

**LOGAM BERAT KARSINOGENIK DALAM TANAH DAN
TANAMAN PISANG MAS DI LINGKUNGAN TAMBANG
NIKEL DI BABURINO, HALMAHERA TIMUR, PULAU
HALMAHERA**

TESIS

Oleh
KRISTIN NATALIA H. MAKAHENGGANG
233231002



PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"
YOGYAKARTA
2025

**LOGAM BERAT KARSINOGENIK DALAM TANAH DAN
TANAMAN PISANG MAS DI LINGKUNGAN TAMBANG
NIKEL DI BABURINO, HALMAHERA TIMUR, PULAU
HALMAHERA**

TESIS

Disusun sebagai salah satu syarat mencapai derajat
Magister Pertanian dengan bidang Ilmu tanah
Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Oleh

KRISTIN NATALIA H. MAKAHENGANG

233231002



**PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”
YOGYAKARTA
2025**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Tesis: Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah
Dan Tanaman Pisang Mas Di Lingkungan
Tambang Nikel Di Baburino, Halmahera
Timur, Pulau Halmahera

Nama Mahasiswa: Kristin Natalia H. Makahenggang


NIM: 233231002

Program Studi: Magister Ilmu Tanah

Telah disetujui oleh

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ir. Sari Virgawati, M Eng

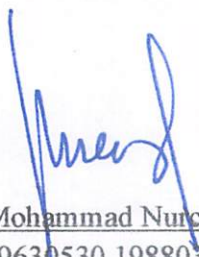
NIP. 19650915 199203 2 001


Prof. Dr. Ir. Mohammad Nurcholis, M.Agr.

NIP. 19630530 198803 1 001

Mengetahui

Koordinator Program Studi Magister Ilmu Tanah
Jurusan Ilmu Tanah
Fakultas Pertanian
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta


Prof. Dr. Ir. Mohammad Nurcholis, M.Agr.

NIP. 19630530 198803 1 001

**LOGAM BERAT KARSINOGENIK DALAM TANAH DAN
TANAMAN PISANG MAS DI LINGKUNGAN TAMBANG
NIKEL DI BABURINO, HALMAHERA TIMUR, PULAU
HALMAHERA**

TESIS

Disusun oleh:
Kristin Natalia H. Makahenggang
233231002

Telah Diuji, 16 Desember 2025

Tim Penguji

Nama dan NIP	Jabatan	Tanda tangan
Dr. Ir. Sari Virgawati, M Eng NIP. 19650915 199203 2 001	Ketua Sidang	1.
Prof. Dr. Ir. Mohammad Nurcholis, M.Agr. NIP. 19630530 198803 1 001	Anggota Penguji	2.
Prof. Dr. Ir. Susila Herlambang, M. Si NIP. 1970042323202121004	Anggota Penguji	3.
Dr. Ir Miseri Roeslan Afany, MP NIP. 19601231 198703 1 003	Anggota Penguji	4.

Mengetahui

Dekan Fakultas Pertanian
Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

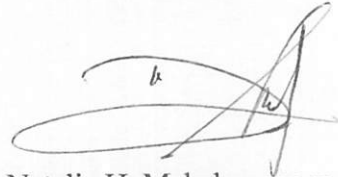
Dr. Ir. Budi Widayanto, M.Si.
NIP. 19640502 199003 1 001

Tanggal 30 DEC 2025

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “*Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah Dan Tanaman Pisang Mas Di Lingkungan Tambang Nikel Di Baburino, Halmahera Timur, Pulau Halmahera*” ini beserta seluruh isinya adalah benar-benar karya saya sendiri. Saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan dengan cara-cara yang tidak sesuai dengan etika ilmu yang berlaku dalam masyarakat keilmuan. Atas pernyataan ini, saya siap menanggung segala resiko atau sanksi apabila dikemudian hari ditemukan adanya pelanggaran etika keilmuan atau ada klaim dari pihak lain terhadap keaslian karya saya ini.

Yogyakarta, 22 Desember 2025
Yang membuat pernyataan,



Kristin Natalia H. Makahenggang
233231002

Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah Dan Tanaman Pisang Mas Di Lingkungan Tambang Nikel Di Baburino, Halmahera Timur, Pulau Halmahera

Oleh: Kristin Natalia.H Makahenggang

Dibimbing oleh:

Sari Virgawati

Mohammad Nurcholis

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis tingkat cemaran logam berat karsinogenik pada tanah dan tanaman pisang mas (*Musa acuminata*) di lahan perkebunan masyarakat Desa Baburino, Kecamatan Maba, Halmahera Timur, Maluku Utara dan untuk melihat rasio logam berat karsinogenik dalam tanah, akar dan buah tanaman pisang. Pengambilan sampel tanah dilakukan pada kedalaman 0–20 cm di sembilan titik dengan jarak bervariasi dari lokasi pertambangan nikel. Analisis laboratorium meliputi sifat kimia tanah (pH, C-organik, kapasitas tukar kation, kejenuhan basa, dan tekstur) serta kandungan logam berat nikel (Ni), kromium (Cr), dan arsenik (As) menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi Ni dan Cr dalam tanah umumnya jauh melebihi ambang batas baku mutu, masing-masing mencapai lebih dari 14.000 mg/kg dan 10.000 mg/kg, sedangkan As terdeteksi hingga 20 mg/kg. Kandungan tinggi logam berat tersebut dipengaruhi oleh faktor geogenik dari tanah ultrabasa serta aktivitas pertambangan nikel di sekitar lokasi. Pada jaringan tanaman, akar pisang mengakumulasi Ni dan Cr dalam jumlah besar, sementara kandungan pada buah juga melebihi ambang batas aman konsumsi ($\text{Ni} \leq 10 \text{ mg/kg}$; $\text{Cr} \leq 1,3 \text{ mg/kg}$), yang menandakan adanya risiko bioakumulasi pada rantai pangan. Sebaliknya, arsenik tidak terdeteksi dalam jaringan akar maupun buah karena kemungkinan terikat kuat pada oksida Fe dan Al sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Sifat kimia tanah, terutama pH, kejenuhan basa, C-organik, dan KTK, turut memengaruhi mobilitas logam, meskipun litologi ultrabasa dan aktivitas tambang tetap menjadi faktor dominan penyebab pencemaran.

Kata Kunci: Kecamatan Maba, tanah ultrabasa, pencemaran tanah, logam berat karsinogenik, *musa acuminata*.

Carcinogenic Heavy Metals in Soil and Mas Banana Plants in a Nickel Mining Environment In Baburino, East Halmahera, Halmahera Island

By: Kristin Natalia.H Makahenggang
guided by:
Sari Virgawati
Mohammad Nurcholis

ABSTRACT

This study aims to analyze the level of carcinogenic heavy metal contamination in the soil and banana plants (*Musa acuminata*) in the plantation land of the Baburino Village community, Maba District, East Halmahera, North Maluku and to see the ratio of carcinogenic heavy metals in the soil, roots and fruit of banana plants. Soil samples were collected at a depth of 0–20 cm from nine observation points located at varying distances from nickel mining areas. Laboratory analyses were conducted to determine soil chemical properties (pH, organic carbon, cation exchange capacity, base saturation, and texture) and heavy metal concentrations of nickel (Ni), chromium (Cr), and arsenic (As) using the X-Ray Fluorescence (XRF) method. The results showed that Ni and Cr concentrations in soils significantly exceeded the permissible limits, reaching more than 14,000 mg/kg and 10,000 mg/kg respectively, while As levels reached up to 20 mg/kg. These high concentrations are attributed to the combined effects of ultrabasic lithology and intensive nickel mining activities. In plant tissues, banana roots exhibited high accumulation of Ni and Cr, whereas their concentrations in fruits also exceeded the safe consumption limits (Ni ≤ 10 mg/kg; Cr ≤ 1.3 mg/kg), indicating potential bioaccumulation risks within the food chain. Conversely, arsenic was not detected in either roots or fruits, likely due to its strong binding to Fe and Al oxides, which limits its bioavailability. Soil chemical properties such as pH, base saturation, organic carbon, and cation exchange capacity influenced metal mobility, yet ultrabasic parent material and mining activity remained the dominant sources of contamination.

Keywords: Maba District, ultrabasic soil, soil pollution, carcinogenic heavy metals, *musa acuminata*

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Kristin Natalia H. Makahenggang, lahir di Tobelo, Provinsi Maluku Utara, pada tanggal 15 Desember 1999. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Pdt. Yopie Makahenggang Emeritus dan Ibu Merni Boleu. Pendidikan dasar ditempuh di SD Inpres Buli Karya, kemudian melanjutkan pendidikan di Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Buli. Setelah itu, penulis menempuh pendidikan tingkat Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Halmahera Timur. Pada jenjang pendidikan tinggi, penulis melanjutkan studi di Universitas Kristen Duta Wacana Yogyakarta pada Program Studi Biologi. Setelah memperoleh gelar sarjana, penulis melanjutkan pendidikan Magister di Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta pada Program Studi Ilmu Tanah. Selama masa perkuliahan, penulis aktif mengikuti kegiatan akademik, penelitian, dan praktikum yang mendukung pengembangan kompetensi di bidang ilmu tanah dan lingkungan.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis tepat pada waktunya.

Tesis ini ditulis sebagai salah satu syarat dalam kurikulum Fakultas Pertanian, Program Studi Magister Ilmu Tanah, selain itu bertujuan untuk menambah wawasan atau pengetahuan penulis pada khususnya dan pembaca pada umumnya.

Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Sari Virgawati, M Eng. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dalam penelitian dan tesis ini.
2. Prof. Dr. Ir. Mohammad Nurcholis, M.Agr. selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing dalam penelitian dan tesis ini.
3. Prof. Dr.Ir. Susila Herlambang, M.Si selaku dosen penelaah I yang telah menelaah dan memberi masukan dalam penelitian dan tesis ini.
4. Dr.Ir Miseri Roeslan Afany, MP. selaku dosen penelaah II yang telah menelaah dan memberi masukan dalam penelitian dan tesis ini.
5. Orang tua dan keluarga besar yang selalu memberikan doa dan semangat dalam penyusunan tesis ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan tesis ini masih terdapat kekurangan, baik dari segi isi maupun penyajian. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan masukan yang konstruktif. Semoga karya ini dapat memberikan kontribusi positif dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya.

Yogyakarta, 22 Desember 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC.....	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar Belakang Penelitian.....	1
B. Permasalahan	4
C. Tujuan.....	4
D. Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
A. Konsep Pencemaran Lingkungan.....	6
B. Perkembangan Tanah Dari Batuan Ultrabasa	7
C. Potensi Pertambangan Nikel	9
D. Proses Penambangan Nikel	9
E. Pencemaran Logam Berat	11
F. Logam Berat	13
G. Sifat Logam Berat	16
H. Logam Berat Karsinogenik	18
I. Standar Ambang Batas Logam Berat Dalam Tanah.....	20
J. Sifat Kimia Tanah Terkait Pencemaran Dalam Tanah.....	20
K. Bioakumulasi Logam Berat Dalam Tanaman	23
L. <i>Musa Acuminata</i>	25
M. Standar Ambang Batas Logam Berat Dalam Tanaman Pisang.....	27

N. Penelitian Terdahulu	29
O. Diagram Alir Pemikiran	31
BAB III METODOLOGI	32
A. Tempat Dan Waktu	32
B. Alat Dan Bahan	34
C. Metode Penelitian	35
D. Diagram Alir Penelitian	40
E. Tata Laksana Penelitian	41
F. Analisis Data.....	48
BAB IV KEADAAN UMUM DAERAH PENELITIAN	49
A. Kondisi Geografis	49
B. Keadaan Iklim	50
C. Formasi Geologi	52
D. Jenis Tanah	57
E. Jenis Tata Guna Lahan	58
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	61
A. Karakteristik Sifat Kimia Tanah	61
B. Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah.....	66
C. Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanaman Pisang Mas	73
D. Rasio Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah, Akar Dan Buah Tanaman Pisang	81
E. Hubungan Korelasi Logam Berat dalamTanah, Akar dan Buah Tanaman Pisang Mas	92
BAB VI PENUTUP	103
A. Kesimpulan	103
B. Saran	105
DAFTAR PUSTAKA.....	107
LAMPIRAN	117

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Cemaran logam berat dalam tanah di Indonesia.....	12
Tabel 2.2 Standar ambang batas logam berat dalam tanah.....	20
Tabel 2.3 Standar ambang batas logam berat dalam tanaman pisang mas (jaringan akar dan buah).....	28
Tabel 3.1 Lokasi pengambilan sampel.....	40
Tabel 4.1 Formasi Geologi Kecamatan Maba, Halmahera Timur.....	52
Tabel 4.2 Sebaran dan bukti lapangan batuan ultrabasa di Kecamatan Maba.....	56
Tabel 4.3 Jenis Tanah di Kecamatan Maba, Halmahera Timur.....	57
Tabel 4.4 Tata Guna Lahan di Kecamatan Maba, Halmahera Timur.....	58
Tabel 5.1 Hasil analisis sifat kimia tanah.....	61
Tabel 5.2 Hasil analisis tekstur tanah.....	63
Tabel 5.3 Rasio logam berat Cr, Ni, dan AS dalam tanah dan akar tanaman pisang mas.....	86
Tabel 5.4 Rasio logam berat Cr, Ni, dan As dalam akar dan buah tanaman pisang mas.....	90
Tabel 5.5 Korelasi Sifat Kimia Tanah dan Total Logam Berat.....	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Mekanisme logam berat karsinogenik di dalam tubuh manusia.....	18
Gambar 2.2 Diagram alir pemikiran.....	31
Gambar 3.1 Lokasi penelitian.....	33
Gambar 3.2 Titik penelitian.....	37
Gambar 3.3 Diagram alir penelitian.....	39
Gambar 3.4 Foto kondisi titik pengambilan sampel.....	41
Gambar 3.5 Pengambilan sampel tanah.....	41
Gambar 3.6 Lokasi pengambilan sampel tanaman pisang mas.....	42
Gambar 4.1 Peta Geologi.....	51
Gambar 5.1 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam tanah.....	67
Gambar 5.2 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam tanah.....	69
Gambar 5.3 Total kadar logam berat arsenik (As) dalam tanah.....	71
Gambar 5.4 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam akar Pisang.....	73
Gambar 5.5 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam buah pisang.....	75
Gambar 5.6 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam akar pisang.....	77
Gambar 5.7 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam buah pisang.....	79
Gambar 5.8 Proses masuknya unsur-unsur logam berat di lingkungan.....	81
Gambar 5.9 Total Logam Berat Karsinogenik (Cr, Ni) dalam tanah, akar buah dan tanaman pisang mas.....	82
Gambar 5.10 Hubungan korelasi totallogam berat karsinogenik kromium (Cr) dalam akar dan buah pisang mas.....	92
Gambar 5.11 Hubungan korelasi total logam berat karsinogenik nikel (Ni) dalam akar dan buah pisang mas.....	95

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang Penelitian

Keberadaan tanah ultrabasa di wilayah tropis, termasuk Indonesia, sangat berhubungan dengan sumber daya mineral, terutama nikel. Daerah-daerah dengan singkapan batuan ultrabasa umumnya juga menjadi lokasi eksploitasi pertambangan, sehingga keberlanjutan lingkungan seringkali menghadapi tantangan serius (Purwanto *et al.*, 2021). Aktivitas pelapukan alami yang dikombinasikan dengan gangguan antropogenik dari pertambangan mempercepat pelepasan logam berat ke lingkungan sekitar (Kabata-Pendias, 2011). Dampaknya tidak hanya pada penurunan kualitas tanah dan air, tetapi juga pada akumulasi logam berat dalam jaringan tanaman yang dibudidayakan masyarakat (Alloway, 2013).

Tanah merupakan komponen vital ekosistem daratan yang berfungsi sebagai media tumbuh tanaman, tempat hidup organisme tanah, serta penopang keseimbangan kehidupan melalui aspek fisik, kimia, dan biologi (Brady & Weil, 2017). Akan tetapi, aktivitas manusia seperti pertambangan sering kali merusak fungsi tersebut, misalnya dengan menurunkan tutupan vegetasi, meningkatkan erosi, dan memasukkan polutan berupa logam berat (Fadillah *et al.*, 2020).

Logam berat adalah kelompok unsur logam yang memiliki massa jenis relatif tinggi dan pada umumnya bersifat toksik bagi organisme bila keberadaannya melebihi ambang batas toleransi (Duffus, 2002). Beberapa logam berat, seperti besi

(Fe), seng (Zn), tembaga (Cu), dan mangan (Mn), sebenarnya merupakan unsur esensial yang dibutuhkan dalam jumlah kecil untuk mendukung proses fisiologis tanaman maupun manusia (Marschner, 2012). Di sisi lain, ada pula logam berat yang tidak memiliki fungsi biologis sama sekali, seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), kadmium (Cd), dan arsenik (As), yang sejak awal sudah dianggap berbahaya walau dalam kadar rendah (Alloway, 2013). Di antara logam berat yang paling berbahaya, terdapat kelompok yang digolongkan sebagai karsinogenik, yaitu mampu memicu timbulnya kanker pada manusia. Logam seperti kromium heksavalen (Cr), arsenik (As), kadmium (Cd), dan nikel (Ni) telah banyak dilaporkan memiliki sifat karsinogenik (IARC, 2012; ATSDR, 2019).

Kontaminasi tanah oleh logam berat dapat tercermin dari perubahan sifat kimia seperti pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan kejenuhan basa (KB). Selain itu, meningkatnya fraksi logam yang mudah tersedia (bioavailable) juga memperbesar risiko penurunan kesuburan tanah, mengganggu mikroorganisme, serta memicu akumulasi logam dalam jaringan tanaman (Alloway, 2013; Adriano, 2001). Bioakumulasi logam berat adalah proses masuknya dan menumpuknya unsur logam beracun dari tanah ke dalam tubuh tanaman. Proses ini dimulai ketika logam berat seperti nikel (Ni), kromium (Cr), besi (Fe), atau arsenik (As) berada di tanah akibat pelapukan batuan atau aktivitas manusia seperti pertambangan (Baker & Brooks, 1989; Reeves *et al.*, 2003).

Konsumsi tanaman pisang yang telah terakumulasi logam berat dapat berdampak buruk bagi kesehatan manusia. Logam seperti nikel (Ni), kromium (Cr), dan arsenik (As) bersifat toksik dan tidak dapat dikeluarkan tubuh dengan mudah.

