

**MODEL KEBERLANJUTAN LAHAN PASCA TAMBANG  
NIKEL LATERIT BERDASARKAN KONSEP  
GEOKIMIA LINGKUNGAN**

*POST LATERITE NICKEL MINING LANDSCAPE  
SUSTAINABILITY MODEL BASED ON ENVIRONMENTAL  
GEOCHEMICAL CONCEPTS*

**MUHARDI MUSTAFA**

**D033201003**



**PROGRAM STUDI DOKTOR  
TEKNOLOGI KEBUMIHAN DAN LINGKUNGAN  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN  
GOWA  
2023**

**PENGAJUAN DESERTASI**

**MODEL KEBERLANJUTAN LAHAN PASCA TAMBANG  
NIKEL LATERIT BERDASARKAN KONSEP  
GEOKIMIA LINGKUNGAN**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar Doktor  
Program Studi Teknologi Kebumihan dan Lingkungan

Program Studi Doktor  
Teknologi Kebumihan Dan Lingkungan

Disusun dan Diajukan oleh :

**MUHARDI MUSTAFA**

**D033201003**

**Kepada**

**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**GOWA**

**2023**

**DISERTASI**

**MODEL KEBERLANJUTAN LAHAN PASCA TAMBANG NIKEL  
LATERIT BERDASARKAN KONSEP GEOKIMIA LINGKUNGAN**

Disusun dan diajukan oleh:

**MUHARDI MUSTAFA  
D03320 1003**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Disertasi  
pada tanggal 15 Agustus 2023  
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,  
Komisi Penasehat



**Prof. Dr. Eng. Adi Maulana, S.T., M.Phil**  
Promotor




**Dr. Ulva Ria Irfan, S.T., M.T**  
Co-Promotor




**Prof. Dr. Adi Tonggiroh, S.T., M.T**  
Co-Promotor

Ketua Program Studi  
Teknologi Kebumihan dan Lingkungan



**Dr. Ulva Ria Irfan, S.T., M.T**

Dekan Fakultas Teknik  
Universitas Hasanuddin,



**Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad  
Isran Ramli, S.T., M.T., IPM.,  
ASEAN.Eng**

## PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhardi Mustafa  
Nim : D033201003  
Program Studi : Teknologi Kebumian Dan Lingkungan  
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

**Model Keberlanjutan Lahan Pasca Tambang Nikel Lateri  
Berdasarkan Konsep Geokimia Lingkungan**

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambil alihan tulisan orang lain bahwa Disertasi yang saya tulis ini benar benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila Dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Disertasi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 15 Agustus 2023.

Yang Menyatakan



Muhardi Mustafa

## **PRAKATA**

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga dapat menyelesaikan penyusunan disertasi yang berjudul : “MODEL KEBERLANJUTAN LAHAN PASCA TAMBANG NIKEL LATERIT BERDASARKAN KONSEP GEOKIMIA LINGKUNGAN”

Gagasan pokok penelitian ini timbul dari hasil pengamatan langsung penulis terhadap masalah lahan pasca tambang nikel laterit di Kabupaten Konawe Utara. Adapun tujuan penyusunan disertasi ini adalah sebagai syarat untuk memperoleh gelar Pasca Sarjana Doktoral pada Program Studi Teknologi Ilmu Kebumihan dan Lingkungan Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Dengan segala kerendahan hati, perkenankan saya mengucapkan rasa terima kasih yang sedalam-dalamnya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menempuh studi di Departemen Teknik Geologi Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, maupun saat menyusun disertasi ini, khususnya kepada :

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., sebagai Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Dr. Ir. Ulva Ria Irfan, MT., sebagai Ketua Program Studi S3 Teknologi Kebumihan dan Lingkungan Universitas Hasanuddin.
4. Bapak Dr. Ir. H. Ruksamin, ST., M.Si., IPU., ASEAN Eng., Sebagai Bupati Konawe Utara, Bapak H. Abuhaera, SOS., M.Si., Sebagai Wakil Bupati dan Bapak Drs. H. Kasim Pagala, M.Si., Sebagai Sekretaris Daerah- Yang telah memberikan izin seluas-luasnya untuk mengikuti Pendidikan Program Pasca sarjana di Universitas Hasanuddin.
5. Prof. Dr. Eng. Adi Maulana. ST., M.Phil sebagai promotor, Dr. Ir. Ulva Ria Irfan, MT., sebagai Co-Promotor, dan Prof. Dr. Adi Tonggiroh, ST., MT, sebagai Co- Promotor, yang dengan penuh perhatian kesabaran dan keikhlasan memberi arahan selama dalam proses pembimbingan hingga terselesainya disertasi ini. Semoga semua ini menjadi berkah dan bernilai ibadah di sisi-Nya.
6. Prof. Dr. Ir. Hazairin Zubair, MS., Dr. Ir. Irzal Nur, MT., Dr. phil. Sri Widodo, ST., MT., Dr. Eng. Hendra Pachri, ST., M. Eng., sebagai anggota/ penilai yang telah memberi saran dan koreksi dalam penyusunan disertasi ini.

7. Prof. Dr. Ir. Vijaya Isnaniawardhani, MT., sebagai anggota penilai eksternal yang telah memberikan saran dan koreksi dalam penyusunan disertasi ini.
8. Staf dan karyawan bagian akademik, perpustakaan dan laboratorium Fakultas Teknik dan Departemen Teknik Geologi yang telah banyak membantu penulis selama mengikuti perkuliahan.
9. Rekan-rekan seangkatan yang telah banyak membantu selama perkuliahan. pada khususnya, dan segenap pembaca pada umumnya.
10. Orang tua, Ayah (Alm.) dan Ibu (Almh.), istri dan anak di rumah, dan seluruh keluarga besar yang telah memberikan semangat dan doa dalam mengikuti perkuSemoga Allah melimpahkan rahmat-Nya serta membalas budi baik semua pihak yang telah membantu penyusunan disertasi ini. Akhirnya saya berharap agar disertasi ini dapat bermanfaat bagi pemerintah, pelaku industri pertambangan dan masyarakat Makassar, Juli 2023

Penulis,

**Muhardi Mustafa**

## ABSTRAK

MUHARDI MUSTAFA. **Model Keberlanjutan Lahan Pasca Tambang Nikel Laterit berdasarkan Konsep Geokimia Lingkungan** (dibimbing oleh Adi Maulana, Ulva Ria Irvan, Adi Tonggiroh)

Sasaran penelitian ini adalah diharapkan menjadi arahan para perencana pengambil kebijakan dalam perencanaan reklamasi secara terpadu, untuk lahan pasca tambang nikel laterit menjadi produktif di Kabupaten Konawe Utara Propinsi Sulawesi Tenggara maupun di wilayah yang terdapat penambangan nikel laterit. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis kualitas dan kesuburan tanah, menganalisis tingkat kontaminasi, konsentrasi dan mobilitas logam berat, dan pemodelan geokimia lingkungan untuk asesmen logam berat sebagai dasar rekomendasi untuk perencanaan reklamasi secara kimia dan fisik. Tahapan dan metode yang digunakan adalah penelitian lapangan, penelitian laboratorium dan analisis data berbasis perangkat statistik SPSS, MS-Excell dan perangkat GIS. Sampel diperoleh dengan menggunakan metode sederhana acak sampling dan *judgmental sampling*. Analisis laboratorium kimia basah untuk mengetahui kualitas dan kesuburan tanah yang diperoleh dari tekstur, pH, C-Organik, N-Total, Fospor, K, KTK, dan tingkat kejenuhan basa. Analisis mineralogi tanah menggunakan XRD (X-Ray Diffraction) dan analisis unsur menggunakan XRF, ICP-OES dan ICP-MS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kesuburan tanah dipengaruhi oleh tingginya sifat masam tanah, rendahnya kandungan c-organik tingginya persentase testur liat, KTK (Kapasitas Tukar Ion) dan logam berat. kategori kontaminasi logam berat Mn adalah moderately to heavily contaminated; Cr = heavily contaminated; Co = moderately contaminated; Ni = moderately to heavily contaminated; Pb = uncontaminated to moderately contaminated; Zn = moderately contaminated; Cd = practically uncontaminated dan Fe = uncontaminated to moderately contaminated. Berdasarkan model kontaminasi logam berat dan model migrasi logam berat dan Peta Sebaran Logam Berat menghasilkan Model Geokimia lingkungan Berkelanjutan yang menjelaskan bahwa logam berat telah terdispersi akibat mekanisme kesetimbangan geokimia.

