

Potensi *Phytomining* Nikel oleh Tumbuhan Herba pada Lahan Bekas Penambangan di Kabupaten Konawe

Dhea Adalati Az-Zahra¹, Eni Muryani^{1*}, Agus Bambang Irawan¹, dan Johan Danu Prasetya¹

¹ Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, Indonesia;
*e-mail: eni.muryani@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Lahan dengan kadar nikel rendah seringkali tidak dimanfaatkan meskipun sebenarnya memiliki potensi untuk dikelola dan dimanfaatkan dengan proses *phytomining*. Proses ini memanfaatkan tumbuhan yang memiliki kemampuan melakukan akumulasi nikel dan telah beradaptasi pada lahan tersebut. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis keragaman dan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) tumbuhan herba pada daerah penelitian serta menganalisis potensi dan aplikasi penerapan *phytomining* pada daerah penelitian. Penelitian dilakukan di wilayah penambangan nikel di Kabupaten Konawe, Provinsi Sulawesi Tenggara. Pengamatan jenis tumbuhan dilakukan pada 12 lokasi pengamatan dan pengambilan sampel dilakukan pada 6 lokasi pengamatan. Sampel yang diambil berupa sampel tumbuhan utuh dan tanah tempat tumbuhnya tumbuhan tersebut. Metode analisis kadar nikel menggunakan *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) Flame. Sedangkan metode analisis yang digunakan adalah metode matematis yaitu perhitungan nilai BCF dan bioakumulasi. Hasil menunjukkan bahwa ditemukan 9 spesies tumbuhan herba pada daerah penelitian. Potensi *phytomining* tumbuhan herba berdasarkan nilai BCF adalah rendah hingga sedang (0,02 – 0,28). Spesies dengan nilai BCF tertinggi adalah *Pityrogramma calomelanos* (L.) sebesar 0,28. Tumbuhan yang memiliki nilai bioakumulasi tertinggi adalah *Pityrogramma calomelanos* (L.) dengan nilai bioakumulasi nikel sebesar $4,67 \times 10^{-2}$ mg. *P. calomelanos* memiliki potensi *phytomining* sebesar 11,66 gram/ha. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tumbuhan herba lokal memiliki potensi untuk mendukung penerapan *phytomining* yang ramah lingkungan serta dapat berkontribusi dalam strategi rehabilitasi lahan pascatambang nikel secara berkelanjutan.

Kata kunci: *Bioconcentration Factor* (BCF), Logam Berat, Nikel, *Phytomining*, Tumbuhan Herba

ABSTRACT

Land with low nickel content is often underutilized despite its potential to be managed and utilized by the *phytomining* process. This process utilizes plants that have the ability to accumulate nickel and have adapted to the land. The purpose of this study was to analyze the diversity and *Bioconcentration Factor* (BCF) value of herbaceous plants in the study area and to analyze the potential and application of *phytomining* in the study area. The research was conducted in the nickel mining area in Konawe Regency, Southeast Sulawesi Province. Observations of plant species were carried out at 12 observation locations and sampling was carried out at 6 observation locations. Samples are taken in the form of whole plant samples and soil where the plants grow. The method of analyzing nickel levels using *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) Flame. While the analytical method used is a mathematical method, namely the calculation of BCF and bioaccumulation values. The results showed that 9 species of herbaceous plants were found in the study area. The *phytomining* potential of herbaceous plants based on the BCF value is low to medium (0.02 - 0.28). The species with the highest BCF value was *Pityrogramma calomelanos* (L.) at 0.28. The plant with the highest bioaccumulation value was *Pityrogramma calomelanos* (L.) with a nickel bioaccumulation value of 4.67×10^{-2} mg. *P. calomelanos* has a *phytomining* potential of 11.66 grams/ha. The findings of this study indicate that local herbaceous plants have the potential to support environmentally friendly *phytomining* and may contribute to sustainable post-mining land rehabilitation strategies in nickel mining areas.

Keywords: *Bioconcentration Factor* (BCF), Heavy Metal, Herbaceous Plant, Nickel, *Phytomining*

Citation: Az-Zahra, D. A., Muryani, E., Irawan, A. B., dan Prasetya, J. D. (2026). Potensi *Phytomining* Nikel oleh Tumbuhan Herba pada Lahan Bekas Penambangan di Kabupaten Konawe. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(1), 158-167, doi:10.14710/jil.24.1.158-167

1. PENDAHULUAN

Persebaran bijih nikel laterit di Indonesia banyak di temukan di Sulawesi, Kepulauan Maluku dan Halmahera, Papua, dan sedikit di Kalimantan.

Sulawesi Tenggara, sebagai contoh, menampung tambang nikel terbesar di Indonesia dengan luas mencapai 198.624,66 ha (Suwardi & Randrikasari, 2023). Kegiatan pertambangan nikel di Sulawesi

Tenggara telah meninggalkan lahan-lahan bekas tambang yang mengandung konsentrasi nikel yang masih cukup tinggi, namun tidak ekonomis untuk ditambang secara konvensional. Nikel pada konsentrasi yang rendah dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman. Namun pada konsentrasi yang lebih tinggi nikel dapat bertindak sebagai racun bagi tumbuhan serta dapat mencemari tanah (Hayyat *et al.*, 2020).

Phytomining merupakan metode inovatif yang dapat digunakan untuk mengekstraksi logam berat dari tanah dengan cara yang ramah lingkungan dan relatif murah (Miteva *et al.*, 2022). Metode ini memiliki potensi untuk diaplikasikan pada lahan yang telah mengalami pengupasan dan substrat yang mengandung kadar nikel di bawah batas ambang (cut off grade/COG) (Van der Ent *et al.*, 2013). Tiga tahapan utama dalam penerapan *phytomining* meliputi penanaman jenis tumbuhan hiperakumulator, pemanenan biomassa, dan pembakaran biomassa untuk menghasilkan bio-ore (Kusuma & Haeruddin, 2022). Spesies tanaman untuk fitoekstraksi harus memiliki toleransi yang tinggi terhadap efek toksik logam berat, kemampuan ekstraksi yang tinggi dengan akumulasi logam berat tingkat tinggi pada bagian tanaman di atas permukaan tanah, pertumbuhan yang cepat dengan produksi biomassa yang tinggi, tunas yang melimpah dan sistem perakaran yang ekstensif, dan mekanisme adaptasi yang baik (Kovačević *et al.*, 2025).

Tumbuhan jenis rumput lebih banyak digunakan untuk fitoekstraksi daripada semak atau pohon karena tingkat pertumbuhan yang tinggi, lebih mudah beradaptasi dengan lingkungan yang mengalami cekaman logam berat dan menghasilkan biomassa yang tinggi (Liu *et al.*, 2018). Tumbuhan herba adalah tumbuhan pendek dengan tinggi antara 0-3 meter yang sedikit memiliki jaringan kayu dan memiliki daya saing serta adaptasi yang tinggi terhadap lingkungan yang ekstrem (Nora *et al.*, 2018). Penggunaan tumbuhan herba sebagai agen *phytomining* menjadi fokus penelitian karena kemampuan adaptasinya yang tinggi dan pertumbuhannya yang relatif cepat. Adapun tumbuhan yang dapat digunakan dalam *phytomining* adalah tumbuhan dengan sifat hiperakumulator. Tumbuhan tersebut memiliki kemampuan untuk mengabsorpsi dan mengkonsentrasi zat pencemar di dalam struktur jaringannya (Saim *et al.*, 2020).