Jika dikonsumsi terus-menerus, logam ini dapat menumpuk dalam organ seperti hati, ginjal, dan paru-paru (WHO/FAO, 2011; Suryawan *et al.*, 2020). Pisang mas (*Musa acuminata*) merupakan buah tropis yang banyak dikonsumsi, memiliki nilai ekonomi, dan tumbuh subur di wilayah tambang. Karena sifatnya yang mudah menyerap unsur dari tanah, pisang dapat menjadi indikator bioakumulasi logam berat (Rahman *et al.*, 2020). Konsumsi pisang yang tercemar logam berat karsinogenik bisa menjadi jalur paparan berbahaya bagi masyarakat lokal (Nurcholis *et al.*, 2022).

Keberadaan logam berat di lingkungan menjadi semakin krusial untuk diperhatikan ketika aktivitas manusia, terutama pertambangan, berlangsung di kawasan kaya mineral. Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Maluku Utara, merupakan salah satu contoh nyata daerah dengan aktivitas penambangan nikel laterit skala besar. Kegiatan ini tidak hanya mengubah tata guna lahan dan memperburuk kondisi ekosistem, tetapi juga menimbulkan akumulasi logam berat di dalam tanah (Wahyudi *et al.*, 2021). Penelitian terdahulu bahkan menunjukkan bahwa kadar nikel di tanah sekitar tambang di Halmahera Timur telah melebihi ambang batas baku mutu yang berlaku, sehingga berpotensi mencemari lahan pertanian, menurunkan produktivitas tanaman masyarakat, dan dalam jangka panjang mengancam ketahanan pangan lokal (Rahman *et al.*, 2020).

Dengan kondisi tersebut, pemantauan (monitoring) terhadap pencemaran logam berat dalam tanah dan tanaman di wilayah tambang nikel menjadi penting, khususnya di Desa Baburino. Belum banyak data mengenai kandungan logam berat karsinogenik di tanah dan akumulasinya pada tanaman di lingkungan tambang

nikel, terutama di wilayah penelitian yang dipilih. Penelitian ini penting untuk mengetahui sejauh mana risiko kontaminasi, sekaligus menjadi dasar pengelolaan lingkungan dan keamanan pangan lokal.

B. Permasalahan

1. Bagaimana sifat kimia tanah di Desa Baburino, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara, Pulau Halmahera?
2. Berapa tingkat konsentrasi total logam berat karsinogenik (Cr, Ni, dan As) dalam tanah, akar dan buah tanaman pisang mas di lingkungan tambang di Desa Baburino, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara, Pulau Halmahera?
3. Berapa rasio akumulasi logam berat karsinogenik dalam tanah dengan penyerapannya pada akar dan buah tanaman pisang?

C. Tujuan

- 1 Menentukan sifat kimia tanah di Desa Baburino, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara, Pulau Halmahera.
- 2 Menentukan tingkat konsentrasi total logam berat karsinogenik (Cr, Ni, dan As) dalam tanah, akar dan buah tanaman pisang mas di lingkungan tambang di Desa Baburino, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara, Pulau Halmahera.
- 3 Menentukan rasio akumulasi logam berat karsinogenik dalam tanah dengan penyerapannya pada akar dan buah tanaman pisang.

D. Manfaat Penelitian

- 1 Ilmiah: Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pencemaran tanah akibat logam berat serta relevansinya terhadap kesuburan tanah dan bioakumulasi tanaman.
- 2 Praktis: Menjadi rujukan bagi pemerintah dan perusahaan tambang dalam menilai kualitas lahan serta mengelola tanah terdegradasi akibat pertambangan.
- 3 Sosial: Menyediakan informasi bagi masyarakat tentang risiko lingkungan dan pangan yang timbul dari pencemaran tanah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Pencemaran Lingkungan

Pencemaran lingkungan adalah kondisi ketika kualitas ekosistem menurun akibat masuknya zat, energi, atau organisme tertentu dalam jumlah melebihi ambang batas, sehingga fungsi lingkungan tidak lagi berjalan sebagaimana mestinya. Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 menjelaskan bahwa pencemaran ditandai dengan keberadaan bahan atau komponen dari aktivitas manusia dalam konsentrasi melebihi baku mutu.

Soemarwoto (2009) menyebut pencemaran sebagai perubahan keseimbangan ekosistem akibat masukan limbah atau polutan dari aktivitas manusia yang dapat mengguncang stabilitas lingkungan hidup.

Jenis pencemaran biasanya dikategorikan menurut media tempat berlangsungnya, antara lain:

1. Pencemaran udara

Umumnya bersumber dari transportasi, industri, dan kebakaran hutan. Zat pencemar utama meliputi karbon monoksida (CO), sulfur dioksida (SO₂), nitrogen oksida (NO_x), serta partikulat (PM_{2.5} dan PM₁₀) yang berisiko pada kesehatan sistem pernapasan (Miller & Spoolman, 2012).

2. Pencemaran air

Disebabkan pembuangan limbah domestik, pertanian, dan industri ke badan air yang berakibat pada degradasi kualitas air dan gangguan organisme akuatik (Effendi, 2003).

3. Pencemaran tanah

Pencemaran tanah dapat bersumber dari proses geogenik maupun antropogenik. Proses geogenik seperti pelapukan batuan ultrabasa dapat meningkatkan kandungan logam berat (Ni, Cr, Co) secara alami (Kabata-Pendias, 2011). Sementara itu, sumber antropogenik meliputi aktivitas pertambangan, industri, penggunaan pupuk dan pestisida berlebih, serta pembuangan limbah B3 (Effendi, 2016). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa aktivitas pertambangan merupakan salah satu penyumbang utama pencemaran tanah logam berat di Indonesia, termasuk di wilayah Maluku Utara (Rahman et al., 2020).

B. Perkembangan Tanah Dari Batuan Ultrabasa

Batuan ultrabasa (ultramafik) merupakan batuan beku dengan kandungan silika rendah (<45%) namun kaya akan mineral mafik seperti olivin, piroksen, dan serpentin. Kandungan logam berat seperti magnesium, besi, kromium, dan nikel pada batuan ini sangat tinggi, sehingga memengaruhi sifat tanah hasil pelapukannya (Coleman & Jove, 1992). Kondisi mineralogi ini menjadikan batuan ultrabasa sebagai sumber utama tanah laterit nikel di daerah tropis (Echevarria, 2018).

Dalam iklim tropis yang basah, pelapukan kimia pada batuan ultrabasa berlangsung intensif. Proses hidrasi, oksidasi, dan leaching menyebabkan mineral primer (olivin, piroksen) terurai menjadi mineral sekunder berupa serpentin, goethite, hematite, dan clay mineral. Unsur-unsur mobil seperti Mg dan Ca cenderung tercuci, sedangkan unsur yang relatif tidak larut seperti Fe, Cr, dan Ni terakumulasi di profil tanah (Dublet *et al.*, 2015). Hal ini menghasilkan horizon tanah dengan kandungan logam berat tinggi dan pH relatif rendah.

Pelapukan lanjut pada batuan ultrabasa menghasilkan tanah laterit yang khas. Profil tanah umumnya terdiri atas horizon limonit di bagian atas (didominasi oksida besi dan kobalt) serta horizon saprolit di bawahnya (kaya nikel dan magnesium). Proses lateritisasi inilah yang menjadikan tanah dari ultrabasa sebagai cadangan utama nikel laterit dunia, termasuk di Indonesia (Golightly, 2010; van der Ent *et al.*, 2013).

Tanah hasil pelapukan ultrabasa memiliki sifat kimia yang unik: kandungan Mg dan Fe sangat tinggi, rasio Ca/Mg rendah, serta konsentrasi Ni, Cr, dan Co sering melebihi ambang toksik bagi tanaman biasa. Kondisi ini menyebabkan kesuburan tanah rendah, sehingga hanya jenis vegetasi tertentu yang mampu beradaptasi, seperti tumbuhan hipernikelofita (Proctor, 2003; Reeves *et al.*, 2018). Di sisi lain, sifat ini juga yang mendasari penelitian fitoremediasi dan bioindikator logam berat.

Karena mengandung logam berharga, tanah laterit dari batuan ultrabasa menjadi target utama industri pertambangan nikel. Namun, tingginya kadar logam berat juga menimbulkan risiko pencemaran tanah dan akumulasi pada tanaman jika dikelola secara tidak berkelanjutan (Rajmohan & Prathibha, 2020). Oleh karena itu,

pemahaman tentang proses perkembangan tanah dari ultrabasa penting baik untuk eksplorasi tambang maupun untuk konservasi lingkungan.

C. Potensi Pertambangan Nikel

Nikel di Indonesia terutama berasal dari pelapukan batuan ultramafik yang membentuk endapan laterit. Proses pelapukan tropis menghasilkan dua lapisan penting, yaitu horizon saprolit yang kaya nikel dan horizon limonit yang kaya besi serta kobalt. Keberadaan tanah laterit inilah yang menjadikan wilayah-wilayah seperti Sulawesi dan Halmahera memiliki cadangan nikel yang berlimpah (van der Ent et al., 2013; Konopka et al., 2022).

Dalam dua dekade terakhir, Indonesia muncul sebagai produsen nikel terbesar dunia. Data USGS menunjukkan bahwa pada tahun 2024 produksi nikel global mencapai sekitar 3,7 juta ton, dan kontribusi Indonesia naik sekitar 8% ketika negara lain mengalami penurunan produksi (USGS, 2025). Fakta ini menegaskan posisi Indonesia bukan hanya sebagai pemasok utama, tetapi juga sebagai penentu tren harga di pasar internasional.