Kata Kunci: Logam berat, Pasca Tambang, Nikel Laterit, Geokimia Lingkungan, Motui

## **ABSTRACT**

**MUHARDI MUSTAFA. *Post Laterite Nickel Mining Landscape Sustainability Model based on Environmental Geochemical Concepts*** (supervised by Adi Maulana, Ulva Ria Irvan, Adi Tonggiroh)

*The objectives of this research are expected to be the direction of planners and policymakers in integrated reclamation planning, for post-mining nickel laterite land use to become productive in North Konawe Regency, Southeast Sulawesi Province as well as in areas where laterite nickel mining is located. This study aims to analyze soil quality and fertility, analyze the level of contamination, concentration, and mobility of heavy metals, and environmental geochemical modeling for heavy metal assessment as a basis for recommendations for chemical and physical reclamation planning. The stages and methods used are field research, laboratory research, and data analysis based on statistical tools SPSS, MS-Excel, and GIS tools. Samples were obtained using simple random sampling and judgmental sampling methods. Wet chemistry laboratory analysis to determine soil quality and fertility obtained from texture, pH, C-Organic, N-Total, Phosphorus, K, CEC, and base saturation level. Soil mineralogical analysis used the XRD (X-Ray Diffraction) method and elemental analysis using the XRF, ICP-OES, and ICP-MS methods. The results showed that soil fertility was affected by the high acidity of the soil, low c-organic content, a high percentage of clay texture, CEC (Ion Exchange Capacity), and heavy metals. the category of Mn heavy metal contamination is moderate to heavily contaminated; Cr = heavily contaminated; Co = moderately contaminated; Ni = moderately to heavily contaminated; Pb = uncontaminated to moderately contaminated; Zn = moderately contaminated; Cd = practically uncontaminated and Fe = uncontaminated to moderately contaminated. Based on the heavy metal contamination model and the heavy metal migration model and the Heavy Metal Distribution Map, a Sustainable Environmental Geochemical Model has been produced which explains that heavy metals have been dispersed due to a geochemical equilibrium mechanism.*

*Keywords: Heavy metals, Post Mining, Nickel Laterite, Environmental Geochemistry, Motui*



## DAFTAR ISI

PENGAJUAN DESERTASI .....	i
DISERTASI .....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN .....	iii
PRAKATA .....	iv
DAFTAR ISI .....	viii
DAFTAR TABEL .....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xi
DAFTAR LAMPIRAN .....	xii
BAB I PENDAHULUAN .....	1
10.1 Latar Belakang .....	1
10.2 .....	Rumu
san Masalah .....	6
10.3 .....	Tujua
n Penelitian .....	6
10.4 .....	Manf
aat Penelitian .....	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....	8
2.1 Batuan Ultramafik Sulawesi .....	8
2.2 Geokimia Batuan Ultramafik .....	9
2.3 Geokimia Tanah Laterit .....	10
2.4 Mobilitas Unsur .....	11
2.5 Logam Berat pada Tanah Laterit .....	14
2.6 Kesuburan Tanah ( <i>Fertility</i> ) .....	20
2.7 Remediasi .....	20
2.8 Pemodelan Geokimia Lingkungan .....	21
BAB III METODE PENELITIAN .....	25
3.1 Lokasi dan Waktu Penelitian .....	25
3.2 Fasilitas Laboratorium .....	26
3.3. Bahan dan Peralatan .....	26
3.4 Kegiatan Pengumpulan Data .....	27
3.4.1 Penelitian Lapangan .....	27
3.4.2 Penelitian Laboratorium .....	29
3.4.3 Pengolahan Data .....	41

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....	43
4.1 Analisis Sifat Fisik dan Kimia Tanah.....	43
4.2 Analisis Kesuburan Tanah .....	46
4.3 Geokimia dan Mineralogi Tanah Laterit.....	47
4.4 Geokimia Batuan Ultramafik.....	51
4.5 Geokimia Logam Berat dan Nilai Acuan .....	52
4.6 Analisis Indeks Geoakumulasi (Igeo).....	61
4.7 Model Geokimia Migrasi Logam Berat.....	74
4.8 Model Geokimia Lingkungan dan Berkelanjutan .....	79
BAB V PENUTUP .....	84
5.1 Kesimpulan.....	84
5.2 Rekomendasi.....	84
DAFTAR PUSTAKA.....	86
DAFTAR PUSTAKA WEB .....	99

## DAFTAR TABEL

Tabel 1 Klasifikasi Goldschmidt (White, 2011).....	14
Tabel 2 Hasil analisis sifat fisik tanah.....	44
Tabel 3 Data geokimia Ni, Fe pada batuan ultramafik.....	52
Tabel 4 Nilai indeks geoakumulasi (Igeo) daerah penelitian .....	63
Tabel 5 Nilai iterasi MDS blok A .....	75
Tabel 6 Nilai iterasi MDS blok B.....	77

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kondisi lahan pasca tambang nikel laterit daerah penelitian .....	4
Gambar 2 Lahan pasca tambang nikel laterit blok A .....	5
Gambar 3 Lahan pasca tambang nikel laterit blok B .....	6
Gambar 4 Peta geologi daerah penelitian (Simanjuntak dkk, 1993).....	8
Gambar 5 Diagram Eh-pH kromium (Brookins, 1998) .....	17
Gambar 6 Bagan alir kerangka penelitian .....	24
Gambar 7 Lokasi penelitian dan klasifikasi data (blok A dan blok B) .....	26
Gambar 8 Pemetaan dan arah pengambilan sampel.....	27
Gambar 9 Pengambilan sampel tanah menggunakan bor tangan ( <i>hand auger</i> )....	28
Gambar 10 Sistematika alur penelitian .....	42
Gambar 11 Grafik XRD sampel MMC-03.....	48
Gambar 12 Grafik XRD sampel MMC-05.....	48
Gambar 13 Grafik XRD sampel MMC-08.....	49
Gambar 14 Grafik XRD sampel MMC-09.....	50
Gambar 15 Grafik XRD sampel MMC-11.....	50
Gambar 16 Grafik XRD sampel MMC-12.....	51
Gambar 17 Grafik whisker pada Fe (%). Pb,Cd (ppm).....	53
Gambar 18 Grafik Whisker Mn, Cr, Co, Ni, Zn (dalam ppm).....	53
Gambar 19 Distribusi Pb (< 4 ppm; 7 ppm; 12 ppm) .....	54
Gambar 20 Distribusi Zn (220 ppm – 350 ppm).....	55
Gambar 21 Distribusi Cd (< 0,35 ppm) .....	56
Gambar 22 Distribusi Cr (5310 ppm – 11.242,73 ppm) .....	57
Gambar 23 Distribusi Ni (6290 ppm – 11.900 ppm) .....	58
Gambar 24 Distribusi Mn (2730 ppm – 8130 ppm).....	59
Gambar 25 Distribusi Co (395 ppm – 944 ppm) .....	60
Gambar 26 Distribusi Fe (21,3 – 39,1 ppm) .....	61
Gambar 27 Nilai Igeo vs Mn (simbol O = 0-20 cm; = 20-40 cm) .....	67
Gambar 28 Nilai Igeo vs Cr (simbol O= 0-20 cm; ▲=20-40 cm).....	68
Gambar 29 Nilai Igeo vs Co (simbol O = 0-20 cm; ▲= 20-40 cm) .....	69
Gambar 30 Nilai Igeo vs Ni (simbol O=0-20cm; ▲=20-40 cm).....	70
Gambar 31 Nilai Igeo vs Pb (simbol O=0-20cm; ▲=20-40 cm) .....	71
Gambar 32 Nilai Igeo vs Zn (simbol O= 0-20cm; ▲ = 20-40 cm) .....	72
Gambar 33 Nilai Igeo vs Cd (simbol O= 0-20cm; ▲ = 20-40 cm).....	73
Gambar 34 Nilai Igeo vs Fe (simbol O= 0-20 cm; ▲ = 20-40 cm).....	74
Gambar 35 DMS dua dimensi logam berat.....	76
Gambar 36 DMS tiga dimensi logam berat blok A.....	77
Gambar 37 DMS dua dimensi logam berat blok B .....	78
Gambar 38 DMS tiga dimensi logam berat blok B .....	79
Gambar 39 Model geokimia lingkungan dan berkelanjutan daerah penelitian .....	82
Gambar 40 Model geokimia lingkungan dan berkelanjutan daerah penelitian .....	83

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran</b>	<b>Halaman</b>
1. Hasil Analisis Contoh Tanah	135
2. Hasil Analisis XRD	136
3. Hasil Analisis XRF;ICP-OES;ICP-MS	154
4. Hasil Deskripsi Statistik	155
5. Peta Konsentrasi Logam Berat	156
• Konsentrasi Logam Berat Cd (0- 20)cm dan (20- 40)cm	156
• Konsentrasi Logam Berat Co (0- 20)cm dan (20- 40)cm	157
• Konsentrasi Logam Berat Cr (0- 20)cm dan (20- 40)cm	158
• Konsentrasi Logam Berat Fe (0- 20)cm dan (20- 40)cm	159
• Konsentrasi Logam Berat Mn (0- 20)cm dan (20- 40)cm	160
• Konsentrasi Logam Berat Ni (0- 20)cm dan (20- 40)cm	161
• Konsentrasi Logam Berat Pb (0- 20)cm dan (20- 40)cm	162
• Konsentrasi Logam Berat Zn (0- 20)cm dan (20- 40)cm	163

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Provinsi Sulawesi Tenggara adalah bagian dari lengan timur mandala geologi Pulau Sulawesi (Sukanto,1982),dimana tersingkap batuan ultramafik sebagai batuan himpunan ofiolit (Kadarusman,2004). Batuan ultramafik terdiri dari dunit, peridotit, lertzolit dan serpentinit, mengandung mineral berkomposisi basa lebih dari 45% seperti olivin, magnesium, silikat, besi. Dalam skala waktu geologi, proses perubahan yang terjadi pada ultramafik berada dalam kondisi termal dan kelembaban dan petrografi bahan induk (Gerasimov,2014), fase tekanan, iklim, air tanah,struktur geologi (Golightly,1981). Kemudian terlapukkan dan mengalami pengayaan (*supergene enrichment*) unsur Ni, Fe, Mg, Si yang selanjutnya membentuk tanah laterit mengandung nikel.