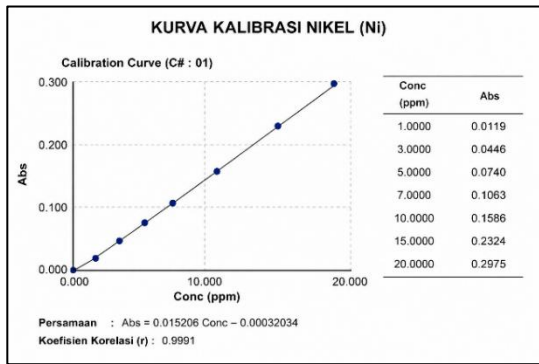
Penelitian ini bertujuan untuk (1) Menganalisis keragaman dan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) tumbuhan herba pada daerah penelitian, dan (2) Menganalisis potensi dan aplikasi penerapan *phytomining* pada daerah penelitian. Sebagian besar penelitian *phytomining* terdahulu berfokus pada tumbuhan hiperakumulator yang belum tentu sesuai dengan kondisi lingkungan lokal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji potensi tumbuhan herba adaptif lokal di Konawe dalam menyerap nikel sebagai alternatif *phytomining* pada lahan berkadar nikel rendah.

2. METODE PENELITIAN

Daerah penelitian berada di wilayah penambangan nikel di Kabupaten Konawe, Provinsi Sulawesi Tenggara dan secara geografis lokasi terletak pada koordinat $x = 415335$ dan $y = 9563976$. Analisis vegetasi dilakukan menggunakan plot persegi berukuran 1×1 m sebanyak 12 plot yang terbagi menjadi 6 plot pada area sekitar *stockpile* dan sedimen *pond*, serta 6 plot pada lahan tambang. Plot persegi dipilih karena umum digunakan untuk analisis vegetasi hutan di Indonesia dan memudahkan penentuan vegetasi yang ingin dianalisis (Manudri *et al.*, 2011). Penempatan plot dilakukan dengan metode *purposive sampling* yang didasarkan pada tempat tersedianya tumbuhan pada lahan tambang.

Penelitian dilakukan dalam 3 tahap: 1) pengambilan data tanah dan tumbuhan di lapangan; 2) Pengujian dan analisis kadar nikel (Ni) menggunakan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) flame; 3) Mengkaji potensi *phytomining* berdasarkan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) dan bioakumulasi nikel (Ni) pada tumbuhan. Alat yang digunakan untuk mengambil sampel adalah plastik sampel, kertas label, spidol, dan sekop. Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sampel utuh tumbuhan yang didapatkan dari lapangan, sedangkan sampel tanah diambil pada kedalaman 0 – 20 cm tepat pada lapisan tumbuhnya akar.

Analisis nikel pada sampel dilakukan dengan metode *Atomic Absorption Spectroscopy* (AAS) Flame. AAS merupakan instrumen dalam kimia analisis yang menggunakan prinsip energi yang diserap atom (Sugito & Dewi Marliyana, 2021). Alat yang digunakan untuk uji AAS Flame adalah oven, timbangan analitik, *chopper*, botol kaca vial ukuran 20 ml, dan alat uji AAS Shimadzu AA 7000. Sebelum analisis sampel, dilakukan kalibrasi alat menggunakan larutan standar Ni dengan konsentrasi 1, 3, 5, 7, 10, 15, dan 20 ppm untuk membentuk kurva kalibrasi seperti pada **Gambar 1**. Hasil kurva kalibrasi menunjukkan persamaan $Abs = 0,015206Conc - 0,00032034$ dengan nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,9991. Setiap pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pengulangan menggunakan AAS Shimadzu AA-7000. Adapun limit deteksi Ni pada metode AAS dalam penelitian ini adalah $<0,1$ mg/L. Langkah pengujian adalah sebagai berikut: 1) Mengeringkan sampel dengan oven hingga kering sempurna; 2) menghaluskan sampel dengan menggunakan *chopper*; 3) menghitung berat kering sampel tumbuhan dengan timbangan analitik; 4) mengambil 5 gram sampel untuk destruksi basah menggunakan 20 mL larutan HNO_3 pekat (65%); 5) mendapatkan sampel berbentuk cair sebanyak 20 mL; 6) memasukkan sampel kedalam botol kaca vial; 6) melakukan uji AAS flame menggunakan Shimadzu AA 7000 dengan panjang gelombang 232 nm.



Gambar 1. Kurva Kalibrasi Nikel (Ni)



Gambar 2. Uji AAS Flame



Gambar 3. Sampel Cair setelah Proses Destruksi Basah

Parameter yang diambil untuk analisis vegetasi pada tumbuhan herba adalah kerapatan absolut, kerapatan relatif, frekuensi absolut, frekuensi relatif, perhitungan Indeks Nilai Penting (INP), dan Indeks Keanekaragaman (H'). Rumus yang digunakan dalam analisis vegetasi adalah sebagai berikut:

a. Kerapatan Absolut (K_a)

$$K_a = \frac{\text{Jumlah Suatu Spesies}}{\text{Luas Petak Contoh}}$$

b. Kerapatan Relatif (K_r)

$$K_r = \frac{\text{Kerapatan Mutlak Suatu Spesies}}{\text{Jumlah Kerapatan Seluruh Spesies}}$$

c. Frekuensi Absolut (F_a)

$$F_a = \frac{\text{Jumlah Petak Contoh Spesies yang Ditemukan}}{\text{Jumlah Total Petak Contoh yang Disampel}}$$

d. Frekuensi Relatif (F_r)

$$F_r = \frac{\text{Frekuensi Absolut Spesies}}{\text{Jumlah Frekuensi Seluruh Spesies}} \times 100\%$$

e. Indeks Nilai Penting (INP)

$$\text{INP} = \text{Kerapatan Relatif (\%)} + \text{Frekuensi Relatif (\%)}$$

f. Indeks Keanekaragaman (H')

$$H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

dimana

$$p_i = \frac{n_i}{N}$$

Keterangan :

H' = Indeks diversitas ShannonWiener

S = Jumlah spesies

n_i = Jumlah individu dalam satu spesies

\ln = Logaritma natural

N = Jumlah total individu spesies yang ditemukan

Besarnya nilai H' menentukan tinggi rendahnya keanekaragaman jenis di suatu kawasan, dimana definisi besaran nilai keanekaragaman jenis menurut Shannon Wiener ialah:

$H' > 3$ = Keanekaragaman jenis tinggi,

$1 \leq H' \leq 3$ = Keanekaragaman jenis sedang

$H' < 1$ = Keanekaragaman jenis rendah

Analisis untuk mengetahui potensi *phytomining* dapat diketahui berdasarkan nilai *Bioconcentration Factor* (BCF). Nilai BCF menunjukkan kapasitas tanaman dalam mengumpulkan logam dari tanah atau lingkungan di sekitarnya ke dalam jaringan tanamannya. BCF didefinisikan sebagai rasio perbandingan antara konsentrasi logam berat yang terdapat pada akar tanaman dengan total konsentrasi logam berat yang ada pada tanah atau sedimen (Kurniawan *et al.*, 2022). Analisis dilakukan secara deskriptif dengan membandingkan kadar nikel pada tanah dan tumbuhan serta menghitung nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) untuk mengetahui kemampuan akumulasi nikel pada masing-masing spesies tumbuhan. Rumus *Bioconcentration Factor* (BCF) dapat dilihat dibawah ini:

$$\text{BCF} = \frac{\text{Konsentrasi nikel pada tumbuhan (mg/kg)}}{\text{Konsentrasi nikel pada tanah (mg/kg)}}$$

