoremediation of soil contaminants to phytomanagement of ecosystem services in metal contaminated sites," *Int. J. Phytoremediation*, vol. 20, no. 4, pp. 384–397, 2018, doi: 10.1080/15226514.2017.1365340.
- [20] V. Göhre and U. Paszkowski, "Contribution of the arbuscular mycorrhizal symbiosis to heavy metal phytoremediation," *Planta*, vol. 223, no. 6, pp. 1115–1122, 2006, doi: 10.1007/s00425-006-0225-0.
- [21] R. N. Malik, S. Z. Husain, and I. Nazir, "Heavy metal contamination and accumulation in soil and wild plant species from industrial area of Islamabad, Pakistan," *Pakistan J. Bot.*, vol. 42, no. 1, pp. 291–301, 2010.
- [22] H. Ali, E. Khan, and M. A. Sajad, "Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications," *Chemosphere*, vol. 91, no. 7, pp. 869–881, 2013, doi: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
- [23] K. N. Ghaissani, "T Kajian Fitoremediasi untuk Rehabilitasi Lahan Pertanian Akibat Tercemar Limbah Industri Pertambangan Emas," Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Surabaya, 2022.
- [24] K. N. Ghaissani and H. S. Titah, "Kajian fitoremediasi untuk rehabilitasi lahan pertanian akibat tercemar limbah industri pertambangan emas," *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 1, 2022, doi: 10.12962/j23373539.v11i1.82682.