Tanah laterit adalah tanah residu didominasi oleh lempung kaolinit,tidak mengembang dan memiliki nilai konduktifitas hidrolis rendah (Maigien,1966). Tanah laterit merupakan jenis tanah pada iklim tropis dan sub tropis (Gerasimov,2014),pH tinggi oleh kandungan  $Ca^{2+}$  dan  $Mg^{2+}$  (Hsing Ko T,2014). Tanah laterit pada pelapukan tropis batuan ultramafik oleh karena rasio Al/Fe tinggi menunjukkan pengayaan besi,dimana variasi kimia Al dihilangkan sebagai substitusi Si dalam larutan ketika terbentuk lapisan saprolit (Schellmann,1994). Ciri utama tanah laterit nikel umumnya berwarna merah, merah kecoklatan,kuning kecoklatan yang menunjukkan pengendapan beberapa unsur laterit seperti : nikel, silikat, aluminium, magnesium dan unsur lainnya. Endapan nikel laterit berkembang secara in situ diatas ultramafik yang secara vertical pelapukannya membentuk profil allochthonous (Eliopoulos,2012). Profil lengkapnya terdiri dari 1) Batuan peridotit yang disaprolitisasi dengan atau tanpa sebagian ultramafik yang lapuk; 2) Lapisan transisi yang mungkin didominasi dengan lempung kuarsa atau smektit; 3) Lapisan saprolitik ferruginous; 4) lapisan limonit yang agak direkristalisasi dan diangkut secara lokal; dan 5) duricrust goethite-hematite (Eliopoulos,2012).

Kandungan endapan nikel laterit di Sulawesi Tenggara berpotensi ditambang dikarenakan penyebarannya sangat luas yaitu 480.032.12 Ha, dan

sumberdayanya sebesar 97,401,593,025.72 Ton (ESDM,2015). Tersebar di Kabupaten Kolaka, Kolaka Utara, Konawe Utara, Konawe Selatan, Bombana, Konawe, Buton dan Kota BauBau. Terdapat 222 perusahaan tambang nikel laterit di Provinsi Sulawesi Tenggara (BPS,2019) yang menghasilkan dua jenis produksi (BPS Sultra,2018) yaitu bijih nikel dan ferro nikel. Sejak Tahun 2002 sampai 2016, produksi total bijih nikel mencapai 49.878.617 ton dan ferro nikel sebesar 18.675.570 ton.

Sumberdaya nikel yang cukup besar dan industri tambang nikel menjadi unggulan ekonomi merupakan alasan utama Pemerintah Daerah Kabupaten Konawe Utara mencanangkan Program Pembangunan Kawasan Industri pertambangan di Sulawesi Tenggara (KESDM,2015), dimana Daerah Motui dijadikan sebagai kawasan percontohan.

Sejak Tahun 2010 dimulai pengelolaan tambang nikel di Daerah Motui dengan metode tambang terbuka. Namun sempat terhenti tahun 2014 karena kebijakan larangan ekspor. Kegiatan produksi secara besar besaran di Konawe Utara dimulai sejak pabrik pengolahan Nikel di Indonesia sudah beroperasi. Dalam beberapa tahun terakhir ini ini, sebagian perusahaan tambang sudah berhenti karena cadangan nikel laterit sudah habis yang menyisakan perubahan topografi dan kimia lapisan tanah. Pasca penambangan nikel meninggalkan lahan kosong atau lahan pasca tambang (*post mining*), terdapat gangguan lainnya (Walker& Willing, 1999) pada lahan dan tanah (Cooke & Johnson, 2002).

Pihak perusahaan perusahaan tambang sudah berusaha melakukan upaya kegiatan reklamasi sebagaimana yang diwajibkan dalam UU No. 32 Tahun 2009 tentang Perlindungan Dan Pengelolaan Lingkungan Hidup, UU No. 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral Dan Batubara. Kegiatan pengelolaan lahan pasca tambang yang telah dilaksanakan oleh perusahaan perusahaan tambang tidak berhasil, dimana kegiatan revegetasi melalui penanaman pohon tidak tumbuh.

Kondisi lahan pasca tambang sangat tergantung pada jenis bahan tambang yang berhubungan pula dengan cara penambangan, yaitu metode tambang terbuka dan metode tambang bawah tanah. Penerapan kedua metode penambangan berdasarkan target komoditas, tipe endapan geologi, geometri endapan dan lokasi tambang dimana berdasarkan komoditas yang ditargetkan akan menghasilkan variasi perubahan topografi dan tanah. Faktor ini mengakibatkan fitur permukaan

tanah menjadi *waste* karena akses mendapatkan bijih (Seal,2015). Perbedaan tersebut membawa konsekuensi kepada berbagai permasalahan yang dihadapi dalam melakukan keberlanjutan fungsi lahan. Konsep keberlanjutan tambang secara umum mengamanatkan untuk mendapatkan kembali tata guna lahan yang dapat difungsikan (Bowman & Baker,1998; Cao, 2007; Maczkowiack, *et al*, 2012; Ross & Simcock, 1997). Tanah adalah salah satu sumber daya alam terpenting, yang menentukan pembangunan berkelanjutan. Kesuburan tanah harus menjadi perhatian utama dan prioritas pembangunan ekonomi. Dalam beberapa dekade terakhir, karakteristik geokimia tanah telah mengalami perubahan signifikan di bawah pengaruh aktivitas antropogenik di seluruh dunia (Alekseenko *et al*,2017).

Berdasarkan pengamatan lapangan daerah penelitian (Gambar 1.1), diketahui ada permasalahan, yaitu tanah menjadi tidak produktif atau sulit ditumbuhi oleh vegetasi. Dan salah satu indikasi kuat bahwa ada pengaruh logam berat pada kesuburan tanah. Karena setelah perusahaan tambang berhenti berproduksi karena tidak adanya lagi unsur (Ni) yang bernilai ekonomis, menyisakan hamparan lahan pasca tambang. Maka terjadi perubahan susunan tanah laterit yang awalnya terdiri dari lapisan tanah limonit (bagian atas), lapisan tanah saprolit (bagian tengah),lapisan transisi, menjadi tidak beraturan akibat pengambilan bijih nikel yang terdapat pada lapisan tersebut. Dengan kata lain, pertambangan adalah aktivitas penggunaan lahan sementara. Artinya, deposit mineral terbatas dan akhirnya didapat habis (Cooke & Johnson, 2002). Umumnya lahan bekas tambang merupakan areal yang memiliki lansekap tidak beraturan, seperti terbentuknya lubang bekas tambang (*void*) dan bukit yang terpotong. Dengan berubahnya topografi, fisiografi dan morfologi lahan menyebabkan tanah tidak berstruktur dan tidak berprofil (Erfandi,2017).



Pada lahan pasca tambang nikel laterit terdapat material *waste overburden* yang tersusun oleh lapisan tanah laterit tak beraturan dan singkapan ultramafik hasil pengupasan penambangan. Lapisan tanah waste mengalami perubahan fitur kualitas geokimia tanah, reaksi kimia menentukan mobilisasi dan redistribusi unsur dalam profil tanah (Roca *et al*, 2008). Nilai pH 8-9 pada tanah bersifat basa bila mengalami penurunan pH menunjukkan kejenuhan substrat tanah yang disebabkan ketahanan tanah terhadap beban proton dan sensitivitas tinggi terhadap interaksi dengan logam (Sarapulova,2018). Konsentrasi logam dalam tanah yang berhubungan dengan vegetasi dipengaruhi oleh jenis dan sifat mineralogi batuan induk serta proses dimana tanah terbentuk dalam fase padat (Fadigas *et al*,2010). Fe dan Mn oksida, oksihidroksida dan hidroksida memainkan peran penting dalam mengontrol mobilitas unsur lainnya pada lahan pasca tambang (Gasparatos ,2013). Perubahan kimia logam pada tanah meliputi afinitas logam,komponen tanah dan matriks tanah (Narwal *et al*,1999).



Gambar 1 Kondisi lahan pasca tambang nikel laterit daerah penelitian

Kondisi lahan pasca tambang yang terhampar luas dan belum jelas aspek pemanfaatannya dimasa yang akan datang memerlukan penelitian mendalam pada tanah menjadikan lahan produktif dan ekonomis. Masyarakat membutuhkan dampak lingkungan dari penambangan bersifat sementara (Maczkowiack *et al*, 2012). Penelitian pada tanah lahan bekas tambang memerlukan berbagai strategi mengikuti pengambilan sampel profil tanah kedalaman berbeda (Ferguson, 1993; Baize, 1997). Berkaitan dengan distribusi logam tidak teratur dengan kedalaman berbeda, semua lapisan permukaan hemioroganik dan bawah permukaan anorganik horizon dari tanah diambil sampelnya (ISO,2002).

Seiring dengan Program Kawasan Industri Pertambangan oleh Pemerintah Provinsi Sulawesi Tenggara pada penambangan berkelanjutan, maka memerlukan penelitian aspek geokimia lingkungan sebagai aspek alternatif merediasi tanah yang berkesinambungan dan kesejahteraan seluruh masyarakat yang ada di lingkungan penambangan nikel laterit. Hasil penelitian pada geokimia lingkungan kolam pengendapan tambang nikel laterit Daerah Motui menunjukkan akumulasi unsur Fe dan Cr yang membentuk *ferrochrome* (Muhardi, 2012). Unsur jejak memiliki struktur atom yang sangat berbeda dari sumber mineralnya pada tanah, misalnya pelapukan mineral chromite ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) mengabsorpsi Fe, Mn, Cr, Co yang juga bersumber dari pyroxene, amphibole, micas (Chesworth, 2008).