Keterangan:

- Nilai BCF 1 sampai dengan 10 mengindikasikan tanaman *high accumulator* (hiperakumulator)

- Nilai BCF 0,1 hingga 1 merupakan tanaman *medium accumulator* (sedang)

- Nilai BCF 0,01 hingga 0,1 menunjukkan tanaman *low accumulator* (rendah)

- Nilai BCF <0,01 merupakan tanaman *non accumulator* (bukan akumulator)

Potensi *phytomining* dan aplikasinya pada daerah penelitian dapat diketahui berdasarkan nilai bioakumulasi tumbuhan. Perhitungan bioakumulasi dilakukan untuk menentukan jumlah konsentrasi logam yang dapat diserap oleh tumbuhan. Bioakumulasi dapat dihitung dengan melakukan perkalian antara kadar logam dan berat kering tumbuhan, seperti yang tercantum pada persamaan dibawah:

$$\text{Serapan logam} = \text{Kadar logam dalam tumbuhan} \times \text{berat kering tumbuhan}$$

Berat kering yang dihasilkan oleh tumbuhan merupakan salah satu pertimbangan dalam penentuan spesies yang akan digunakan dalam aplikasi *phytomining*. Semakin tinggi berat kering yang dihasilkan oleh suatu tumbuhan maka semakin besar pula bioakumulasi logam berat oleh tumbuhan tersebut. Spesies tumbuhan yang dipilih harus memiliki toleransi tinggi terhadap efek toksik yang ditimbulkan oleh logam berat dan memiliki tingkat akumulasi yang tinggi. Selain itu, tumbuhan juga harus memiliki pertumbuhan yang cepat, menghasilkan biomassa melimpah, serta sistem perakaran yang luas (Kovačević *et al.*, 2025).

Potensi *phytomining* nikel per hektar dapat diestimasi melalui perhitungan yang melibatkan hasil perkalian antara nilai bioakumulasi tumbuhan dan berat kering tumbuhan pada luasan tertentu. Untuk memperoleh nilai berat kering tersebut, jumlah individu tumbuhan yang terdapat dalam area kajian harus dihitung terlebih dahulu. Rumus perhitungan dapat dilihat di bawah ini:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah Tumbuhan} &= \frac{\text{Luas Lahan (m}^2\text{)}}{\text{Jarak Tanam (m)} \times \text{Jarak tanam (m)}} \\ \text{Berat Kering (Kg/ha)} &= \frac{\text{Berat Kering Tumbuhan (Kg)} \times \text{Jumlah Tumbuhan}}{\text{Luas Lahan (m}^2\text{)}} \\ \text{Potensi } \textit{phytomining} \text{ (mg/ha)} &= \frac{\text{Estimasi Berat Kering (Kg/ha)} \times \text{Kadar Ni pada Tumbuhan (mg/Kg)}}{\text{Luas Lahan (m}^2\text{)}} \end{aligned}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Sifat Kimia dan Fisik Tanah

Tanah merupakan faktor utama yang berpengaruh pada hadirnya nikel pada tumbuhan. Nikel utamanya ada karena proses geologi yang membentuk logam berat melalui proses pelapukan dalam waktu yang lama. Faktor yang berpengaruh pada mobilisasi logam berat pada tanah adalah pH, Kapasitas Tukar Kation (KTK), tekstur tanah, kandungan bahan organik, dan sifat tanah lainnya (Gupta *et al.*, 2019). Selain itu, Perpindahan logam berat dari tanah ke tumbuhan juga dipengaruhi oleh faktor lain seperti bentuk

kimiaawi dan kondisi redoks logam berat, kandungan oksida besi dan mangan serta kondisi iklim. Secara umum, semakin tinggi *bioavailability* logam berat maka semakin besar pula resiko migrasi logam berat tersebut (Tong *et al.*, 2022)

Karakteristik tanah dalam penelitian ini meliputi sifat kimia tanah seperti pH, Kapasitas Tukar Kation (KTK), dan kadar Ni dalam tanah, serta sifat fisik berupa tekstur tanah. Sampel tanah yang diuji ada sebanyak 6 sampel, meliputi 3 sampel tanah didapatkan dari area pit dan 3 sampel lainnya dari area *stockpile* dan area sedimen pond. Hasil uji karakteristik tanah dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **2**.

Hasil analisis laboratorium menunjukkan pH tanah di lokasi penelitian berada pada kisaran 7,02 – 7,25 yang tergolong dalam kategori netral berdasarkan kategori kesuburan tanah. Lokasi dengan pH paling tinggi berada di area *stockpile* dan pH yang paling rendah berada di area pit. Secara umum, pH tanah yang diuji memiliki nilai dengan rentang yang sempit atau nilainya tidak berbeda jauh.

Kapasitas Tukar Kation (KTK) pada masing-masing lokasi bervariasi yaitu berkisar antara 13,26 cmol/Kg – 40,37 cmol/Kg. Nilai KTK tertinggi ditemukan pada sampel dari area pit yaitu sebesar 40,37 cmol/Kg dan termasuk dalam kriteria sangat tinggi. Nilai KTK berhubungan dengan keberadaan bahan organik, dimana bahan organik terbesar ditemukan pada area *stockpile* sebesar 4,53%. Selain itu, KTK juga dipengaruhi oleh kadar karbon yang berada pada tanah. Berdasarkan hasil pengujian diketahui bahwa pit memiliki kadar C yang paling tinggi yaitu sebesar 2,19%. Menurut kriteria kesuburan tanah yang dikeluarkan oleh Pusat Penelitian Tanah pada tahun 1995, tanah pada daerah penelitian termasuk dalam tanah dengan kesuburan rendah hingga sangat tinggi jika dinilai dari KTK tanah.

Tabel 1. Hasil Uji pH, C Organik, dan KTK Tanah

No	Lokasi	pH	Kriteria Kesuburan Tanah*	C Organik (%)		KTK (c mol/kg)	Kriteria Kesuburan Tanah*
				Kadar C	Kadar BO		
1	1	7,02	Netral	1,38	2,38	40,37	Sangat Tinggi
2	2	7,17	Netral	2,19	3,78	22,26	Sedang
3	4	7,19	Netral	1,93	3,33	13,29	Rendah
4	8	7,25	Netral	0,45	0,77	30,78	Tinggi
5	10	7,13	Netral	2,63	4,53	28,82	Tinggi
6	12	7,12	Netral	1,94	3,34	13,63	Rendah

*Pusat Penelitian Tanah, 1995

Keterangan: = Nilai Tertinggi

Tabel 2. Hasil Uji Kadar Ni dan Tekstur

No	Lokasi	Ni (ppm)	Tekstur (%)			Nama Tekstur**
			Pasir	Debu	Lempung	
1	1	73,5334	39,43	28,63	31,94	Lempung Berliat
2	2	67,3186	39,1	30,22	30,69	Lempung Berliat
3	4	58,7297	33,25	38,71	28,04	Lempung Berliat
4	8	75,0986	65,4	4,15	30,45	Lempung Liat Berpasir
5	10	63,8988	36,13	50,53	13,33	Lempung Berdebu
6	12	66,3913	35,88	33,69	30,43	Lempung Berliat