D. Proses Penambangan Nikel

Tahap eksplorasi merupakan langkah awal sebelum kegiatan penambangan nikel dilakukan. Aktivitas ini meliputi pemetaan geologi, pengeboran eksplorasi, serta analisis laboratorium untuk mengetahui kadar nikel pada bijih. Suwandhi (2017) menjelaskan bahwa di Sulawesi, eksplorasi nikel kerap menggunakan metode geolistrik dan geokimia guna memperkirakan potensi cadangan. Sementara

itu, Rosita & Haris (2019) menekankan pentingnya kajian topografi dan geologi sebagai upaya mengurangi risiko kegagalan dalam investasi pertambangan.

Penambangan nikel di Indonesia umumnya memakai sistem tambang terbuka (open pit mining), terutama untuk bijih laterit yang relatif dekat dengan permukaan tanah. Menurut Widodo (2015), metode ini dipilih karena lebih menguntungkan secara ekonomi, meskipun dampaknya terhadap kerusakan lingkungan cukup besar. Penelitian Kadir *et al.* (2020) di Halmahera menunjukkan bahwa penggunaan sistem tambang terbuka dapat mengubah sifat fisik tanah serta mempercepat laju erosi.

Setelah bijih diekstraksi, tahap berikutnya adalah pengolahan untuk memisahkan nikel dari mineral ikutan. Terdapat dua teknologi utama yang banyak digunakan:

1. Pyrometallurgy: proses pada suhu sangat tinggi untuk menghasilkan feronikel.
2. Hydrometallurgy (HPAL – High Pressure Acid Leach): teknik pelindian menggunakan tekanan tinggi dan larutan asam untuk melarutkan nikel.

Dalvi *et al.* (2004) menyebutkan bahwa metode HPAL lebih sesuai untuk bijih berkadar rendah, meskipun biaya operasionalnya tinggi. Di sisi lain, Arifin (2021) menegaskan bahwa metode pirometalurgi masih dominan di Indonesia karena teknologinya lebih mapan dan infrastruktur lebih siap.

Kegiatan penambangan nikel berdampak besar terhadap lingkungan. Dampak yang sering muncul antara lain erosi tanah, sedimentasi perairan, dan pencemaran logam berat. Nuraini & Sari (2018) melaporkan bahwa aktivitas tambang nikel di Sulawesi Tenggara meningkatkan konsentrasi logam Fe, Cr, dan Ni di perairan

sekitar. Selain itu, penelitian Imelda (2020) menunjukkan bahwa limbah sisa pengolahan (tailing) dapat menurunkan kualitas tanah dan mengganggu keberlangsungan vegetasi lokal.

Untuk mengurangi dampak tersebut, tahap reklamasi dilakukan setelah penambangan berhenti. Prayogo (2016) menekankan pentingnya revegetasi dengan jenis tanaman lokal untuk memperbaiki kembali struktur tanah. Sejalan dengan itu, Handayanto et al. (2019) menemukan bahwa penggunaan tanaman pionir seperti *Acacia mangium* dan *Vetiveria zizanioides* efektif dalam menstabilkan lahan pasca-tambang dan mempercepat proses pemulihan ekosistem.

E. Pencemaran Logam Berat

Tanah bisa terkontaminasi logam berat baik secara alami (geogenik) maupun akibat aktivitas manusia (antropogenik). Pada tanah ultramafik seperti di Halmahera, Ni dan Cr secara alami tinggi, namun pertambangan dan limbah industri memperparah kondisi ini (Alloway, 2013; Kabata-Pendias, 2011).

Logam berat bersifat toksik, sulit terurai, dan dapat masuk ke rantai makanan melalui proses bioakumulasi. Cr(VI), Ni, dan As termasuk logam karsinogenik yang diakui IARC sebagai pemicu kanker. Pada gambar 2.1 menjabarkan beberapa hasil-hasil peneliti yang pernah dilakukan terkait pencemaran logam berat dalam tanah yang terjadi di Indonesia.

Tabel 2.1 Cemaran logam berat dalam tanah di Indonesia

Lokasi	Logam	Konsentrasi (mg/kg)	Sumber
Sorowako, Sulawesi Selatan (lahan pascatambang nikel)	Nikel (Ni)	14.200	Syam <i>et al.</i> 2012; laporan biogeokimia Sorowako
Cikanika, Jawa Barat (desa ASGM)	Merkuri (Hg)	0,11-7,0	Tomiyasu <i>et al.</i> 2013
Poboya, Sulawesi Tengah (ASGM)	Merkuri (Hg)	17,62	Sari <i>et al.</i> 2016
Gunung Pongkar, Jawa Barat (ASGM)	Merkuri (Hg)	0,420-144	Agustiani <i>et al.</i> 2025
Kota Batu, Jawa Timur (lahan sayur)	Kadmium (Cd)	1,06-4,23	Handayani <i>et al.</i> 2023
	Arsenik (As)	6,55-52,93	
	Kobalt (Co)	16,69-49,56	
	Timbal (Pb)	11,06	
	Kromium (Cr)	7,88	
	Nikel (Ni)	5,43	
	Tembaga (Cu)	5,90	
	Mangan (Mn)	78,55	
	Seng (Zn)	13,32	
	Kadmium (Cd)	Tanah 0,47-1,47 Beras 0,48-0,66	
Sulawesi Selatan (sawah, padi)	Kadmium (Cd)	Tanah 0,47-1,47 Beras 0,48-0,66	Budianta <i>et al.</i> 2023
Bandung Regency, Jawa Barat (pertanian dekat industri)	Timbal (Pb) Kadmium (Cd)	Terdeteksi pada semua sampel dan sudah melebihi ambang batas internasional	Anggraeni <i>et al.</i> 2024
Yogyakarta (perkotaan, 168 titik)	Timbal (Pb)	25-95,5 Rata-rata 64	Budianta. 2012
Pangkep, Sulawesi Selatan (indeks risiko tanah)	Merkuri (Hg) Timbal (Pb)	20,81-223,47 25,98-108-68	Astuti <i>et al.</i> 2021

F. Logam Berat

Logam berat merupakan kelompok unsur logam dengan massa jenis tinggi (umumnya $> 5 \text{ g cm}^{-3}$) dan memiliki potensi toksik terhadap organisme hidup meskipun keberadaannya dalam jumlah kecil (Alloway, 2013). Istilah *heavy metals* sebenarnya tidak memiliki definisi tunggal yang baku, karena dapat didasarkan pada kriteria densitas, nomor atom, maupun toksisitasnya (Duffus, 2002). Oleh karena itu, banyak literatur modern lebih memilih menggunakan istilah “unsur logam berpotensi toksik” (*potentially toxic elements, PTEs*) untuk menggambarkan kelompok logam seperti As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, dan Zn yang memiliki efek biologis negatif pada konsentrasi tertentu (Kabata-Pendias, 2011).

Bentuk atau *spesiasi* logam berat di alam sangat menentukan mobilitas dan ketersediaannya bagi makhluk hidup. Logam dapat berada dalam bentuk ion bebas (misalnya Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}), kompleks anorganik dan organik, teradsorpsi pada mineral liat atau oksida Fe-Mn, terikat dalam bahan organik, serta dalam bentuk presipitat atau residu di kisi mineral (Kabata-Pendias, 2011). Menurut *Free-Ion Activity Model* (FIAM), aktivitas ion bebas merupakan faktor paling penting yang memengaruhi penyerapan logam oleh biota (Campbell, 1995). Nilai pH dan kondisi redoks (Eh) berperan besar dalam mengontrol spesiasi ini—pH rendah meningkatkan kelarutan kation logam, sedangkan kondisi reduktif dapat mengubah valensi unsur seperti As dan Cr (Sparks, 2003). Sebagai contoh, Cr(VI) bersifat sangat toksik dan mudah bergerak dibandingkan Cr(III), sedangkan As(III) lebih beracun daripada As(V) (Ferguson & Gavis, 1972).

Mobilitas logam berat dalam tanah juga ditentukan oleh fraksinya. Berdasarkan

metode ekstraksi berurutan Tessier et al. (1979), logam berat terbagi dalam beberapa fraksi, yaitu: larut/pertukaran, karbonat-terikat, oksida Fe-Mn, bahan organik, dan residu. Fraksi larut dan pertukaran merupakan bentuk yang paling mudah diserap tanaman, sedangkan fraksi residu bersifat stabil dan sulit tersedia (Rauret et al., 1999). Dengan demikian, sifat kimia tanah seperti pH, kapasitas tukar kation (KTK), dan kandungan bahan organik sangat berpengaruh terhadap bioavailabilitas logam (McBride, 1994).

Logam berat total menggambarkan seluruh kandungan logam yang terdapat dalam suatu sampel tanah atau sedimen, baik yang berada dalam bentuk terlarut, teradsorpsi, maupun terikat kuat pada mineral (Alloway, 2013). Nilai ini biasanya diperoleh melalui analisis destruktif total menggunakan asam kuat (seperti campuran HF–HNO₃–HClO₄) atau metode spektrometri seperti XRF dan AAS setelah digesti total. Parameter ini menunjukkan potensi maksimum logam yang terdapat dalam tanah, namun tidak menggambarkan seberapa banyak logam yang benar-benar dapat dimanfaatkan atau diserap oleh tanaman (McBride, 1994). Dengan kata lain, kandungan total memberikan indikasi “stok” logam di tanah tetapi belum tentu mencerminkan risiko biologis langsung (Adriano, 2001).