Penelitian ini melanjutkan hasil tesis oleh Muhardi (2012) pada topografi bagian timur, kemudian difokuskan pada topografi bagian barat lahan bekas tambang yang terletak di wilayah Administrasi Motui Kabupaten Konawe

(Gambar 3). Lokasi penelitian didetailkan pada dua topografi perbukitan reklamasilahan tambang, yang berdasarkan observasi lapangan diketahui terdapat kesulitan tumbuhnya vegetasi, meskipun telah dilakukan penanganan seperti pemberian pupuk. Selanjutnya penamaan kedua topografi berdasarkan perbedaan yang mencolok yaitu topografi tanpa vegetasi tumbuh disebut Blok A (Gambar 2), dan terdapat vegetasi tumbuhnya, disebut Blok B (Gambar 3).

Aspek kimia penelitian ini menggunakan unsur jejak (*trace elements*) Sebagai indikasi sona perubahan mobilitas logam berat pada tanah. Dengan harapan hasil penelitian merupakan pemuktahiran geokimia lingkungan model berkelanjutan sehingga sangat bermanfaat pada penanganan lahan pasca tambang



di seluruh wilayah pertambangan nikel laterit di Provinsi Sulawesi Tenggara.

Gambar 2 Lahan pasca tambang nikel laterit blok A



Gambar 3 Lahan pasca tambang nikel laterit blok B

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latarbelakang penelitian, dapat dirumuskan permasalahan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana kualitas dan kesuburan tanah pada lahan pasca tambang nikel laterit ?
2. Bagaimana lingkungan geokimia konsentrasi, mobilitas dan kontaminasi logam berat pada lahan pasca tambang nikel laterit ?
3. Bagaimana model geokimia lingkungan yang berkelanjutan pada lahan pasca tambang nikel laterit ?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan penelitian yang akan dicapai adalah:

1. Menganalisis kualitas dan kesuburan tanah laterit pada lahan pasca tambang nikel laterit.
2. Menganalisis lingkungan geokimia konsentrasi, mobilitas dan kontaminasi logam berat pada lahan pasca tambang nikel laterit.
3. Memodelkan geokimia lingkungan yang berkelanjutan untuk asesmen logam berat pada lahan pasca tambang nikel laterit.

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini, sebagai berikut :

- a. Dari segi ilmu pengetahuan, penelitian ini merupakan pengembangan ilmu geokimia lingkungan yang berkorelasi dengan disiplin ilmu lainnya. Sehingga multi disiplin keilmuan bermanfaat untuk mengontrol perubahan kualitas dan kesuburan tanah yang berkaitan dengan kontaminasi logam berat pada lahan pasca tambang nikel laterit.
- b. Penelitian ini dapat merupakan acuan bagi Pemerintah Daerah Provinsi Sulawesi Tenggara guna mewujudkan pengelolaan lahan pasca tambang nikel laterit berkelanjutan agar lebih efektif dan efisien dan produktif.
- c. Disamping itu, penelitian ini dapat diterapkan di daerah lain untuk pengelolaan lahan pasca tambang nikel laterit dengan kondisi geologi sumberdaya mineral yang serupa dengan daerah penelitian.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Batuan Ultramafik Sulawesi

Sukamto (1975) telah membagi Pulau Sulawesi dan pulau-pulau sekitarnya ke dalam tiga mandala geologi berdasarkan asosiasi litologi dan struktur regional. Ketiga mandala tersebut adalah Mandala Geologi Sulawesi Barat, Mandala Geologi Sulawesi Timur, dan Mandala Geologi Banggai Sula. Mandala Geologi Sulawesi Timur sebagian besar terdiri dari batuan beku basa dan ultrabasa dan batuan metamorfisme bersifat sekis (Sukamto, 1975). Menurut Simandjuntak dkk (1993) tersingkapnya batuan ultramafik oleh kegiatan tektonik pada Miosen Tengah yang mengakibatkan tersesarkannya Jalur Ofiolit Sulawesi Timur ke atas Mandala Tukangbesi – Buton (Gambar 2.1).



Gambar 4 Peta geologi daerah penelitian (Simanjuntak dkk, 1993)

Batuan ultramafik tersingkap di Pulau Sulawesi merupakan bagian dari kompleks ofiolit Indonesia. Sebagai bukti beragamnya proses tektonik ekstrim dan interaksi tiga lempeng (Eurasian, Indo-Australian dan Pasifik) yang berumur Mesozoik Akhir dan Tersier Awal. Di bagian timur Indonesia (Sulawesi, Halmahera dan Papua) berumur Miosen sampai Kapur Awal-Kapur Akhir kemungkinannya berasal dari pecahan sirkum Pasifik berumur Panerozoik dalam bentuk sabuk multi ofiolit (Isozaki., *et al*,1990; Ishiwara,1994 dalam Kadarusman.A.,*et al*,2004).

Akibat pergerakan lempeng tersebut, sebaran batuan ofiolit pada bagian sisi timur Pulau Sulawesi sangat luas sehingga para peneliti terdahulu (Monnier., *et al* ,1995; Bergman., *et al* 1996; Parkinson,1998; Kadarusman.A, 2004, 2005) menamakan *East Sulawesi Ophiolit* (ESO).

## 2.2 Geokimia Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik adalah batuan yang mengandung mineral basa atau mineral ferromagnesia lebih besar 45% (Hall A,1989). Mineral ferromagnesia meliputi olivin ( $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$ ), piroksen ( $\text{Ca-Mg-Fe}$  silikat), hornblende ( $(\text{Ca,Na})_{2-3}(\text{Mg,Fe,Al})_5\text{Si}_6(\text{Si,Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ), mika dan biotit  $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{Al,Si}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ . Unsur logam yang bersumber dari batuan ultramafik seperti nikel, kobal, besi, kromium, mangan merupakan komposisi mineral ferromagnesia, hal ini menunjukkan bahwa batuan ultramafik mengandung mineral berat yaitu memiliki *specific gravity* lebih besar 2,9 (Bates dan Jackson, 1980).

Kromium adalah unsur minor yang terdapat pada batuan ultramafik dan mineral mafik dalam bentuk kromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ) kelompok spinel, uvarovite ( $\text{Ca}_3\text{Cr}_2(\text{SiO}_4)_3$ ) kelompok garnet dan crocoite ( $\text{PbCrO}_4$ ). Unsur besi dijumpai melimpah pada kerak bumi dengan nama logam *ferric* (Fe). Sifat geokimia logam besi adalah mudah larut dalam air sebagai reduktan membentuk magnetit, siderit, pirit dan kondisi oksidasi membentuk mineral ferrihydrite, goethite, hematite pirit. pada batuan ultramafik (Bullen,2011).

Keterdapatn logam berat pada sedimen kolam pengendapan dipengaruhi oleh batuan sebagai sumber konsentrasi mineral logam. Konsentrasi unsur kromium pada batuan felsik (granit) memiliki *range* minimal 20 mg/kg dan batuan ultramafik atau batuan termetamorfisme adalah 2000mg/kg (Motzer dan Engineers,2004).

Batuan ultramafik dalam proses pelapukan akan membentuk tanah laterit dan selain mengandung mineral serpentin juga terdapat logam berat (Ni, Cr, Fe, Mn) dan silika. (Oze *et al* ,2004a; Mc Gahan *et al*,2008 dalam Cheng *et al* , 2011). Keterdapatn logam ini dijumpai dalam bentuk yang berbeda, misalnya Cr-spinel, Fe (geotit), Mn (managnesse) dan Ni (oksida hidroksida). Menurut Cheng *et al* , 2011, meningkatnya proses mobilisasi Cr-spinel atau kromium, terjadi pada kondisi substitusi geokimia Fe yang berasosiasi dengan mineral silika. Hal inilah

yang menyebabkan konsentrasi logam Cr meningkat dalam tanah rombakan batuan ultramafik.

Pelepasan Cr dan Ni dalam batuan ultramafik terjadi selama proses pelapukan dipengaruhi oleh bentuk permukaan bumi (Becquer *et al*, 2006; Oze *et al*, 2008 dalam Cheng *et al*, 2011), topografi, biota dan waktu geologi (lee *et al*, 2004; Chardot *et al*, 2007; Hseu *et al*, 2007 dalam Cheng *et al*, 2011). Pada kondisi ini Cr sangat stabil dan resisten terhadap material hasil rombakan batuan ultramafik, namun Ni sangat labil (Cheng *et al*, 2011).

Yalcin (2008), melakukan penelitian tentang hubungan logam berat dan sumber batuan dengan menggunakan analisis statistik dendogram faktor logam, non logam. Analisis ini menggunakan faktor proses alamiah (*natural process factor*) yaitu : (1) SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, Cr, Ni, Cu dan Mo. Logam Cr, Ni, Cu dan Mo disebut *geogenic materials* yang bersumber dari batuan ultramafik.

### **2.3 Geokimia Tanah Laterit**

Proses pelapukan berperan dalam penguraian unsur yang terdapat pada batuan ultramafik kemudian membentuk reaksi kimia tanah laterit. Pelapukan adalah proses perubahan fisik dan kimia pada batuan atau mineral yang berlangsung di atau dekat permukaan bumi. Sedangkan Pearl (1988), menyatakan bahwa ketika batuan tersingkap ke permukaan akibat proses tektonik, batuan secara perlahan - lahan akan pecah (retak). Retakan pada batuan inilah yang merupakan akses yang baik untuk terjadinya proses pelapukan, disebabkan oleh kontak batuan dengan air, udara dan organisme.