*U.S. Department of Agriculture

Keterangan: = Nilai Tertinggi

Tabel 3. Persebaran Tumbuhan Herba (Survey Lapangan, 2024)

No	Nama Spesies	Jumlah Individu Tumbuhan Herba di Lokasi											Σ Jumlah individu	
		Area Pit				Area stockpile dan Sedimen Pond								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1	<i>Imperata cylindrica (L.) Beauv.</i>	50	42	-	21	-	19	0	-	-	-	-	-	132
2	<i>Cyanthilium cinereum</i>	5	-	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	8
3	<i>Themeda gigantea</i>	5	2	3	16	18	23	-	-	-	32	29	14	142
4	<i>Cyperus roduntus L.</i>	-	-	9	7	-	-	47	22	-	-	13	-	98
5	<i>Cyperus compactus</i>	-	-	-	-	-	-	-	3	34	-	-	-	37
6	<i>Fimbristilis dichotoma</i>	-	-	-	-	-	-	-	10	-	-	9	-	19
7	<i>Pityrogramma calomelanos (L.) Link</i>	-	-	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	5
8	<i>Mimosa pudica L.</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	6	7	-	1	14
9	<i>Paspalum conjugatum</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3

Hasil pengujian pada 6 titik mengindikasikan bahwa kadar nikel berkisar antara 58,7297 ppm – 75,0986 ppm. Kadar nikel tertinggi terletak pada area *stockpile*, sedangkan yang paling rendah berada di area pit. Kadar nikel pada tanah yang berada di daerah penelitian tidak jauh berbeda antar lokasi pengamatan karena pengambilan sampel dilakukan pada pit yang sudah tidak dilakukan penambangan dan bukan merupakan lapisan ore.

Tekstur tanah dianalisis melalui tiga komponen yaitu pasir, debu, dan lempung sehingga didapatkan nama tekstur berdasarkan segitiga tekstur yang dikeluarkan oleh *United States of Department of Agriculture*. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa tekstur tanah pada daerah penelitian adalah lempung berliat, lempung liat berpasir, dan lempung berdebu. Tekstur pasir paling tinggi ditemukan pada area *stockpile* yaitu sebesar 65,4%, diikuti dengan lempung yang berjumlah 30,45%, dan sisanya merupakan debu sebesar 4,15%. Adapun area *stockpile* memiliki jumlah debu paling tinggi yaitu sebesar 50,53%, serta fraksi pasir sebesar 36,13% dan lempung sebesar 13,33%. Fraksi lempung tertinggi ditemukan pada area pit yaitu sebesar 31,94%, dilengkapi dengan fraksi pasir sebesar 39,43% dan fraksi debu sebesar 28,63%. Secara umum, tekstur tanah pada daerah penelitian memiliki persentase yang tidak jauh berbeda antar fraksinya kecuali pada *stockpile* yang didominasi oleh fraksi pasir dan debu.

3.2. Tumbuhan Herba pada Daerah Penelitian

Pengamatan untuk mengetahui jenis tumbuhan herba pada daerah penelitian dilakukan pada 2 area yaitu area pit serta area *stockpile* dan sedimen *pond*. Sebanyak 6 plot pengamatan dibuat di area pit dan 6 lainnya berada di area *stockpile* dan sedimen *pond*. Hasil pengamatan disajikan pada **Tabel 3**. Tumbuhan Herba yang Ditemukan. Hasil menunjukkan bahwa pada area pit ditemukan 4 spesies tumbuhan herba sedangkan pada area *stockpile* dan sedimen *pond* ditemukan 7 spesies tumbuhan herba. Secara keseluruhan didapatkan bahwa pada daerah penelitian terdapat 9 spesies tumbuhan herba yaitu *Imperata cylindrica (L.) Beauv.*, *Cyanthilium cinereum*, *Themeda gigantea*, dan *Cyperus roduntus L.* Sedangkan pada area *stockpile* dan sedimen *Pond* ditemukan 7 spesies yaitu *Themeda gigantea*, *Cyperus roduntus L.*, *Cyperus compactus*, *Fimbristilis dichotoma*,

Pityrogramma calomelanos (L.) Link, *Mimosa pudica L.*, dan *Paspalum conjugatum*. Berdasarkan data tersebut dilakukan analisis vegetasi sehingga hasilnya disajikan pada **Tabel 4**.

Analisis vegetasi menunjukkan bahwa *Themeda gigantea* memiliki nilai frekuensi yang paling besar diantara spesies lainnya. Frekuensi dihitung berdasarkan perbandingan antara jumlah plot ditemukannya vegetasi dengan jumlah plot total di stasiun pengamatan. Spesies *Themeda gigantea* dapat ditemukan pada 9 plot pengamatan sehingga memiliki nilai frekuensi 0,75 dan frekuensi relatif yaitu 31,03%. Spesies yang memiliki nilai frekuensi terbesar kedua adalah *Cyperus roduntus L.* dengan nilai frekuensi sebesar 0,42 dan nilai frekuensi relatif sebesar 17,24%. *Cyperus roduntus L.* ditemukan pada 5 plot pengamatan di daerah penelitian. Sementara *Pityrogramma calomelanos (L.) Link* dan *Paspalum conjugatum* memiliki nilai frekuensi terendah yang sama yaitu sebesar 0,08 dengan frekuensi relatif sebesar 3,45%. Spesies tersebut hanya ditemukan pada satu plot dari seluruh plot pengamatan

Spesies *Themeda gigantea* menunjukkan parameter kerapatan yang paling tinggi dibandingkan spesies lainnya. Kerapatan suatu spesies ditentukan berdasarkan jumlah individu tumbuhan yang ditemukan dalam area plot penelitian, dimana semakin tinggi jumlah individu yang tercatat, maka nilai kerapatan akan semakin meningkat. Untuk spesies *Themeda gigantea*, tercatat nilai kerapatan mencapai 11,83 dengan persentase kerapatan relatif sebesar 31%. Posisi kedua ditempati oleh *Imperata cylindrica (L.) Beauv.* dengan nilai kerapatan yang hampir serupa, yaitu 11. Sementara itu, *Paspalum conjugatum* menempati posisi terendah dalam hal kerapatan dengan nilai hanya 0,25.

Indeks Nilai Penting (INP) merupakan parameter yang menggambarkan seberapa besar kontribusi suatu jenis tumbuhan dalam ekosistem komunitas tertentu. Hasil analisis di daerah penelitian menunjukkan bahwa *Themeda gigantea* mendominasi dengan INP mencapai 62,04%, disusul oleh *Imperata cylindrica (L.) Beauv.* yang memperoleh nilai 42,61%. Tingginya nilai INP kedua spesies ini mengindikasikan peran krusial mereka dalam struktur vegetasi di area tersebut. INP berfungsi sebagai indikator sebaran spesies di wilayah observasi karena merupakan gabungan dari parameter frekuensi dan kerapatan. Spesies yang memiliki INP tinggi umumnya

menunjukkan pola distribusi yang luas di seluruh plot penelitian serta populasi individu yang melimpah. Sementara itu, hasil evaluasi Indeks Keanekaragaman (H') menunjukkan nilai 0,80 untuk area penelitian ini, yang mengklasifikasikan tingkat keanekaragaman sebagai rendah berdasarkan kriteria $H' < 1$.