Logam berat tersedia (available atau bioavailable) adalah bagian dari logam total yang dapat dengan mudah berpindah dari fase padat tanah ke larutan tanah, sehingga dapat diserap oleh akar tanaman. Bentuk ini dipengaruhi oleh sifat kimia tanah seperti pH, kapasitas tukar kation (KTK), kandungan bahan organik, dan kondisi redoks (Sparks, 2003). Pengukuran logam tersedia biasanya menggunakan larutan ekstraksi ringan seperti DTPA (diethylenetriaminepentaacetic acid), EDTA,

atau NH_4OAc pH 7, yang meniru kemampuan akar tanaman melarutkan logam dari koloid tanah (Lindsay & Norvell, 1978). Fraksi ini paling relevan untuk menilai potensi toksisitas biologis karena merepresentasikan logam yang benar-benar dapat diambil oleh organisme hidup (Kabata-Pendias & Pendias, 2001).

Logam berat terlarut (soluble metals) mengacu pada bagian logam yang berada dalam fase larutan tanah atau air pori (soil solution), baik sebagai ion bebas (misalnya Cu^{2+} , Ni^{2+}) maupun kompleks terlarut dengan anion (misalnya Cu-EDTA , Ni-citrate) (Sparks, 2003). Fraksi ini biasanya diukur setelah penyaringan larutan dengan membran berpori $0,45\ \mu\text{m}$ dan dianalisis langsung menggunakan AAS atau ICP-OES (Reddy & D'Angelo, 1997). Logam terlarut adalah bentuk yang paling mobile dan paling cepat berpindah melalui perkolasi atau aliran permukaan, sehingga berperan besar dalam pencemaran air tanah dan bioakumulasi pada tanaman (McLaughlin et al., 2000).

Hubungan ketiga bentuk ini bersifat hirarkis: logam total > logam tersedia > logam terlarut. Artinya, hanya sebagian kecil dari logam total yang berada dalam bentuk tersedia, dan lebih sedikit lagi yang benar-benar terlarut. Perubahan pH, redoks, dan bahan organik dapat menggeser keseimbangan antarfraksi tersebut. Misalnya, pada kondisi asam dan reduktif, logam berat seperti Fe, Mn, Ni, dan Cr lebih mudah larut dan menjadi tersedia bagi tanaman, sedangkan pada pH netral–alkalin logam-logam tersebut cenderung terpresipitasi atau teradsorpsi kuat oleh koloid tanah (Sposito, 2008).

G. Sifat Logam Berat

1. Persistensi dan Non Biodegradabilitas

Logam berat bersifat persisten, artinya tidak dapat terurai secara alami oleh mikroorganisme di lingkungan. Berbeda dengan polutan organik, logam berat seperti nikel (Ni), kromium (Cr), dan arsenik (As) tetap berada dalam tanah atau air dalam jangka waktu lama, sehingga akumulasi dari aktivitas industri dan pertambangan dapat menimbulkan pencemaran kronis (Alloway, 2013). Sifat non-biodegradabilitas inilah yang membuat logam berat berbahaya karena dapat terus bertahan lintas generasi (Tchounwou *et al.*, 2012).

2. Toksisitas dan Bioakumulasi

Sebagian besar logam berat bersifat toksik bahkan dalam konsentrasi rendah. Toksisitas logam berat dapat menimbulkan gangguan fisiologis pada tanaman, hewan, maupun manusia. Contohnya, kromium heksavalen (Cr^{6+}) dikenal bersifat karsinogenik, sedangkan arsenik dapat memicu gangguan kulit, sistem saraf, hingga kanker (Nordberg *et al.*, 2015). Selain itu, logam berat juga mengalami bioakumulasi, yaitu proses penumpukan bertahap dalam jaringan organisme. Tanaman yang tumbuh di tanah tercemar dapat menyerap logam berat melalui akar, lalu terakumulasi pada jaringan hingga akhirnya masuk ke rantai makanan manusia (Kabata-Pendias, 2011).

3. Mobilitas dan Bioavailabilitas

Sifat pencemaran logam berat juga ditentukan oleh mobilitas (kemudahan berpindah dalam media tanah dan air) serta bioavailabilitas (ketersediaan bagi organisme). Faktor seperti pH, kapasitas tukar kation (KTK), bahan organik, dan

tekstur tanah sangat memengaruhi mobilitas logam berat. Misalnya, pada tanah masam, kation logam lebih mudah larut dan tersedia bagi tanaman, sehingga meningkatkan risiko pencemaran biologis (Yu *et al.*, 2017). Sebaliknya, pada tanah dengan kandungan bahan organik tinggi, logam dapat terikat lebih kuat sehingga mobilitasnya menurun (Kicińska, 2019).

4. Efek Sinergis dan Multikontaminasi

Lingkungan jarang tercemar oleh satu jenis logam saja. Umumnya, terdapat kombinasi beberapa logam berat yang menimbulkan efek sinergis. Misalnya, keberadaan Ni dan Cr pada tanah ultrabasa di wilayah pertambangan nikel dapat memperparah tekanan fisiologis pada tanaman, karena keduanya bersaing dalam proses penyerapan ion (Rao *et al.*, 2019). Multikontaminasi ini juga memperbesar risiko kesehatan masyarakat, sebab tubuh manusia sulit mendetoksifikasi berbagai logam secara bersamaan (Mielke & Reagan, 2017).

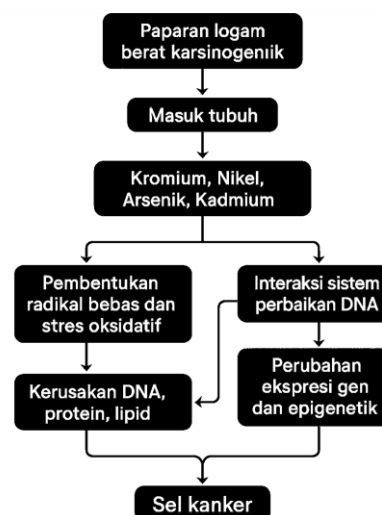
5. Potensi Karsinogenik dan Mutagenik

Beberapa logam berat, seperti arsenik (As), kromium (Cr^{6+}), dan kadmium (Cd), dikategorikan sebagai karsinogen oleh International Agency for Research on Cancer (IARC). Logam-logam tersebut dapat menyebabkan kerusakan DNA, mutasi genetik, hingga kanker jika paparan berlangsung lama (WHO, 2010). Hal ini menjadikan pencemaran logam berat sebagai salah satu ancaman serius terhadap kesehatan manusia, khususnya di daerah sekitar tambang dan kawasan industri.

H. Logam Karsinogenik

Zat karsinogenik adalah senyawa yang dapat memicu perkembangan kanker melalui berbagai mekanisme, baik dengan merusak DNA secara langsung, memengaruhi regulasi sel, maupun meningkatkan stres oksidatif. Miller & Miller (1981) menjelaskan bahwa zat karsinogen dapat menyebabkan mutasi genetik atau perubahan fungsi sel sehingga memicu proliferasi sel abnormal. International Agency for Research on Cancer (IARC, 2012) telah mengklasifikasikan sejumlah logam berat dalam kelompok karsinogen berdasarkan bukti epidemiologi dan eksperimen laboratorium.

Menurut Duffus (2002), logam karsinogenik dapat merusak DNA baik secara langsung maupun tidak langsung melalui pembentukan Reactive Oxygen Species (ROS). Jomova & Valko (2011) menambahkan bahwa logam-logam ini juga menghambat sistem perbaikan DNA, menginduksi stres oksidatif, serta memengaruhi ekspresi gen yang terkait dengan kanker.



Gambar 2.1 Mekanisme logam berat karsinogenik di dalam tubuh manusia.

Beberapa logam berat yang diketahui bersifat karsinogenik antara lain:

1. Arsenik (As): termasuk dalam kelompok 1 (sangat karsinogenik) menurut IARC. Paparan arsenik kronis melalui air minum dikaitkan dengan kanker kulit, paru-paru, dan kandung kemih. Mekanisme utamanya adalah induksi stres oksidatif dan perubahan epigenetik (Smith *et al.*, 2002).
2. Kadmium (Cd): logam ini dapat terakumulasi dalam tubuh dan menimbulkan kanker prostat, paru, serta ginjal. Efek karsinogeniknya terutama melalui penghambatan enzim DNA repair dan pembentukan ROS (Waalkes, 2003).
3. Kromium (Cr): bentuk heksavalen sangat beracun dan karsinogenik. Pekerja industri yang terpapar Cr(VI) memiliki risiko tinggi terkena kanker paru-paru, karena Cr dapat berikatan langsung dengan DNA dan menimbulkan mutasi (Costa & Klein, 2006).
4. Nikel (Ni): paparan nikel kronis berhubungan dengan kanker saluran pernapasan. Kasprzak *et al.* (2003) menyebutkan bahwa nikel memicu perubahan epigenetik, termasuk metilasi DNA dan aktivasi onkogen.
5. Beryllium (Be): juga dikategorikan karsinogen kelompok 1. Paparan jangka panjang pada pekerja industri beryllium terbukti meningkatkan insiden kanker paru-paru, terutama melalui mekanisme inflamasi kronis (Steenland & Ward, 1991).