Reaksi kimia pada tanah laterit dicirikan pada mineral olivin olivin (Mg,Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> dan mineral serpentin Mg<sub>3</sub>(Si<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)(OH)<sub>4</sub>, magnesium silikat dan besi silikat yang pada umumnya mengandung 0,30% nikel. Batuan ultramafik sangat mudah terpengaruh oleh pelapukan lateritik. Air tanah yang kaya CO<sub>2</sub> berasal dari udara luar dan tumbuhan akan menghancurkan olivin. Penguraian olivin, magnesium, nikel dan silika ke dalam larutan cenderung untuk membentuk suspensi koloid dari partikel-partikel silika yang submikroskopik. Reaksi kimia yang terjadi di pedosfer selama pembentukan tanah menentukan mobilisasi dan redistribusi



unsur dalam profil tanah, dan secara signifikan korelasinya antara total konsentrasi unsur dalam tanah dan bahan induk (Roca et al., 2008).

Dalam proses pelapukan fisika batuan menjadi pecah dan ion-ion yang mempunyai berat jenis besar, termasuk nikel, mengalami pengayaan di tempat. Sementara ion-ion yang mempunyai berat jenis kecil dihanyutkan oleh air, angin atau media lain ke dataran yang lebih rendah. Di dalam larutan, besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida. Akhirnya endapan ini akan menghilangkan air dengan membentuk mineral-mineral seperti karat, yaitu goetit  $\text{FeO(OH)}$ , Hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan kobalt dalam jumlah kecil. Jadi besi oksida akan mengendap dekat dengan permukaan tanah. Sedang magnesium, nikel silika tertinggal di dalam larutan selama air masih asam. Namun timbulnya netralisasi karena adanya reaksi dengan batuan dan tanah, maka zat-zat tersebut akan cenderung mengendap sebagai hydrosilikat. Hal ini terjadi pada nikel yang mempunyai sifat kelarutan rendah dibandingkan magnesium. Perbandingan antara nikel dengan magnesium di dalam tanah laterit lebih besar dari pada kondisi kimia larutan, karena ada sedikit magnesium yang terbawa oleh air tanah.

## **2.4 Mobilitas Unsur**

Mobilitas unsur laterit ditentukan berdasarkan perbedaan suhu, tekanan dan kimiawi maka geokimia unsur di bawah permukaan memiliki klasifikasi luas dalam menjelaskan lingkungan di permukaan. Klasifikasi dasarnya terletak pada sirkulasi air meteorik dari bawah permukaan ke dalam batuan dalam kondisi suhu hangat. Faktor lingkungan geokimia di permukaan meliputi : (1) proses pelapukan, (2) erosi dan sedimentasi pada suhu rendah, (3) tekanan hampir konstan, (4) pergerakan larutan bebas dan oksigen bebas, (5) air dan  $\text{CO}_2$  yang melimpah. Proses geokimia oleh faktor tersebut menyebabkan terjadinya distribusi unsur penyusun batuan dan mineral sebagai respon terhadap berbagai proses geologi. Proses ini disebut mobilitas geokimia (Hawkes dan Webb, 1962). Mobilitas unsur bergantung pula pada afinitas elektron, sifat mekanik fase gerak, viskositas. Dalam kondisi perubahan lingkungan geokimia permukaan terjadi perubahan kestabilan relatif yang menghasikan unsur *mobile* dan unsur *immobile*.

Umumnya unsur nikel dan kobal secara vertikal mengisi rongga batuan terserpentinisasi. Nikel dan kobal dapat memiliki kadar yang sama dalam suatu profil laterit, namun umumnya berbentuk konkresi bercampur mineral lempung atau dalam bentuk mengisi rongga berbentuk radial berasosiasi dengan kristal silika. Sedangkan kobal dijumpai dalam mineral asbolane yang bercampur dengan sedikit mineral mangan. Mineral asbolane, asbolan, asbolite atau wad, berwarna hitam pada rekahan batuan (*fractures*), berbentuk kristal simetri hexagonal, kekerasan 6 dalam skala mohs, hanya dapat dilihat dengan menggunakan handlens, kadang berasosiasi dengan mineral chromit dan goethite atau terjadi sebagai saling tumbuh bersama Fe oksida dan hidroksida. Kobal atau nikel yang mengandung asbolite memiliki formula  $(\text{Co,Ni})_{1-y}\text{MnO}_2)_{2-x}(\text{OH})_{2-2y+2x}\cdot n\text{H}_2\text{O}$ . Proses substitusi akibat penetrasi air tanah menyebabkan efek kimia perubahan komposisi Co, Ni, Mn. Secara stokiometri perbandingan Ni : Co adalah 1 : 1 sampai 1 : 10. Mineral asbolite di Sorowako memiliki komposisi 2,5 % sampai 5,8 % Co atau perbandingan rata-rata pada lapisan limonit Co : Ni = 3,31 : 1. Ini masih rendah bila dibandingkan dengan tambang di Nkamouna (Kongo Selatan, Afrika) yaitu 6,3 sampai 19,5% CoO atau 3,2% sampai 7,2%.

Mineral lempung jenis kaolin sebagai hasil pelapukan akan dijumpai melimpah pada endapan nikel laterit yang rata-rata kadarnya sampai 9 %. Sehingga kehadiran kaolin bukan mencirikan pengayaan kobal. Mineral lempung smektit kaya akan magnesia-alumina namun kuantitasnya kecil. Selain itu juga terdapat mineral gibbsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), yang berasal dari ultramafik (Evans, 1979). Perbandingan Ni : Co = 2 : 3 termasuk kecil disebabkan kehadiran mineral ferralite.

Unsur logam Ni dan Co sebagai penyusun magma basa hadir dalam kristal olivin dan enstatit karena adanya kesamaan jari – jari ion (Ni = 0,78 Å dan Co = 0,82).

Umumnya hidroksidasi dari beberapa unsur kimia dijumpai berasosiasi dengan lingkungan laterit. Ion - ion yang dilepaskan selama proses hidrolisis dari mineral - mineral mafik, ditetapkan sebagai hidroksida. Pada hidrosilikat nikel (mineral garnierit), nikel menggantikan atom Mg dalam mineral serpentin, talk dan klorit. Anggota nikel murni tidak muncul secara alami dan kebanyakan garnierit berisi (Ni, Mg) sebagai pengganti Mg.

Istilah *garnierite* telah digunakan sebagai suatu istilah yang meliputi seluruh bentuk hidrous nikel magnesium silikat. Faust (1966) dalam Waheed (2002), menyatakan bahwa kebanyakan garnierit terkait dengan talk dan serpentin. Kato (1961) dalam Waheed (2002), bahwa garnierit yang ditemukan di New Caledonia, merupakan struktur yang serupa dengan serpentin, talk dan klorit. Sedangkan Springer (1974) dalam Waheed (2002), mengusulkan tentang definisi garnierit sebagai “ nikel magnesium hidrosilikat”, dengan atau tanpa berisi alumina, melalui *X – Ray Diffraction* menunjukkan bentuk khas serpentin, talk, sepiolit, klorit, vermiculit atau campuran/gabungan semuanya.

Menurut Smith (1987), laterit merupakan produk akhir dari pelapukan dan dalam hal ini dibedakan oleh kehadiran dari Fe (besi) pada bagian atas dan lapisan kaya Al (aluminium) dan bersifat keras dan oksidasi terjadi di atas lapisan kaya silika. Air permukaan yang mengandung CO<sub>2</sub> dari atmosfer dan terkayakan kembali oleh material – material organik di permukaan meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindian, dimana fluktuasi air tanah berlangsung . Akibat fluktuasi ini air tanah yang kaya CO<sub>2</sub> akan kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral – mineral yang tidak stabil seperti olivin / serpentin dan piroksen. Mg, Si dan Ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan memberikan mineral – mineral baru pada proses pengendapan kembali. Boldt (1967), menyatakan bahwa proses pelapukan dimulai pada batuan ultrabasa (peridotit, dunit, serpentin), dimana batuan ini banyak mengandung mineral olivin, magnesium silikat dan besi silikat, yang pada umumnya mengandung 0,30 % nikel. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Air tanah yang kaya CO<sub>2</sub> berasal dari udara luar dan tumbuh – tumbuhan, akan menghancurkan olivin.

Selanjutnya terjadi penguraian olivin, magnesium, besi, nikel dan silika ke dalam larutan, cenderung untuk membentuk suspensi koloid dari partikel – partikel silika yang submikroskopis. Di dalam larutan, besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai ferri hidroksida. Akhirnya endapan ini akan menghilangkan air dengan membentuk mineral seperti karat, yaitu hematit dan kobalt dalam jumlah kecil. Jadi, besi oksida mengendap dekat dengan permukaan tanah.

## 2.5 Logam Berat pada Tanah Laterit

Sistem transportasi logam berat dalam geokimia memiliki hubungan dengan kimia unsur jejak (*trace element*). Unsur jejak adalah istilah umum yang diberikan pada unsur konsentrasi rendah pada soil dan batuan, contohnya Cu, Zn, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb sebagai kation dan As, Se, Mo, B sebagai anion. Unsur jejak (*trace elements*) memiliki konsentrasi <0,1% berat, unsur minor (*minor elements*) dengan konsentrasi (0,1-1)% berat dan unsur mayor (*major elements*) (>1% berat) (Roberts, 2004 dalam White,2011).

Tabel 1 menunjukkan logam berat dalam klasifikasi Goldschmidt, dan termasuk dalam unsur jarang (*trace element*) yang dibagi dalam tiga kelompok yaitu : *atmophile* (unsur gas atau cair), *lithophile* (unsur pada fase silika), *siderophile* (unsur logam pada fase cair- padat), *chalcophile* (unsur logam sulfida) (White,2011).