Keanekaragaman yang tinggi pada suatu daerah menunjukkan bahwa terdapat berbagai macam spesies tumbuhan pada daerah tersebut. Keanekaragaman tumbuhan dalam hal *phytomining* penting untuk diketahui karena peluang untuk mendapatkan tumbuhan dengan kemampuan hiperakumulasi nikel akan menjadi lebih tinggi pada daerah yang memiliki keanekaragaman tinggi. Selain itu, tumbuhan yang ditemukan merupakan tumbuhan yang telah terbukti dapat bertahan pada kondisi lingkungan pada daerah penelitian.

Beberapa spesies tumbuhan hiperakumulator nikel telah ditemukan pada penelitian terdahulu. Kikis *et al.*, (2024) menyebutkan spesies hiperakumulator diantaranya adalah berasal dari famili Brassicaceae yaitu *Alyssum baldaccii*, *Alyssum bertolonii*, dan *Alyssum murale*; spesies dari famili Asteraceae yaitu *Berkeya coddii*; dan spesies dari famili Poaceae adalah *Miscanthus floridulus*. Sedangkan Kumari *et al.*, (2019) menyebutkan spesies hiperakumulator nikel diantaranya *Sebertia accuminata*, *Thlaspi caerulescens*, *Alyssum markgraftii*, *Leptoplax emarginata*, dan *Bornmuellera tymphaea*. Spesies tumbuhan yang disebutkan diatas tidak ditemukan di daerah penelitian.

Berdasarkan data persebaran tumbuhan, dilakukan pengujian kadar nikel pada tanah di 6 lokasi pengamatan yaitu pada Lokasi 1,2,3,7,8, dan 9. Kadar nikel pada tanah dan tumbuhan diuji pada 6 titik kemudian nilai tersebut diolah untuk mengetahui kemampuan akumulasi logam nikel pada tumbuhan dan disajikan pada **Tabel 5**. Hasil analisis dari 6 lokasi pengambilan sampel menunjukkan kandungan nikel berada dalam rentang 58,7297 ppm hingga 75,0986 ppm. Konsentrasi nikel tertinggi ditemukan di lokasi 18 yang berada di kawasan area *stockpile*, sementara konsentrasi terendah terdeteksi di area pit. Kandungan nikel dalam tanah di lokasi penelitian relatif seragam antar titik pengamatan karena sampel diambil dari pit yang sudah tidak aktif ditambang dan bukan berasal dari lapisan bijih (*ore*).

Merujuk pada Tabel. 5, juga dapat ditemukan bahwa semua spesies mampu mengakumulasi nikel dalam jaringan tumbuhan dengan konsentrasi bervariasi dari 1,5797 ppm sampai 20,8226 ppm. Konsentrasi nikel tertinggi terdeteksi pada *Pityrogramma calomelanos (L.)*, yang juga mencatat nilai BCF tertinggi sebesar 0,28. Meskipun belum memenuhi kriteria sebagai hiperakumulator dan hanya tergolong akumulator sedang, spesies ini mendemonstrasikan kapasitas penyerapan logam yang paling unggul dibandingkan spesies lainnya. Berikutnya adalah *Cyperus roduntus L* dan *Fimbristilis dichotoma* dengan nilai BCF mencapai 0,14. Dari 9

spesies yang diteliti, 6 di antaranya terklasifikasi sebagai akumulator sedang dengan nilai BCF berkisar antara 0,11 hingga 0,28. Sementara itu, tiga spesies lainnya yakni *Cyanthilium cinereum*, *Cyperus compactus*, dan *Paspalum conjugatum* termasuk dalam kategori akumulator nikel rendah dengan nilai BCF berkisar antara 0,02 hingga 0,08. Nilai BCF pada penelitian ini yang seluruhnya masih < 1 menunjukkan bahwa spesies tumbuhan yang ditemukan belum tergolong hiperakumulator nikel. Hasil ini berbeda dengan beberapa penelitian *phytomining* nikel pada tanah ultramafik di berbagai negara yang melaporkan kemampuan akumulasi nikel lebih tinggi, serta nilai BCF > 1 pada tumbuhan hiperakumulator genus *Odontarrhena* yang berpotensi untuk *phytomining* nikel. (Van der Ent *et al.*, 2013; Ghafoori *et al.*, 2023; Risse *et al.*, 2023). Rendahnya nilai BCF diduga dipengaruhi oleh karakteristik tanah dalam penelitian ini yang memiliki kadar nikel rendah sehingga penyerapan nikel oleh tumbuhan belum optimal.

Nikel dianggap sebagai elemen yang mudah bergerak. Kelarutan nikel pada tanah asam meningkat secara signifikan, namun karena mudahnya nikel untuk membentuk kompleks dengan bahan organik dalam bentuk khelat, mobilitas nikel tetap tinggi bahkan pada kondisi netral (Jakubus & Graczyk, 2020). Ketersediaan nikel meningkat pada tanah yang bersifat asam sehingga pH lebih rendah memudahkan transportasi nikel dari tanah ke tanaman. Nikel relatif lebih larut pada tanah dengan pH kurang dari 6,5 (Shahzad *et al.*, 2018) Perbedaan banyaknya partikel liat dan debu dapat memengaruhi *bioavailability* dan serapan Ni oleh tumbuhan. Partikel liat dan debu memiliki luas permukaan dan kapasitas adsorpsi yang lebih besar yang memungkinkan akumulasi Ni dalam jumlah yang lebih tinggi. Namun, lapisan liat seringkali menunjukkan kapasitas pengikatan kation yang tinggi karena permukaannya bermuatan negatif yang berakibat pada berkurangnya *bioavailability* logam berat bagi tumbuhan (Kovačević *et al.*, 2025). Kenaikan suhu tanah dapat meningkatkan ketersediaan logam di dalam tanah karena adanya peningkatan bahan organik tanah yang kemudian terurai lebih cepat. Perbedaan fisiologi, morfologi, dan anatomi masing-masing tanaman seperti sudut kemiringan daun, kerapatan cabang, struktur kanopi tanaman, luas daun, serta ukuran dan kerapatan stomata merupakan beberapa karakter morfologi yang mempengaruhi serapan logam pada daun. Transpirasi juga memainkan peran penting dalam akumulasi logam pada tanaman. Ketika transpirasi tinggi, tumbuhan dapat mengakumulasi logam lebih banyak dan kemampuan pengayaan juga lebih tinggi. Tumbuhan berdaun dapat mengakumulasi logam lebih tinggi karena tingkat translokasi dan transpirasinya yang tinggi. Pemindahan logam dari akar menuju batang, daun, dan buah selama proses transpirasi dan translokasi lebih lama pada tumbuhan dengan daun sedikit sehingga akumulasinya menjadi lebih rendah (Gupta *et al.*, 2019).