I. Standar Ambang Batas Logam Berat Dalam Tanah

1. Kromium (Cr): FAO/WHO menetapkan ambang batas 100 mg/kg di tanah. Kasus di Yogyakarta menunjukkan pencemaran Cr pada lahan bekas industri penyamakan mencapai 150–200 mg/kg (Sutrisno *et al.*, 2015).
2. Nikel (Ni): Standar kualitas tanah Uni Eropa 75 mg/kg. Namun, di Halmahera Timur, kandungan Ni akibat tambang dapat mencapai >200 mg/kg (Santoso, 2014).
3. Arsenik (As): WHO menetapkan batas aman 20 mg/kg di tanah. Penelitian di Kalimantan menemukan kadar 25–45 mg/kg pada tanah bekas tambang emas (Rahmawati, 2016).

Pada Tabel 2.2 menyajikan standar ambang batas dari logam berat karsinogenik (Cr, Ni, As) dalam tanah.

Tabel 2.2 Standar ambang batas logam berat dalam tanah

Logam berat	Standar ambang batas (mg/kg)	Sumber
Kromium (Cr)	100	FAO/WHO (2013)
Nikel (Ni)	75	EU Soil Quality Standards (2011)
Arsenik (As)	20	WHO (2008)

J. Sifat Kimia Tanah Terkait Pencemaran Dalam Tanah

1. pH tanah menunjukkan tingkat keasaman atau kebasaan tanah yang sangat memengaruhi ketersediaan unsur hara dan aktivitas mikroba. Tanah dengan pH terlalu rendah (asam, < 5,5) cenderung menyebabkan kelarutan logam toksik seperti Al^{3+} , Fe^{2+} , dan Mn^{2+} meningkat sehingga menghambat pertumbuhan akar tanaman. Sebaliknya, pH terlalu tinggi (> 8,0)

menyebabkan unsur mikro seperti Fe, Zn, Cu, dan Mn menjadi tidak tersedia. Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2006 tentang *Baku Mutu Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa*, nilai pH tanah ideal berada antara 4,5–8,5 (Kementerian Lingkungan Hidup, 2006). Menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No. 7 Tahun 2006, nilai pH tanah yang masih tergolong baik untuk produksi biomassa adalah antara 4,5 – 8,5. Dalam konteks pertanian tropis, pH H₂O optimum untuk sebagian besar tanaman berkisar 5,5–7,0, sementara pH KCl biasanya 0,5–1 unit lebih rendah (Kementerian Lingkungan Hidup, 2006).

2. Kandungan karbon organik (C-organik) merupakan indikator penting kesuburan tanah karena berhubungan dengan aktivitas biologi tanah, kapasitas tukar kation, dan kemampuan tanah menahan air. Menurut Pusat Penelitian Tanah (1983), kadar C-organik < 1% dikategorikan sangat rendah, 1–2% rendah, 2–3,5% sedang, 3,5–5% tinggi, dan > 5% sangat tinggi. Kandungan tinggi C-organik meningkatkan ketersediaan unsur hara melalui proses mineralisasi bahan organik serta memperbaiki struktur tanah (Hardjowigeno, 2015).
3. KTK menunjukkan kemampuan tanah menahan dan menukar kation hara. Tanah dengan KTK tinggi (≥ 24 cmol(+)/kg) memiliki kemampuan menahan hara lebih baik dibandingkan tanah dengan KTK rendah (< 12 cmol(+)/kg). Menurut Balai Penelitian Tanah (2009), KTK sangat dipengaruhi oleh kandungan liat dan bahan organik; tanah liat montmorilonit memiliki KTK lebih tinggi dibandingkan kaolinit. Nilai KTK rendah mengindikasikan tanah

miskin hara dan rentan terhadap pencucian (Hakim et al., 1986). Muatan permukaan dan titik muatan nol (PZC): Permukaan mineral tanah dapat berubah sifat muatannya sesuai dengan pH. Bila pH berada di bawah PZC, permukaan bermuatan positif sehingga lebih mudah mengadsorpsi anion seperti arsenat. Sebaliknya, pada pH di atas PZC permukaan menjadi bermuatan negatif yang lebih efektif mengikat kation logam (Kosmulski, 2021; 2023).

4. Kejenuhan basa menunjukkan perbandingan antara kation basa (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+) terhadap total kapasitas tukar kation (KTK). Nilai KB yang tinggi menandakan ketersediaan basa yang baik bagi tanaman. Berdasarkan klasifikasi Pusat Penelitian Tanah (1983), nilai $< 20\%$ termasuk sangat rendah, $20\text{--}35\%$ rendah, $36\text{--}50\%$ sedang, $51\text{--}70\%$ tinggi, dan $> 70\%$ sangat tinggi. Kejenuhan basa berhubungan erat dengan tingkat kesuburan dan pH tanah karena ion basa mampu menetralkan ion H^+ dan Al^{3+} (Hardjowigeno, 2015).
5. Tekstur tanah perbandingan antara fraksi pasir, debu (silt), dan lempung menjadi faktor utama yang mengontrol sifat fisik-kimia tanah. Tanah bertekstur halus dengan kandungan lempung tinggi memiliki luas permukaan besar dan muatan negatif tinggi, yang memungkinkan lebih banyak logam berat teradsorpsi dibandingkan tanah bertekstur kasar (Adriano, 2001). Sebaliknya, tanah berpasir dengan porositas tinggi dan luas permukaan kecil cenderung mempercepat pergerakan logam berat ke lapisan bawah melalui proses pencucian (leaching) (Rieuwerts et al., 2006). Selain itu, jenis mineral lempung juga berpengaruh: montmorillonit memiliki kemampuan jerap logam

lebih tinggi dibandingkan kaolinit karena muatan permanen yang lebih besar (McBride, 1994). Hubungan antara sifat kimia tanah dan tekstur sangat erat dalam menentukan keberadaan logam berat. Tanah bertekstur halus dengan pH netral-basa dan kandungan bahan organik tinggi umumnya memiliki tingkat mobilitas logam yang rendah karena logam banyak terperangkap dalam kompleks organik atau mineral lempung (Yoo & James, 2002). Sebaliknya, tanah bertekstur kasar, pH rendah, dan bahan organik rendah akan memperbesar peluang logam berat larut dan tersedia bagi tanaman, sehingga meningkatkan risiko bioakumulasi dan pencemaran (Wang et al., 2020). Penelitian-penelitian menunjukkan bahwa kombinasi pH, KTK, bahan organik, dan tekstur menentukan sejauh mana logam berat seperti Ni, Cr, dan As dapat berpindah dari tanah ke tanaman (Rahman et al., 2020; Wahyudi et al., 2021).

K. Bioakumulasi Logam Berat Dalam Tanaman

Bioakumulasi adalah penumpukan logam dalam jaringan tanaman melebihi kadar lingkungannya. Tanaman hiperakumulator mampu menyerap logam dalam jumlah besar dan menyimpannya tanpa kerusakan fatal (Baker & Brooks, 1989; Reeves *et al.*, 2018).

Menurut Baker & Brooks (1989), tanaman dapat disebut hiperakumulator jika mampu mengakumulasi logam tertentu pada kadar tinggi, yakni $Cd \geq 100 \text{ mg/kg}$, $Ni \text{ dan } Cu \geq 1000 \text{ mg/kg}$, serta $Zn \geq 10.000 \text{ mg/kg}$ pada jaringan kering. Standar

ini kemudian banyak digunakan sebagai acuan dalam penelitian lanjutan, termasuk oleh Reeves et al. (2018).

Mekanisme penyerapan logam dimulai di akar melalui transporter ion. Gen IRT1 pada *Arabidopsis thaliana* diketahui berfungsi membawa Fe, tetapi juga dapat memindahkan Cd, Zn, dan Mn (Vert *et al.*, 2002). Selain itu, NRAMP1 berperan dalam transportasi Mn sekaligus Cd (Caillemunte et al., 2010). Logam yang sudah masuk ke akar selanjutnya ditranslokasikan ke jaringan atas melalui xilem. Pada *Arabidopsis halleri*, gen HMA4 mengalami duplikasi sehingga meningkatkan kemampuan mentranslokasikan Zn dan Cd ke daun (Hanikenne et al., 2008). Di sisi lain, HMA3 bertugas menyekuestراسي Cd ke dalam vakuola akar, sehingga mengurangi toksisitas pada jaringan atas (Morel *et al.*, 2009).

Mekanisme penyerapan berlangsung di akar melalui transporter ion, lalu dialirkan lewat xilem ke bagian atas tanaman. Senyawa pengikat logam seperti fitokelatin dan metallothionein membantu detoksifikasi (Cobbett & Goldsbrough, 2002). Setelah masuk ke sel, logam berat sering diikat oleh senyawa pengikat logam seperti fitokelatin dan metallothionein. Cobbett & Goldsbrough (2002) menekankan bahwa fitokelatin berperan penting dalam detoksifikasi Cd melalui kompleksasi dan penyimpanan dalam vakuola.

Faktor lingkungan seperti pH, KTK, dan bahan organik tanah sangat memengaruhi ketersediaan logam. Misalnya, pada tanah masam, Cd, Pb, dan Zn lebih mudah tersedia (Kabata-Pendias, 2011). Beberapa spesies telah dikenal sebagai hiperakumulator alami, misalnya *Pteris vittata* yang mampu mengakumulasi arsenik hingga lebih dari 20.000 mg/kg (Ma *et al.*, 2001), *Alyssum*

murale yang efektif menyerap Ni (Broadhurst *et al.*, 2016), serta *Sedum alfredii* yang dikenal sebagai hiperakumulator Cd (Liu *et al.*, 2025).