Tabel 1 Klasifikasi Goldschmidt (White, 2011)

Siderophile	Chalcophile	Lithophile	Atmophile
Fe,Co,Ni	(Cu), Ag	Li,Na,K,Rb,Cs	(H),N,(O)
Ru,Rh,PdZn,Cd,Hg	Be, Mg, Ca,Sr,Ba	He,Ne,Ar,Kr,Xe	
Os, Ir, Pt	Ga,In,Tl	B,Al,Sc,Y,REE	
Au, Re, Mo	(Ge),(Sn),Pb	Si,Ti,Zr,Hf,Th	
Ge, Sn, W	(As),Sb,Bi	P,V,Nb,Ta	
C, Cu, Ga	S,Se,Te	O,Cr,U	
Ge,As,Sb	(Fe),(Mo),(Os)	H,F,Cl,Br,I	
	(Ru), (Rh), (Pd)	(Fe),Mn,(Zn),(Ga)	

Logam berat adalah komponen yang terbentuk di alam atau dari kerak bumi dan tidak mengalami degradasi atau hancur. Istilah logam berat didasarkan pada suatu unsur kimia logam yang memiliki relatif densitas tinggi (densitasnya selalu diatas 5 g/mL) dan mengandung racun meskipun konsentrasinya rendah, contohnya arsenik (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), merkuri (Hg), lead (Pb) dan thalium (Tl) (Bertkowitz *et al*, 2008).

Kondisi redoks akan berpengaruh pada stabilitas mineral logam yang terdapat dalam tanah laterit dan mobilitas kation logam. Kondisi tanah akan mereduksi NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, kemudian setelah nitrat hilang, Mn akan direduksi yang kemudian disusul oleh besi. Akibat dari reduksi tersebut, konsentrasi ion Mn<sup>2+</sup> dan Fe<sup>2+</sup> pada awalnya akan meningkat, sebelum kemudian menurun sampai tingkat yang stabil (Van Breemen dan Brinkman (1976) dalam Tan (1992) dalam Notodarmojo (2005). Menurut Jerzy (2010) presipitasi konsentrasi logam Fe dan Mn oksida dan

hidroksida akan berkurang yang dicirikan oleh perubahan warna kemerahan-kekuningan sampai coklat muda.

Krom (Cr) dijumpai di bumi dalam bentuk Cr (III) dimana kationnnya immobile sangat kompleks berasosiasi dengan material organik dan menyerap dalam bentuk oksida, silikat dan pH >4 (Rai dan Zachara, 1998; Rai *et al*, 1989; fendorf, 1995 dalam John dan Oze,2003). Unsur Cr(VI) memiliki mobilitas lebih jauh dibanding Cr(III) dan sangat sulit untuk dirubah dengan air, juga mengandung racun dari unsur Cr yang 10 sampai 100 kali lebih beracun dibanding Cr(III) (Hawley *et al*, 2004).

Martine dan Whitfield (1983) dalam Karbassi *et al* (2005), konsentrasi logam dalam air relatif lambat dan pada sedimen membentuk lapisan. Davis *et al* (1991) dalam Karbassi *et al* (2005), akumulasi logam yang bersumber dari air dan terendapkan dalam sedimen tergantung pada faktor seperti pH, *ionoc strength*, tipe dan konsentrasi ikatan organik dan anorganik (*anthropogenic input*), variasi permukaan sedimen akibat distribusi ukuran butir.

Menurut Mufleh *et al* (2010) unsur cadmium merupakan fraksi perubahan pada geokimia lingkungan dimana dapat pada kondisi non labil terjadi reduksi dan oksidasi. Selanjutnya oleh Dube *et al* (2001) bahwa geokimia lingkungan perubahan kimia fisika merupakan fenomena penyerapan dan migrasi logam berat yang sangat penting pada sistem fisik terestrial (soil →air) dimana sifat pelarut dan proses fraksinasi suspended.

Menurut Dube *et al* (2001), mekanisme transport dari logam berat pada tanah dipengaruhi oleh besarnya lingkungan pengaruh air tanah yang cukup panjang. Umumnya konsentrasi logam berat tergantung pada pengaruh lingkungan geologi dan *anthropogenic* dan kejadian unsur di alam, seperti logam-logam Fe, Cr, Mn, Ni, Zn, Cu, Pb, Cd,Hg. Jadi transportasi logam bukan hanya tergantung pada sifat fisiokimia logam tetapi kebanyakan pada sifat fisik dan kimia yang dipengaruhi oleh soil,contohnya :kandungan organik pada tanah, kandungan fraksi lempung, komposisi mineral, pH dan faktor stabilitas tanah. Fenomena Penyerapan dan migrasi logam berat sangat penting pada sistem fisik terestrial (soil →air) dimana sifat pelarut dan proses fraksinasi suspended.

Beberapa logam berat yang menjadi acuan dalam tanah laterit, seperti : Ni, Fe, Co dan Cr merupakan parameter dalam analisis geokimia lingkungan.

#### **a. Nikel (Ni)**

Nikel memiliki sifat kilap logam berwarna putih-perak, lustrous, keras, *malleable*, *ductile*, logam feromagnetit dan relatif resisten terhadap karat, konduktor panas yang baik, elektrisitas. Logam nikel terdapat dimana mana meskipun dalam kadar kecil, misalnya pada tanah, air, udara, biosfer dan kandungan rata-rata pada kerak bumi sekitar 0,008%. Penelitian yang dilakukan oleh Buerge-Weirich *et al* (2003) dalam (Berkowitz *et al*, 2008), menunjukkan bahwa nikel terserap pada permukaan mineral goetit dan terinfiltrasi akibat airtanah.

Konsentrasi logam nikel di alam, terdiri atas lima sumber, yaitu : (1) unsur nikel dan sifat logamnya (*alloy*), (2) air sebagai pelarut (misalnya terjadi pada nikel klorida, nikel sulfat, nikel nitrat), (3) anorganik-air bukan sebagai pelarut (misalnya terjadi pada nikel karbonat, nikel sulfida, nikel oksida), (4) organik-air bukan sebagai pelarut, (5) nikel karbonil ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ ) (Berkowitz *et al*, 2008).

#### **b. Kobal (Co)**

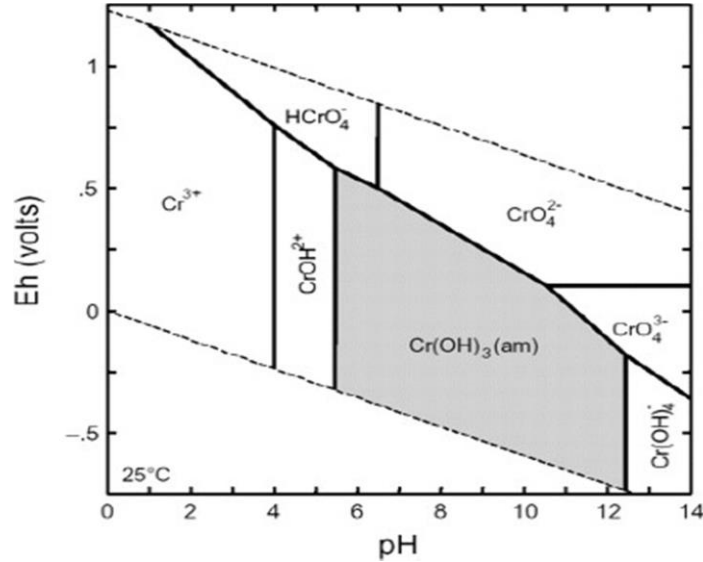
Lapisan kerak bumi, konsentrasi kobal relatif tinggi pada batuan ultrabasa (100 sampai 220 ppm) apabila dibandingkan dengan kobal pada batuan asam (1 sampai 15 ppm) (Zevenhoven dan Kilpinen, 2001). Kobal dijumpai sebagai *chalcophile* dan *siderophile* yang berasosiasi pada fase sulfida dan sulfida arsenik. Kobal sangat *mobile* pada permukaan lingkungan asam dan dalam kondisi reduksi, dimana formasinya membentuk fase ikatan kimia tinggi dengan Fe dan Mn. Sangat mudah terurai oleh presipitasi dan penyerapan oksida dan apabila kondisi netral meningkat menjadi alkali maka kobal akan larut dalam besi dan mangan. Selama proses pelapukan, kobal relatif kuat tertransportasi pada lingkungan oksida asam namun sangat mudah diserap oleh besi dan manganoksida. Kobal akan tereduksi apabila berasosiasi dengan lempung (Mc Kenzie dalam Zevenhoven dan Kilpinen, 2001) dan mengalami hambatan transportasi pada perubahan fase oksidasi reduksi (Zevenhoven dan Kilpinen, 2001).

### c. Krom (Cr)

Kromium dijumpai dalam bentuk racun, khususnya Cr(III) dan Cr(VI), ini disebabkan perbedaan oksidasi yang konsentrasinya tidak menyerupai semua logam (Kimbrough *et al*, 1999 dalam Bertkowitz *et al*, 2008). Kromium (III) terbentuk secara alamiah sebagai nutrisi alam. Kromium (VI) dan kromium (0) umumnya terbentuk akibat proses industri.

Dalam industri pertambangan, kromium dalam bentuk bijih  $\text{FeCr}_2\text{O}_4$  dan selalu berasosiasi dengan batuan ultramafik dan serpentin. Pada industri pertambangan nikel laterit menghasilkan kromium yang dapat dijumpai dalam kolam *tailing* dan bentuk *waste*. Kromium dengan mudah larut pada air dan mobilitasnya cukup cepat dalam air tanah.