Tabel 4. Analisis Vegetasi Tumbuhan Herba

No	Nama Spesies	Fa	Fr (%)	Ka	Kr (%)	INP
1	<i>Imperata cylindrica (L.) Beauv.</i>	0,33	13,79	11,00	28,82	42,61
2	<i>Cyanthilium cinereum</i>	0,17	6,90	0,67	1,75	8,64
3	<i>Themeda gigantea</i>	0,75	31,03	11,83	31,00	62,04
4	<i>Cyperus roduntus L.</i>	0,42	17,24	8,17	21,40	38,64
5	<i>Cyperus compactus</i>	0,17	6,90	3,08	8,08	14,98
6	<i>Fimbristilis dichotoma</i>	0,17	6,90	1,58	4,15	11,05
7	<i>Pityrogramma calomelanos (L.) Link</i>	0,08	3,45	0,42	1,09	4,54
8	<i>Mimosa pudica L</i>	0,25	10,34	1,17	3,06	13,40
9	<i>Paspalum conjugatum</i>	0,08	3,45	0,25	0,66	4,10
	Total (Σ)	2,42	100	38,17	100	200
	Indeks Keanekaragaman (H')					0,8

Tabel 5. Kadar Nikel dan Nilai BCF Tumbuhan (Hasil Analisis, 2025)

No	Nama Spesies	Lokasi	Kadar Ni pada Tanah (ppm)	Kadar Ni pada Tumbuhan (ppm)	BCF	Kemampuan Bioakumulasi Ni
1	<i>Cyanthilium cinereum</i>	1	73,5334	1,5797	0,02	Rendah
2	<i>Imperata cylindrica (L.) Beauv.</i>	2	67,3186	7,709	0,11	Sedang
3	<i>Themeda gigantea</i>	2	67,3186	8,1562	0,12	Sedang
4	<i>Cyperus roduntus L.</i>	3	58,7297	8,485	0,14	Sedang
5	<i>Cyperus compactus</i>	8	75,0986	2,1847	0,03	Rendah
6	<i>Fimbristilis dichotoma</i>	8	75,0986	10,5435	0,14	Sedang
7	<i>Pityrogramma calomelanos (L.) Link</i>	8	75,0986	20,8226	0,28	Sedang
8	<i>Mimosa pudica L</i>	10	63,8988	8,4653	0,13	Sedang
9	<i>Paspalum conjugatum</i>	12	66,3913	4,9798	0,08	Rendah

Keterangan: = Nilai tertinggi

Tabel 6. Nilai Bioakumulasi Tumbuhan Herba

No	Nama Spesies	Lokasi	Kadar Ni pada Tumbuhan (ppm)	Berat Kering (Kg)	Bioakumulasi (mg)
1	<i>Cyanthilium cinereum</i>	1	1,5797	2,12 x10 ⁻³	3,35 x10 ⁻³
2	<i>Imperata cylindrica (L.) Beauv.</i>	2	7,709	3,12 x10 ⁻³	2,40 x10 ⁻²
3	<i>Themeda gigantea</i>	2	8,1562	4,47 x10 ⁻³	3,65 x10 ⁻²
4	<i>Cyperus roduntus L.</i>	3	8,485	3,63 x10 ⁻³	3,08 x10 ⁻²
5	<i>Cyperus compactus</i>	8	2,1847	4,27 x10 ⁻³	9,32 x10 ⁻³
6	<i>Fimbristilis dichotoma</i>	8	10,5435	4,16 x10 ⁻³	4,38 x10 ⁻²
7	<i>Pityrogramma calomelanos (L.) Link</i>	8	20,8226	2,24 x10 ⁻³	4,67 x10 ⁻²
8	<i>Mimosa pudica L</i>	10	8,4653	2,42 x10 ⁻³	2,05 x10 ⁻²
9	<i>Paspalum conjugatum</i>	12	4,9798	2,82 x10 ⁻³	1,40 x10 ⁻²

Keterangan: = Nilai tertinggi

Spesies *Pityrogramma calomelanos (L.) Link* memiliki kapasitas akumulasi nikel tertinggi di antara semua spesies yang diteliti pada kondisi tanah yang serupa. Kelebihan ini dikarenakan kemampuannya menghasilkan fitokelatin secara alami. Fitokelatin merupakan senyawa yang terdiri dari beberapa asam amino, termasuk sistein. Sistein berfungsi sebagai pengikat logam berat yang memungkinkan pembentukan senyawa kompleks. Setelah terbentuk, senyawa kompleks ini kemudian ditranslokasikan ke berbagai organ tanaman seperti akar, batang, daun, bunga, dan buah (Triandy *et al.*, 2016).

3.3. Potensi dan Aplikasi *Phytomining* Nikel oleh Tumbuhan Herba

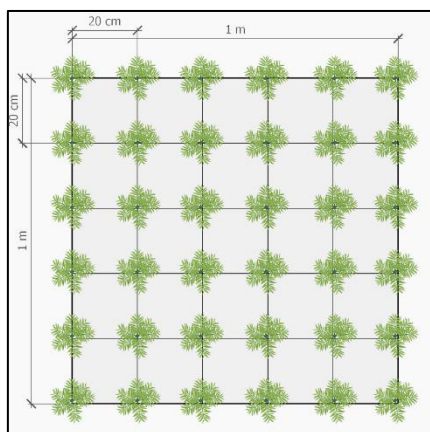
Potensi penerapan *phytomining* dapat dievaluasi dari kapasitas tanaman dalam mengakumulasi logam atau dari nilai BCF yang dimiliki tanaman tersebut. Meskipun seluruh spesies yang dianalisis dalam penelitian ini belum tergolong hiperakumulator karena memiliki nilai BCF <1, beberapa spesies tetap menunjukkan kemampuan penyerapan nikel yang cukup baik sehingga masih berpotensi dimanfaatkan pada skala rehabilitasi atau fitoekstraksi terbatas. Analisis data menunjukkan bahwa tanaman-tanaman yang ditemukan di area penelitian memiliki potensi

dari kategori rendah hingga sedang. Selain nilai *Bioconcentration Factor*, nilai bioakumulasi tumbuhan penting dalam pertimbangan untuk melakukan *phytomining*. Bioakumulasi nikel pada tanaman merupakan hasil perkalian antara konsentrasi nikel dalam jaringan tanaman dengan berat kering tanaman tersebut. Hasil kalkulasi bioakumulasi pada tumbuhan herba dapat dilihat pada **Tabel 6**. Untuk memaksimalkan akumulasi nikel, dibutuhkan tumbuhan dengan kapasitas penyerapan nikel tinggi serta biomassa yang besar. Hasil pengujian mengungkapkan bahwa tumbuhan dengan berat kering tertinggi adalah *Themeda gigantea* sebesar 4,47 x10⁻³ Kg, disusul oleh *Cyperus compactus* dengan berat kering 4,27 x10⁻³ Kg dan *Fimbristilis dichotoma* dengan berat kering 4,16 x10⁻³ Kg. Sementara itu, tumbuhan dengan bioakumulasi nikel tertinggi adalah *Pityrogramma calomelanos (L.) Link* yang mencapai 4,67 x10⁻² mg. Meskipun memiliki berat kering lebih rendah, spesies ini menunjukkan efisiensi penyerapan yang lebih tinggi dibandingkan spesies lainnya, sehingga mencatatkan nilai bioakumulasi tertinggi. Berikutnya adalah *Fimbristilis dichotoma* dengan akumulasi nikel 4,38 x10⁻² mg dan *Themeda gigantea* dengan bioakumulasi nikel 3,65 x10⁻² mg.