L. *Musa Acuminata*

Pisang mas (*Musa acuminata*) merupakan salah satu varietas pisang yang banyak dibudidayakan di daerah tropis, termasuk Indonesia. Buahnya disukai karena rasanya manis, ukuran yang kecil, dan kandungan nutrisi seperti vitamin, mineral, dan serat yang tinggi (Robinson & Saúco, 2010). Namun, karena sifatnya sebagai tanaman konsumsi sehari-hari, pisang mas sangat rentan menjadi media akumulasi logam berat apabila tumbuh di lahan yang terkontaminasi (Raza *et al.*, 2017).

Tanaman pisang memiliki sistem akar serabut yang luas dan mampu menyerap unsur hara maupun logam dari tanah. Logam berat seperti nikel (Ni), kromium (Cr), arsenik (As), dan besi (Fe) dapat masuk ke jaringan tanaman melalui mekanisme transport ionik pada akar, lalu ditranslokasikan ke batang, daun, hingga buah (Alloway, 2013). Proses ini dipengaruhi oleh ketersediaan logam di tanah, pH, kandungan bahan organik, dan kapasitas tukar kation (Yu *et al.*, 2020).

Penelitian menunjukkan bahwa akar pisang cenderung menjadi lokasi utama akumulasi logam berat. Hal ini karena akar merupakan kontak pertama dengan tanah dan mampu mengikat ion logam pada dinding sel atau endodermis. Studi di India melaporkan bahwa akar *Musa acuminata* mampu menyerap dan menyimpan logam Cr dan Ni dalam konsentrasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan jaringan buah (Sharma *et al.*, 2008).

Meskipun sebagian besar logam berat terperangkap di akar, sejumlah penelitian membuktikan bahwa logam seperti Ni, Cr, dan As tetap dapat berpindah ke buah. Hal ini berbahaya karena buah pisang merupakan bagian yang dikonsumsi masyarakat. Laporan Kicińska (2019) menunjukkan bahwa buah pisang yang tumbuh di area tambang memiliki konsentrasi logam berat melebihi ambang batas aman konsumsi. Dengan demikian, keberadaan logam berat di buah pisang menimbulkan risiko serius terhadap kesehatan, seperti gangguan ginjal, karsinogenik, dan neurotoksik (Nordberg *et al.*, 2015).

Tingkat akumulasi logam berat dalam pisang sangat dipengaruhi oleh kondisi tanah. Tanah dengan pH rendah meningkatkan kelarutan logam, sehingga penyerapan logam berat oleh akar menjadi lebih tinggi (Effendi, 2016). Kandungan bahan organik juga berperan: kadar C-organik tinggi dapat mengikat logam dan mengurangi ketersediaannya, sementara tanah miskin bahan organik membuat logam lebih mudah diserap tanaman (Yu *et al.*, 2020).

Akumulasi logam berat dalam *Musa acuminata* menjadi isu penting bagi keamanan pangan di daerah dekat tambang nikel dan kromit. Konsumsi buah yang tercemar dapat menyebabkan bioakumulasi dalam tubuh manusia. Oleh sebab itu, pemantauan logam berat pada buah pisang mas perlu dilakukan secara rutin di wilayah rawan pencemaran tambang (Primandani *et al.*, 2021).

M. Standar Ambang Batas Logam Berat Dalam Tanaman Pisang

1. Kromium (Cr) dalam tanaman pisang

Kromium merupakan unsur non-esensial bagi tanaman dan bersifat toksik bila terakumulasi dalam jumlah besar. FAO/WHO (2008) menetapkan ambang batas Cr dalam buah konsumsi sekitar 2,3 mg/kg, sedangkan Kabata-Pendias (2011) menyebutkan bahwa konsentrasi aman Cr dalam jaringan akar tanaman adalah <0,5 mg/kg. Singh & Kalamdhad (2011) menjelaskan bahwa Cr lebih banyak tertahan di akar karena mobilitasnya rendah dalam sistem transpor tanaman. Hal ini didukung temuan Nasution *et al.* (2016) di Indonesia, di mana tanah tercemar limbah industri menyebabkan kandungan Cr pada akar pisang mencapai 3,1 mg/kg, sementara pada buah hanya 0,8 mg/kg, sehingga relatif masih aman untuk konsumsi.

2. Nikel (Ni) dalam tanaman pisang

Nikel tergolong unsur mikro esensial karena berperan dalam beberapa enzim, namun bila melebihi ambang batas akan bersifat toksik. WHO/FAO (2008) merekomendasikan kadar Ni maksimum dalam tanaman pangan sebesar 10 mg/kg untuk baik akar maupun buah. Chen *et al.* (2009) menekankan bahwa nikel lebih banyak terakumulasi pada akar dibanding buah karena adanya mekanisme eksklusi pada jaringan pengangkutan. Penelitian Santoso (2014) di Halmahera Timur menemukan bahwa kadar Ni pada akar pisang di dekat tambang mencapai 18–25 mg/kg, sementara pada buah sekitar 4–7 mg/kg. Lestari *et al.* (2020) juga melaporkan fenomena serupa di Sulawesi Tenggara, dengan kandungan Ni pada akar 12 mg/kg dan buah 3,5 mg/kg.

3. Arsenik (As) dalam tanaman pisang

As(V) bersifat analog dengan fosfat (PO_4^{3-}), sehingga dapat bersaing dengan fosfat pada situs penyerapan akar tanaman melalui transporter fosfat (PHT1 family) (Catarcha et al., 2007). Dengan demikian, keberlimpahan fosfat dapat menurunkan serapan arsenat karena terjadinya kompetisi ionik di rhizosfer (Khan et al., 2025).

Penelitian lapangan oleh Islam et al. (2023) menunjukkan bahwa urutan akumulasi arsenik pada jaringan pisang adalah akar > daun > batang semu > buah. Buah pisang cenderung memiliki kadar arsenik yang sangat rendah hingga tidak terdeteksi, karena arsenik sulit ditranslokasikan ke jaringan hasil akibat keterbatasan transportasi dalam floem (Carey et al., 2011)

Sampai dengan saat ini masih belum banyak peneliti yang menyebutkan standar ambang batas logam arsenik dalam tanaman khususnya dalam tanaman pisang.

Pada Tabel 2.3 menyajikan standar ambang batas dari logam berat karsinogenik (Cr, Ni, As) dalam tanaman pisang mas pada jaringan akar dan buah.

Tabel 2.3 Standar ambang batas logam berat dalam tanaman pisang (jaringan akar dan buah)

Logam berat	Standar ambang batas (mg/kg)		Sumber	
	Akar	Buah	Akar	Buah
Kromium (Cr)	0,5	1,3	PP (2011)	FAO/WHO (2008)
Nikel (Ni)	10	10	FAO/WHO (2008)	FAO/WHO (2008)
Arsenik (As)	-	-	-	-

N. Penelitian Terdahulu

Penelitian Gunawan, Priyanto & Salundik (2015) menunjukkan aktivitas pertambangan nikel di Halmahera Timur, khususnya di wilayah pesisir Buli dan sekitarnya, memberikan dampak signifikan terhadap kualitas tanah, air dan biota. Mereka menemukan bahwa kadar timbal (Pb) pada tanah dan pakan ternak di sekitar area tambang menunjukkan peningkatan dibandingkan kontrol, menandakan adanya transfer logam dari tanah ke organisme.

Penelitian Christita & Iwanuddin (2018) melaporkan bahwa tanah pascatambang di Tanjung Buli mengandung Cr (VI) berkisar 1,1–4,8 mg/kg. Menariknya, isolat bakteri lokal terbukti mampu mereduksi Cr (VI) hingga 41,6%, yang membuka peluang untuk penerapan bioremediasi berbasis mikroorganisme lokal.

Wahyono *et al.* (2021) meneliti tentang kadar Ni dan Cr pada sampel tanah, akar dan buah pisang di sekitar tambang laterit di Halmahera Timur dengan metode AAS dan XRF melaporkan bahwa pisang di sekitar tambang laterit memiliki kadar Ni dan Cr jauh melampaui ambang batas aman konsumsi ($\text{Ni} > 10 \text{ mg/kg}$, $\text{Cr} > 1,3 \text{ mg/kg}$).