Pada gambar 2.2, menunjukkan diagram persamaan pH dan Eh pada kondisi oksidasi kromium. Menurut Brookins (1988), ion kromate ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) adalah stabil pada kondisi lingkungan oksidasi dengan nilai Eh lebih tinggi 0,6V dan pH diatas 6,0. Nilai pH lebih rendah 3,0 Cr (III) mendominasi pH diatas 3,0 dalam kondisi hidrolisis sehingga terbentuk senyawa  $\text{CrOH}^{2+}$ ;  $\text{Cr}(\text{OH})_3$  dan  $\text{Cr}(\text{OH})_4^-$ .



Gambar 5 Diagram Eh-pH kromium (Brookins, 1998)

Cr (III) mudah dijumpai pada air tawar dengan pH netral namun berpotensi mengalami reduksi oksidasi dengan Cr(VI) (Rai *et al*, 1989 dalam Callender, 2001) dan Cr (III) membentuk ikatan Senyawa hidroksida  $\text{CrOH}^{2+}$  pada pH 4-6,  $\text{Cr}(\text{OH})_3$

nilai pH 6-11,5 dan  $\text{Cr(OH)}_4^-$  pada pH diatas 11,5. (Rai *et al*, 1987 dalam Callender,2001)

Ming Zheng *et al* (2008), semua analisis statistik merupakan dasar dalam pengolahan data lingkungan distribusi normal. Olehnya itu digunakan *Principal Component Analysis* dan korelasi parsial pada *software SPSS (Statistical Product and Service Solution)* untuk menginterpretasi hubungan logam berat dengan proses geokimia.

Stewart *et al* (2003), menggunakan multipel teknik regresi dengan *software SigmaStat 2.0* untuk mengetahui nilai regresi penyerapan tanah pada Cr(III) yang diperoleh dari nilai reduksi Cr dan Cr(VI). Diketahui bahwa nilai regresi ( $r^2$ ) adalah 0,674; 0,722; 0,794, ini disebabkan bahwa permukaan lempung cukup luas (80%) untuk menerima  $\text{Cr}^{3+}$  dan  $\text{Cr(OH)}_3$  pada fase presipitasi. Logam berat seperti Ni, Cr, Fe, Mn yang bersumber dari batuan ultrabasa dan tanah laterit, memiliki sifat geokimia yang berbeda (Tume *et al*, 2010).

#### **d. Besi (Fe)**

Besi dijumpai dalam bentuk konsentrasi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  dengan tiga konsentrasi yang berbeda, yaitu : (1) 0,03% sampai 0,16% ;(2) 0,11% dan 1,90% ; (3)0,11 dan 1,90%. Korelasi statistik bernilai positif pada ketiga konsentrasi ini dijumpai dalam bentuk mineral ilmenit dan titania, sedangkan korelasi negatif menunjukkan perbedaan fase mobilitas unsur (Zevenhoven,Kilpinen,2001). Konsentrasi Fe dan Mn dikontrol oleh kondisi oksidasi reduksi pada sona transisi air tanah, yaitu sona terkontaminasi dan tak terkontaminasi logam berat (Brown *et al*,1999).

#### **e. Mangan (Mn), Manganese**

Mangan dijumpai dalam tanah laterit berasosiasi dengan lempung dan berwarna kehitaman atau manganes. Manganes adalah mineral yang terbentuk dari hasil pelapukan batuan ultrabasa, memiliki sifat mobilitas kuat pada kondisi asam, sangat lembut dan dikontrol oleh proses reduksi oksidasi. Manganes berasal dari mineral manganit ( $\text{MnO(OH)}$ ), pirolusit ( $\text{MnO}_2$ ), rhodochrosite ( $\text{MnCO}_3$ ), rhodonite ( $\text{MnSiO}_3$ ), hausmannite ( $\text{MnSiO}_3$ ), psilomelane ( $\text{BaMn}_9\text{O}_{16}(\text{OH})_4$ ), barunit ( $3(\text{Mn,Fe})_2\text{O}_3 \cdot \text{MnSiO}_3$ ). Hasil mobilitas yang kuat merubah manganese menjadi mangan oksida (Nadaska dan Michalik,2009)



Proses reduksi dan oksidasi akan terus terjadi pada tanah dan air tanah sehingga kemampuan mobilitas mangan akan membentuk mangan oksida dan berasosiasi dengan logam oksida (Lindsay, 1979; Stumm dan Morgan, 1996; McBride 1989, 1994; Xiang dan banin, 1996; Charlatchka dan Cambier, 2000 dalam Berkowitz et al,2008). Penelitian yang dilakukan oleh Green *et al*, 2003 dalam Berkowitz, 2008, menunjukkan bahwa konsentrasi mangan akan berubah dalam lima hari dalam kolam pengendapan akibat potensi reduksi oksidasi. Proses reduksi oksidasi ini juga akibat air asam tambang.

#### **f. Timbal (Pb)**

Timbal (nomor atom 82) adalah logam putih kebiruan dari kilau cerah, lembut, sangat mudah dibentuk, *ductile*, dan penghantar listrik yang buruk. Secara sederhana dalam sistem air tawar, timbal bereaksi terkena CO<sub>2</sub> atmosfer dan mengandung 10<sup>-3</sup> M Cl<sup>-</sup>, 10<sup>-4</sup> M SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, dan 10<sup>-6</sup> M HPO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, dan diperkirakan bahwa Pb akan terbentuk dalam ikatan karbonat Pb(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> dalam kisaran pH 6–8 (Hem dan Durum, 1973). Di lingkungan pengaruh air hujan yang teroksidasi, konsentrasi Pb terlarut lebih sedikit dari 1 mg L<sup>-1</sup> selama kisaran pH 6-8 (Reimann dan de Caritat, 1998).

#### **g. Cadmium (Cd)**

Kadmium masuk dalam kelompok unsur IIB dalam tabel periodik dan dalam larutan air memiliki keadaan oksidasi 2p yang stabil, memiliki nomor atom 48, dan berat atom 112,40 terdiri dari delapan kelompok senyawa pada lingkungan, yang paling umum melimpah adalah Cd dengan berat atom 112.114 dan kepadatan 8,65 g cm<sup>-3</sup> (Nriagu, 1980a). Di dalam beberapa aspek Cd mirip dengan Zn (itu adalah tetangga dari Zn dalam tabel periodik); sebenarnya hampir selalu berasosiasi dengan Zn dalam endapan mineral dan bahan bumi lainnya. Sifat fisika kadmium adalah lembut, keperakan putih, logam ulet dengan semburat kebiruan samar. Memiliki titik leleh 321 °C dan titik didih 765 °C.

#### **h. Zinc (Zn)**

Seng (atom no. 30) kelompok IIB dari tabel periodik memiliki berat atom 65,39, bersifat divalen dalam semua senyawanya. Sebagai logam berat afinitas geokimianya adalah chalcophilic. Kompleks dari Zn dengan SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> menjadi penting

pada sulfat tinggi konsentrasi atau di perairan asam. Sifat hidrolisis dalam tanah menjadi signifikan pada nilai pH lebih besar dari 7,5; membentuk kompleks hidroksi  $ZnOH_2$  dan  $Zn(OH)_2$  dan tidak melebihi spesies karbonat pada konsentrasi lingkungan khas 15 mg L<sup>-1</sup> untuk dunia aliran air (Reimann dan de Caritat, 1998).

## **2.6 Kesuburan Tanah (*Fertility*)**

Tanah merupakan obyek utama dalam menganalisis kesuburan tanah. Kesuburan tanah adalah kemampuan suatu tanah untuk menghasilkan produk tanaman yang diinginkan pada lingkungan tempat tanah itu berada (Yuwono, 2007). Tanah produktif mempunyai kesuburan yang menguntungkan bagi pertumbuhan tanaman. Kesuburan tanah adalah kemampuan atau kualitas suatu tanah menyediakan unsur hara tanaman dalam jumlah yang mencukupi kebutuhan tanaman, dalam bentuk senyawa-senyawa yang dapat dimanfaatkan tanaman dan dalam perimbangan yang sesuai untuk pertumbuhan tanaman tertentu dengan didukung oleh faktor pertumbuhan lainnya. Tanah yang terkontaminasi logam berat menjadi perhatian utama pada lahan pasca tambang. Sumber utama pencemaran tanah pada pasca tambang laterit adalah terkonsentrasinya logam berat pada lapisan lempung lanau yang terbentuk sejak penimbunan. Logam berat menyebabkan hilangnya struktur tanah dan komunitas mikroba yang mempengaruhi rantai makanan dan kontaminasi air (Diagne et al, 2015)

## **2.7 Remediasi**

Remediasi tanah adalah cara memurnikan dan merevitalisasi tanah. Ini adalah proses menghilangkan kontaminan untuk melindungi kesehatan populasi dan lingkungan. Singkatnya, tujuan dari proses ini adalah untuk memulihkan tanah ke keadaan alaminya yang bebas polusi. Persyaratan Remediasi Tanah (Rombi dan Hamon, 2005) :

1. Teknologi terbaik yang tersedia dipilih sesuai dengan sifat toksisitas, dan asal kontaminan, bahaya saat ini
2. Potensial yang terkait dengan tingkat kontaminasi, karakteristik kimia dan fisik tanah, penggunaan lahan, waktu yang tersedia untuk perbaikan, penerimaan masyarakat, dan analisis biaya-manfaat.

Menurut Liu et al (2018), secara global terdapat lebih dari 20 juta ha lahan yang terkontaminasi oleh logam berat (*metalloid*) seperti As, Cd, Cr, Hg, Pb, Co, Cu, Ni, Zn, dan Se, dengan konsentrasi tanah saat ini lebih tinggi daripada geobaseline atau tingkat regulasi. Teknik remediasi in-situ dan ex-situ telah dikembangkan untuk memperbaiki lokasi yang terkontaminasi logam berat, termasuk surface capping, enkapsulasi, penimbunan, pembilasan tanah, pencucian tanah, ekstraksi elektrokinetik, stabilisasi, solidifikasi, vitrifikasi, fitoremediasi, dan bioremediasi.