Tabel 7. Potensi *Phytomining* dalam Hektar

No	Spesies	Berat Kering Tumbuhan (Kg)	Estimasi Berat Kering (Kg/ha)	Kadar Ni pada Tumbuhan (ppm)	Potensi <i>Phytomining</i> (g /ha)
1	<i>Pityrogramma calomelanos</i> (L.) Link.	2,24 x 10 ⁻³	560	20,8226	11,66
2	<i>Fimbristilis dichotoma</i>	4,16 x 10 ⁻³	1.040	10,5435	10,97
3	<i>Themeda gigantia</i>	4,47 x 10 ⁻³	1.118	8,1562	9,11

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link, *Fimbristilis dichotoma*, dan *Themeda gigantia* merupakan tiga spesies dengan kemampuan bioakumulasi paling tinggi yang berpotensi digunakan untuk aplikasi *phytomining* di lokasi penelitian. Tanaman-tanaman tersebut akan dibiarkan berkembang sampai menunjukkan gejala keracunan atau kondisi hampir mati, kemudian dipanen untuk diolah guna mengekstraksi bio-ore, dan setelah proses *phytomining* berakhir, area bekas tambang dapat direhabilitasi menggunakan tanaman reklamasi seperti trembesi (*Samanea saman*) dan sengon (*Albizia chinensis*) yang telah dikembangkan perusahaan di nursery. Implementasi *phytomining* dimulai dengan mengestimasi area lahan yang akan diaplikasikan, dalam hal ini seluas 1 hektar, dengan menanam ketiga jenis tumbuhan bioakumulator tertinggi menggunakan jarak tanam 20 cm berdasarkan penelitian Win dkk., (2020) yang menunjukkan bahwa jarak tanam 20 cm pada *Pityrogramma calomelanos* mampu mereduksi logam As dan Cu sebesar 90,22% hingga 91,37%, sehingga dalam satu hektar dapat ditanam sebanyak 250.000 tumbuhan dengan ilustrasi penanaman seperti yang terlihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4. Ilustrasi Penanaman Tumbuhan

Seleksi jenis tanaman merupakan faktor kunci yang menentukan keberhasilan proses *phytomining*. Merujuk pada analisis pada **Tabel 5**, terungkap bahwa spesies *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link menunjukkan kapasitas bioakumulasi tertinggi, akan tetapi menghasilkan bobot kering yang relatif rendah dibandingkan spesies lain. Di sisi lain, spesies *Fimbristilis dichotoma* dan *Themeda gigantia* meskipun memiliki daya akumulasi yang lebih rendah, namun mampu memproduksi biomassa

dalam jumlah yang lebih besar sehingga total bioakumulasi yang dihasilkan dapat menyamai *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link. Kondisi ini perlu dijadikan bahan pertimbangan strategis dalam implementasi *phytomining*.

Penelitian ini termasuk kedalam tahap pra-penambangan dimana identifikasi tumbuhan lokal adaptif dilakukan. Beberapa tumbuhan yang memiliki potensi rendah hingga sedang telah berhasil diidentifikasi. Namun perlu optimalisasi supaya penyerapan nikel dapat dilakukan dengan semaksimal mungkin yaitu dengan penambahan zat pengkhelat dan penggunaan mikoriza dalam proses *phytorhizoremediation*. Khelat merupakan senyawa dengan berat molekul tinggi, seperti asam amino polikarboksilat, yang mampu mengekstrak berbagai jenis logam, termasuk nikel (Ni). Beberapa khelat yang dapat digunakan untuk logam nikel adalah *Ethylene Diamine Tetra Acetic* (EDTA), *Ethylene Diamine Disuccinic Acid* (EDDS), dan *Nitrolenetri Acetic Acid* (NTA) yang terbukti dapat meningkatkan serapan Ni sebesar 2,5 hingga 2,8 kali lipat (Handayanto, 2017). *Phytorhizoremediation* merupakan jenis remediasi yang melibatkan tanaman dan mikoriza rhizosfer sehingga terjadi simbiosis yang menguntungkan, dalam hal ini yaitu peningkatan penyerapan logam. Akib (2019) telah melakukan penelitian mengenai *phytorhizoremediation* pada lahan pascatambang nikel di Sorowako, Kec. Nuha, Kab. Luwu Timur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Acaulospora denticulata* yang bersifat *indigenous* dapat menginfeksi akar tanaman *C. ensiformis* dan berperan dalam meningkatkan akumulasi logam berat, khususnya nikel.

Pengelolaan tanah dengan menggunakan zat pengkhelat dan mikoriza dapat dilakukan dengan mengaplikasikannya pada tanah di zona perakaran. Aplikasi penanaman dapat dilakukan secara bertahap dengan menggunakan skema blok maupun rotasi tanam. Hal ini dapat memudahkan pada saat pemantauan dan pemanenan, selain itu tumbuhan juga dapat diperbanyak di lapangan secara bertahap. Adapun luasan area pit pada lokasi penelitian adalah sebesar 11,09 hektar. Sehingga didapatkan bahwa total potensi *phytomining* untuk spesies *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link. adalah 129,32 gram; total potensi *phytomining* *Fimbristilis dichotoma* adalah 121,60 gram; dan total potensi *phytomining* *Themeda gigantia* adalah 101,08 gram.

Meskipun potensi *phytomining* yang diperoleh pada penelitian ini relatif kecil, metode *phytomining* tetap memiliki peluang untuk diterapkan pada lahan marginal atau lahan bekas tambang berkadar nikel

rendah yang umumnya tidak memiliki nilai ekonomi. Dibandingkan pertambangan konvensional, *phytomining* lebih ramah lingkungan, membutuhkan energi lebih rendah, serta dapat mendukung rehabilitasi lahan pascatambang melalui pemanfaatan biomassa tumbuhan akumulator.

Keberhasilan dan kelayakan ekonomi *phytomining* dipengaruhi oleh kandungan logam dalam tanah dan tanaman, produksi biomassa, serta harga logam di pasar global. Oleh karena itu, meskipun hasil akumulasi nikel pada penelitian ini masih terbatas, pengembangan lebih lanjut melalui optimasi biomassa dan teknik budidaya tetap berpotensi meningkatkan efektivitas penerapan *phytomining* di masa mendatang (Ali *et al.*, 2017; Sinha *et al.*, 2021).

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat 9 tumbuhan herba yang ditemukan pada daerah penelitian sehingga keanekaragaman tumbuhan tergolong dalam kategori rendah. Nilai *Bioconcentration Factor* (BCF) tumbuhan berkisar pada 0,02 hingga 0,28. Berdasarkan nilai BCF tumbuhan memiliki potensi *phytomining* rendah – sedang. Nilai BCF yang masih <1 menunjukkan bahwa spesies yang ditemukan belum tergolong hiperakumulator, sehingga diperlukan optimasi seperti penambahan zat pengkhelat dan penggunaan mikoriza untuk meningkatkan kemampuan akumulasi nikel. Pemilihan spesies dalam aplikasi *phytomining* penting untuk dilakukan. Tumbuhan yang digunakan harus memiliki kemampuan ekstraksi nikel yang tinggi serta dapat menghasilkan biomassa yang tinggi sehingga bioakumulasi pada tumbuhan maksimal. Tumbuhan yang memiliki potensi paling besar untuk digunakan dalam aplikasi *phytomining* pada daerah penelitian adalah *Pityrogramma calomelanos* (L.) Link dengan potensi sebesar 11,66 g/ha. Spesies tumbuhan lainnya yaitu *Fimbristilis dichotoma* dengan potensi sebesar 10,97 g/ha, dan *Themeda gigantea* dengan potensi sebesar 9,11 g/ha. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa tumbuhan herba lokal memiliki potensi untuk mendukung penerapan *phytomining* yang ramah lingkungan serta dapat berkontribusi dalam strategi rehabilitasi lahan pascatambang nikel secara berkelanjutan.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan, antara lain jumlah sampel tumbuhan yang relatif terbatas sehingga peluang menemukan spesies hiperakumulator belum optimal. Selain itu, pengujian nikel belum dilakukan secara terpisah antara akar dan tajuk tumbuhan sehingga faktor translokasi belum dapat diketahui, serta kajian aspek ekonomi *phytomining* seperti biaya operasional, nilai logam yang dihasilkan, dan potensi penerapannya masih belum dianalisis secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan jumlah sampel yang lebih banyak, pengujian faktor translokasi, serta pengembangan kajian teknis dan ekonomi untuk meningkatkan efektivitas penerapan *phytomining* pada lahan bekas tambang.

DAFTAR PUSTAKA

- Akib, M. A. (2019). *Phitorhizoremediasi untuk Lahan Pascatambang Nikel* (Suherman, Ed.). UMPAR Press.
- Ali, A., Guo, D., Mahar, A., Ping, W., Wahid, F., Shen, F., Li, R., & Zhang, Z. (2017). Phytoextraction and the economic perspective of *phytomining* of heavy metals. *Solid Earth Discussion*, 1–40. <https://doi.org/10.5194/se-2017-75>
- Ghafoori, M., Ghaderian, S. M., Krämer, U., & Baker, A. J. M. (2023). Nickel hyperaccumulation, elemental profiles and agromining potential of three species of *Odontarrhena* from the ultramafics of Western Iran. *International Journal of Phytoremediation*, 25(10), 1037–1048.
- Gupta, N., Yadav, K. K., Kumar, V., Kumar, S., Chadd, R. P., & Kumar, A. (2019). Trace elements in soil-vegetables interface: Translocation, bioaccumulation, toxicity and amelioration - A review. *Science of the Total Environment*, 651, 2927–2942. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.047>
- Handayanto, E., Prasetya, B., Krisnayani, B. D., & Muddarisna, N. (2014). *Phytomining Logam Emas dari Tailing Tambang Emas Rakyat Menggunakan Tumbuhan Lokal*.
- Hayyat, M. S., Adnan, M., Khan, M. A. B., Abd-Ur-Rahman, H., Ahmed, R., Fazal-ur-Rehman, Toor, M. D., & Bilal, H. M. (2020). Effect of heavy metal (Ni) on plants and soil: A review. *International Journal of Applied Research*, 6(7), 313–318. www.allresearchjournal.com
- Jakubus, M., & Graczyk, M. (2020). Availability of nickel in soil evaluated by various chemical extractants and plant accumulation. *Agronomy*, 10(1085), 1–16. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111805>
- Kikis, C., Thalassinou, G., & Antoniadis, V. (2024). Soil *Phytomining*: Recent Developments—A Review. Dalam *Soil Systems* (Vol. 8, Nomor 1). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI).
- Kovačević, B., Milović, M., Kesić, L., Pajnik, L. P., Pekeč, S., Stanković, D., & Orlović, S. (2025). Interclonal Variation in Heavy Metal Accumulation Among Poplar and Willow Clones: Implications for Phytoremediation of Contaminated Landfill Soils. *Plants*, 14(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/plants14040567>
- Kumari, P., Kumar, P., & Kumar, T. (2019). An Overview of *Phytomining*: A Metal Extraction Process From Plant Species. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(1), 1367–1376. www.jetir.org
- Kurniawan, R., Hamim, Henny, C., & Satya, A. (2022). Identification of Potential Phytoaccumulator Plants from Tailings Area as a Gold *Phytomining* Agent. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 169–181.
- Kusuma, D. A. A., & Haeruddin. (2022). Tinjauan Terhadap Perencanaan *Phytomining* sebagai Alternatif Tambang Emas Ramah Lingkungan. *Jurnal Teknologi Sumberdaya Mineral*, 3(2), 2022.
- Liu, C., Lin, H., Dong, Y., Li, B., & Liu, Y. (2018). Investigation on microbial community in remediation of lead-contaminated soil by *Trifolium repens* L. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 165, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.08.054>
- Miteva, I., Petrov, P., & Stefanova, V. (2022). Potential of *phytomining* in Bulgaria. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1264(1), 012005.
- Risse, M., Echevarria, G., Erskine, P. D., & van der Ent, A. (2023). Rhizosphere processes by the nickel hyperaccumulator *Odontarrhena chalcidica* suggest

- Az-Zahra, D. A., Muryani, E., Irawan, A. B., dan Prasetya, J. D. (2026). Potensi *Phytomining* Nikel oleh Tumbuhan Herba pada Lahan Bekas Penambangan di Kabupaten Konawe. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(1), 158-167, doi:10.14710/jil.24.1.158-167
- Ni mobilization. *Plant and Soil*, 492, 421-436. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06161-w>
- Saim, A. K., Ntiri-Bekoh, R., Orleans-Boham, H., & Amankwah, R. K. (2020). *Gold Phytoextraction by Alocasia macrorrhizos: Implications in Phytomining*.
- Shahzad, B., Tanveer, M., Rehman, A., Cheema, S. A., Fahad, S., Rehman, S., & Sharma, A. (2018). Nickel; whether toxic or essential for plants and environment - A review. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 1-38. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.10.014>
- Sinha, R., Singh, A. K., bauddh, K., Sharma, T. R., & Sharma, pallavi. (2021). *Phytomining: a sustainable approach for recovery and extraction of valuable metals*. Dalam *Phytorestoration of Abandoned Mining and Oil Drilling Sites* (hlm. 487-501). *Elsevier*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821200-4.10000-7>
- Sugito, & Dewi Marliyana, S. (2021). Uji Performa Spektrofotometer Serapan Atom Thermo Ice 3000 Terhadap Logam Pb Menggunakan CRM 500 dan CRM 697 di UPT Laboratorium Terpadu UNS. *Indonesian Journal Of Laboratory*, 4(2), 67-71.
- Suwardi, & Randrikasari, O. (2023). Teknologi Reklamasi Lahan Bekas Tambang Nikel untuk Mempercepat Keberhasilan Reklamasi. *Risalah Kebijakan Pertanian Dan Lingkungan*, 10(3), 145-164.
- Tong, S., Yang, L., Gong, H., Wang, L., Li, H., Yu, J., Li, Y., Deji, Y., Nima, C., Zhao, S., Gesang, Z., Kong, C., Wang, X., & Men, Z. (2022). Bioaccumulation Characteristics, Transfer Model of Heavy Metals in Soil-crop System and Health Assessment in Plateau Region, China. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113733>
- Triandy, H., Liong, S., & Hala, Y. (2016). *Fitoakumulasi Fe dan Cu dalam Tumbuhan Bakau Rhizophora mucronata di Sungai Tallo Makassar*.
- Van der Ent, A., Baker, A. J. M., van Balgooy, M. M. J., & Tjoa, A. (2013). Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): Mining, nickel hyperaccumulators and opportunities for *phytomining*. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 1-36. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.009>
- Win, Z. C., Diaz, L. J. L., Perez, T. R., & Nakasaki, K. (2020). Phytoremediation of Heavy metal Contaminated Wastes from Small-scale Gold Mining Using *Pityrogramma calomelanos*. *E3S Web Conference*, 148, 1-10. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20>