## **2.8 Pemodelan Geokimia Lingkungan**

Aspek geokimia lingkungan melingkupi tahapan pra penambangan, penilaian resiko lingkungan yang dimulai dari penambangan aktif, pengelolaan waste dan penutupan tambang. Geokimia lingkungan merupakan bagian integral dari siklus hidup tambang, terutama untuk pertambangan modern (Seal dan Nordstrom,2015).

Pemodelan geokimia adalah alat yang ampuh untuk mengkarakterisasi kontaminasi situs lingkungan dan memprediksi dampak lingkungan (Zhu dan Anderson,2002), mencakup beberapa faktor dalam model geokimia lingkungan, yaitu :

- (1) Deskripsi dan korelasi unsur
- (2) Isu-isu kunci untuk pengelolaan risiko kontaminasi. Menggunakan perspektif spasial, sampling representatif, pengenalan dan deskripsi struktur data spasial, dan pemodelan proses spasial, termasuk interpolasi
- (3) Studi skala lokal ini juga menunjukkan metode pemodelan proses geokimia stokastik.
- (4) Menjelaskan metode untuk analisis struktur spasial tingkat lanjut, seperti analisis tren dan anisotropi pada skala lokal – regional
- (5) Pemodelan dan pemetaan potensi geogenik memungkinkan pengembangan peta potensi unsur kontaminasi yang dapat membantu mengurangi risiko mobilisasi kumulatif. Bagian ini selanjutnya mendeskripsi spasial proses geokimia bagian sebelumnya, dan menerapkan metode analisis statistik multivariat untuk penilaian kontaminasi di daerah tangkapan pertambangan.

- (6) Model transpor sedimen yang tersebar secara spasial dijelaskan dan diterapkan, untuk memperkirakan pembebasan, pengangkutan dan pengendapan unsur beracun yang terikat sedimen di daerah tangkapan. Metode penilaian, diadopsi untuk kondisi lokal dan diuji untuk ketidakpastian parameter dalam lingkungan GIS.

Pemodelan Geokimia lingkungan memerlukan kesinambungan data, model geologi dan konsep prediksi proses lingkungan sumberdaya mineral, bahaya dan perubahan yang mungkin terkait.

## **I. Kerangka Pemikiran dan Hipotesis**

### **• Kerangka Pemikiran**

Meningkatnya penambangan nikel laterit dan bertambahnya lahan pasca tambang menimbulkan dampak nyata berupa peningkatan lahan tidak produktif di Daerah Motui. Penambangan nikel laterit menyisakan perubahan topografi tinggi menjadi rendah karena pengambilan bijih nikel pada lapisan tanah limonit dan tanah saprolit. Pasca penambangan dilakukan penimbunan pada topografi rendah dengan tanah laterit dari berbagai sumber (*waste*) berupa lapisan tanah penutup dan tanah laterit berkadar rendah.

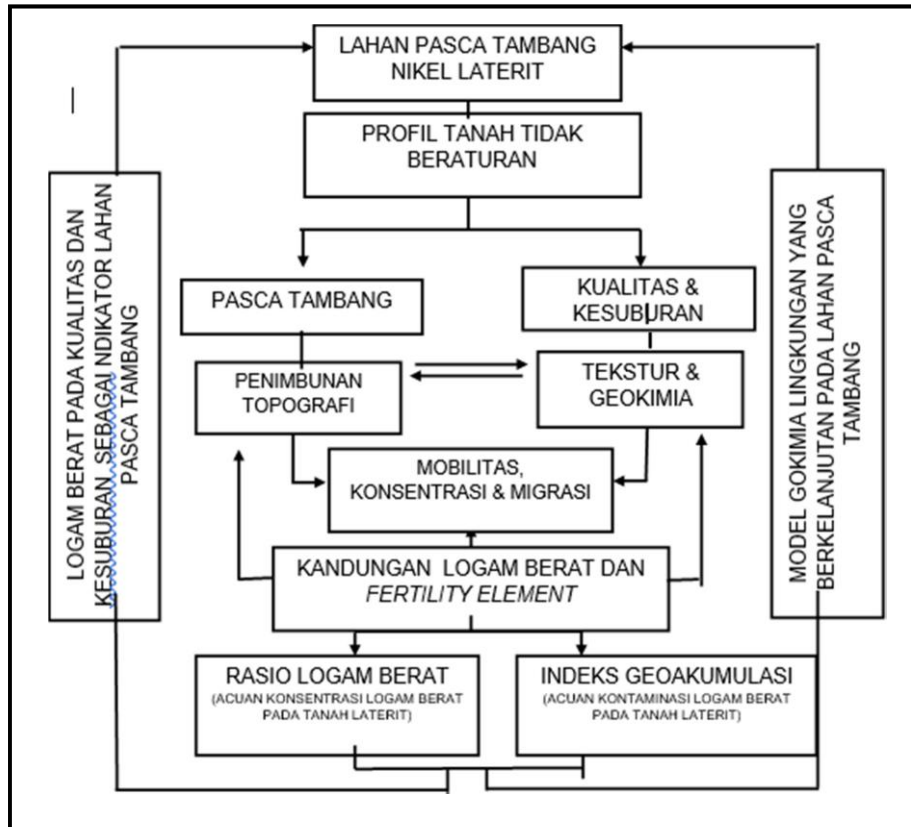
Uji tanam berbagai jenis tumbuhan pada tanah lahan pasca tambang, ternyata menghasilkan tumbuhan tidak dapat hidup atau gagal tumbuh. Hal ini menyebabkan lahan menjadi tidak produktif. Hilangnya lapisan tanah alami pada penimbunan topografi rendah berpotensi sebagai media distribusi, mobilitas, afinitas dan konsentrasi logam berat unsur organik penyubur tanah. Beberapa logam berat seperti krom (Cr), besi (Fe), Nikel (Ni), mangan (Mn), kobal (Co) berpotensi menjadi tidak stabil (*unstable*) mempengaruhi unsur penyubur tanah seperti C,N,Ca, Mg,K, Na dalam tanah laterit. Aktifitas logam berat dalam tanah sangat tergantung pada faktor fisik (abiotik) seperti fraksi tanah, struktur lempung dan lanau. Sifat kimia logam berat dalam tanah akan terdistribusi oleh air kemudian terakumulasi dalam lempung dan lanau.

Dinamika logam berat dalam tanah telah banyak diteliti terutama dalam memonitor pencemaran logam berat pada lingkungan industri dan perkotaan. Meskipun demikian informasi mengenai akumulasi logam berat kaitannya dengan lahan tidak produktif belum banyak dilaporkan. Utamanya geokimia lingkungan

logam berat dan unsur organik penyubur tanah pada pasca tambang nikel laterit belum pernah dilakukan.

Analisis logam berat dalam tanah laterit *waste* sangat penting, hal ini disebabkan kandungan logam berat dalam lempung dan lanau sangat tergantung pada, tekstur tanah, umur pasca tambang lingkungan dan iklim. Sementara mobilitas, afinitas, konsentrasi logam berat akan terus meningkat dari waktu ke waktu karena sifatnya yang *unstable* dalam lempung dan lanau, sehingga tanah sangat baik digunakan sebagai indikator geokimia lingkungan.

Kajian secara mendalam logam berat, faktor kesuburan tanah serta faktor-faktor yang mempengaruhi dalam tanah laterit dalam kawasan penambangan nikel sangat perlu dilakukan. Sehingga diperoleh suatu informasi yang akurat mengenai tingkat kesuburan tanah kaitannya dengan nilai indeks geoakumulasi (*Igeo*) logam berat. Hasil penelitian dapat dijadikan sebagai dasar acuan terhadap remediasi kondisi tanah laterit berdasarkan syarat homogenitas batuan. Daerah Motui oleh Pemerintah Daerah Kabupaten Konawe Utara dipersiapkan menjadi kawasan industri pertambangan, sangat memerlukan kajian ilmiah kebumih dan lingkungan sebagai dasar penilaian terhadap kondisi geokimia lingkungan pada lahan pasca tambang yang tidak produktif sebagai langkah remediasi menjadikan lahan produktif. Secara ringkas kerangka pikir pentingnya penelitian ini dituangkan pada gambar 6.



Gambar 6 Bagan alir kerangka penelitian

## Hipotesis

Berdasarkan studi pustaka dan kerangka pikir dapat dikemukakan hipotesis sebagai berikut :

- a. Pasca tambang merubah lapisan vertikal (profil) tanah nikel laterit menjadi tidak beraturan, kemudian berkorelasi terhadap kualitas dan kesuburan tanah laterit. Dan merubah lingkungan geokimia terhadap mobilitas unsur dan konsentrasi logam berat.
- b. Konsentrasi logam berat krom, mangan, kobal berkontribusi positif yang terkonsentrasi tinggi dalam tekstur lempung lanau dan menghambat konsentrasi unsur organik dalam tanah laterit.
- c. Model geokimia lingkungan, faktor Indeks geoakumulasi (*Igeo*), faktor mobilitas, konsentrasi logam berat krom, nikel, mangan, kobal dan unsur C, N, Ca, Mg, K, Na dapat dijadikan sebagai dasar penilaian kualitas lahan pasca tambang nikel laterit dan petunjuk bagi tahapan reklamasi lahan pasca tambang.