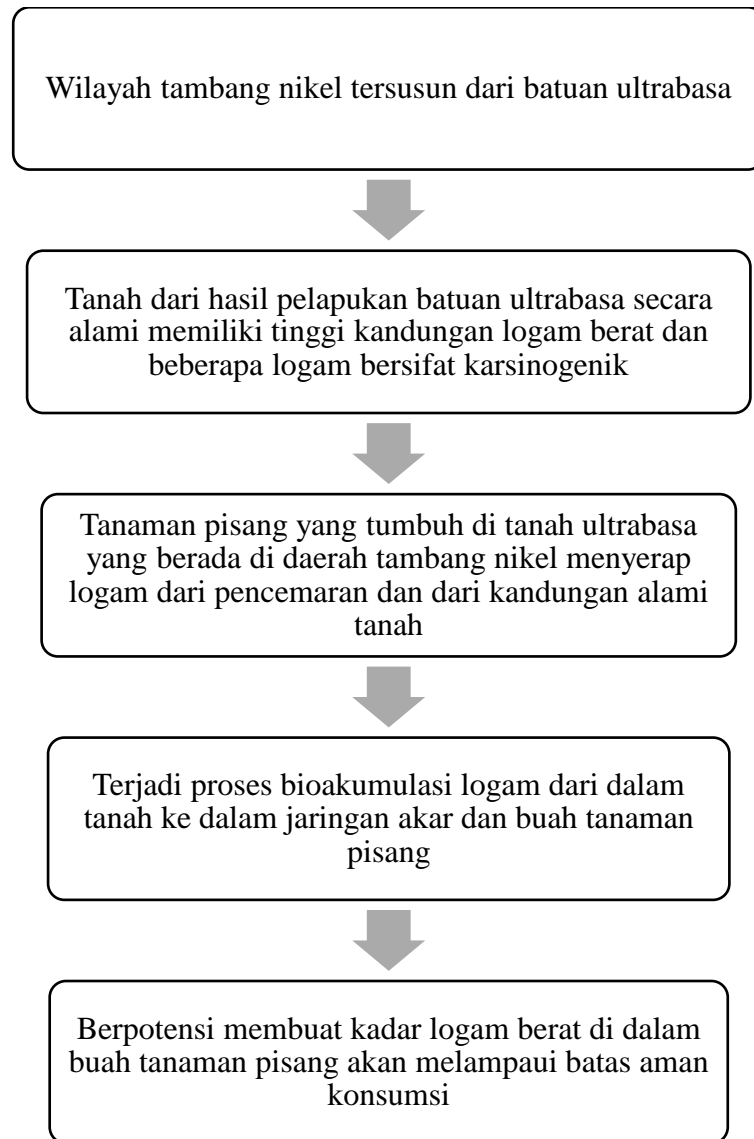
Primandani *et al.* (2020) meneliti bioakumulasi logam berat Ni dan Cr pada pisang di sekitar area tambang nikel Sulawesi. Hasil konsentrasi Ni di akar lebih tinggi (1.200–4.500 mg/kg) dibanding buah (100–800 mg/kg). Cr juga ditemukan dalam jumlah signifikan di akar, namun hanya sebagian kecil yang ditranslokasikan ke buah. Akar sebagai organ utama akumulasi, namun buah tetap berisiko tercemar jika tanah sangat kaya logam.

Widiatmoko, Mirnanda & Kurnio (2020) menganalisis sedimen dasar Teluk Buli di lingkungan laut dengan metode XRF. Melaporkan hasil dari kandungan Ni sebesar 140–7.930 mg/kg dan Fe sebesar 1,2–6,85%, yang mencerminkan masuknya material laterit dari daratan akibat erosi maupun aktivitas tambang. Hal ini sejalan dengan temuan Hersenanto & Hermansyah (2010), yang mendeteksi kadar Ni dan Cr tinggi pada sedimen sungai dan pesisir sekitar tambang.

Raswan (2017) meneliti tentang geologi batuan ultrabasa di daerah Buli dan sekitarnya. Hasil menunjukkan 85% litologi wilayah berupa dunit, harzburgit, piroksenit, serpentinit, gabro, diabas dengan derajat serpentinisasi 50-88%. Kadar Ni ditemukan pada harzburgit 1,5-3%, dunit 1,5-2,5%, serpentinit 1,5-2%.

Konopka *et al.* (2022) meneliti tentang tanah laterit di Halmahera Timur dan menghasilkan bahwa tanah laterit di Halmahera memang berasal dari batuan ultramafik yang secara alami kaya akan Ni dan Cr.

O. Diagram Alir Pemikiran



Gambar 2.2 Diagram Alir Pemikiran

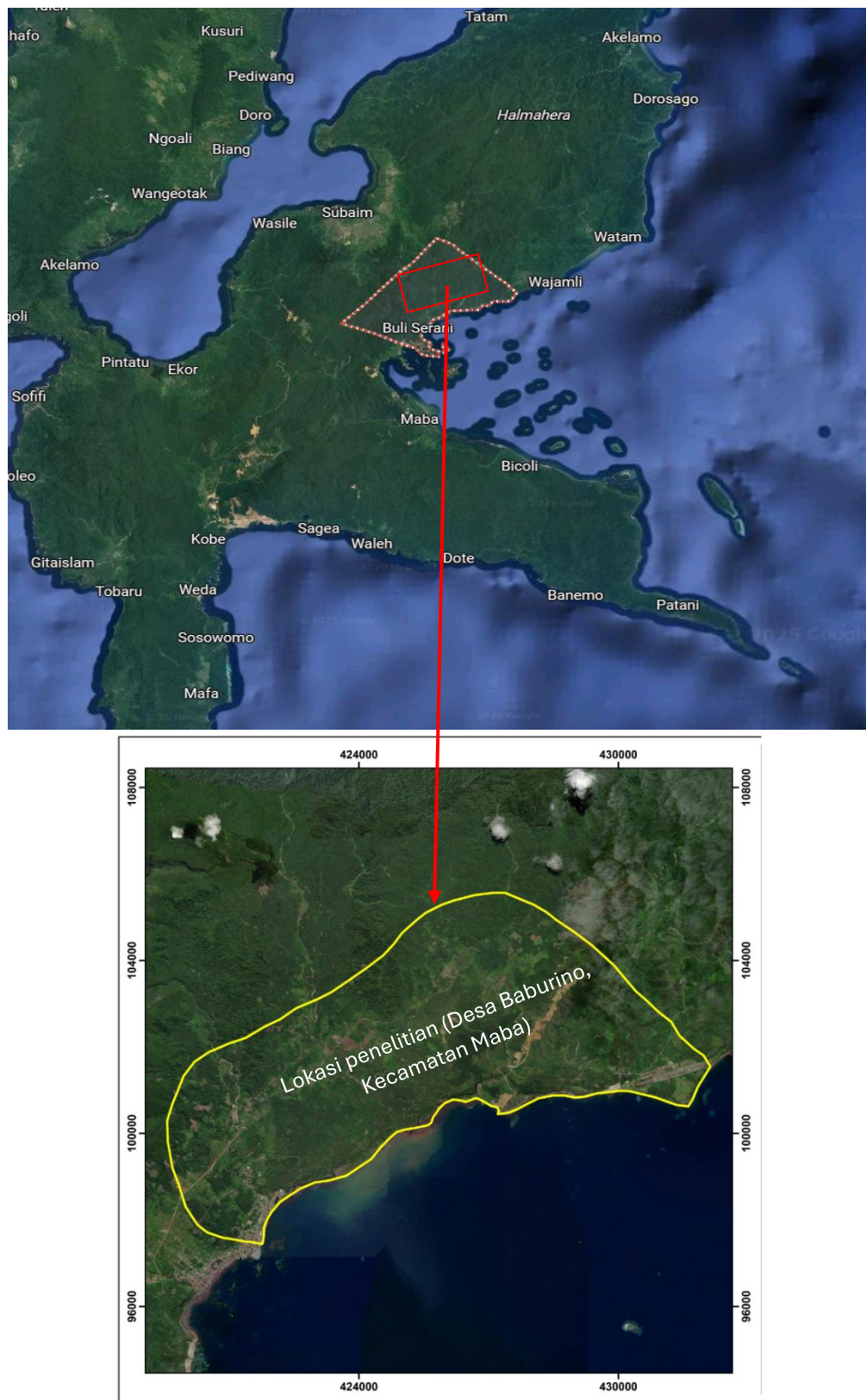
BAB III

METODOLOGI

A. Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan pada lahan kebun masyarakat yang berlokasi di Desa Baburino, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara (Gambar 3.1). Analisis logam berat dilakukan di Laboratorium Badan Riset Dan Inovasi Nasional (BRIN) Babarsari. Analisis kimia tanah dilaksanakan di Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, serta Laboratorium Badan Standarisasi Instrumen Pertanian (BSIP) Maguwoharjo.

Rangkaian kegiatan penelitian berlangsung mulai Agustus 2024 hingga April 2025. Tahapan yang dilakukan mencakup survei lapangan, pengambilan sampel tanah dan tanaman, analisis laboratorium, hingga pengolahan serta analisis data.



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

B. Alat dan Bahan

Pelaksanaan penelitian memerlukan beberapa bahan dan alat untuk menunjang kegiatan penelitian, diantaranya:

1. Analisis logam berat dalam tanaman
 - a. Alat yang digunakan: parang, cangkul, karung, plastik zip, kertas label, aplikasi timemark, oven, mortar, ayakan ukuran 100 mesh, timbangan, botol film, instrument X-Ray Fluoresence (XRF), cawan sekali pakai (32-40 mm), film prolene/mylar (4–6 μ m umum), ring/spacer, spatula antistatik
 - b. Bahan yang digunakan: sampel tanah, EDTA atau AAS/IC, helium 99.99%
2. Analisis logam berat dalam tanaman
 - a. Alat yang digunakan: parang, cangkul, plastik zip, kertas label, aplikasi timemark, oven, mortar, ayakan ukuran 100 mesh, timbangan, botol film, instrument X-Ray Fluoresence (XRF), cawan sekali pakai (32-40 mm), film prolene/mylar (4–6 μ m umum), ring/spacer, spatula antistatik
 - b. Bahan yang digunakan: sampel tanaman pisang mas (*musa acminata*), EDTA atau AAS/IC, helium 99.99%
3. Analisis pH (H₂O dan KCl)
 - a. Alat yang digunakan: pH meter, gelas beaker, pengaduk, timbangan, saringan.
 - b. Bahan yang digunakan: sampel tanah, aquades, larutan buffer pH 4 dan pH 7, KCl 1 N

4. C-Organik

- a. Alat yang digunakan: oven, timbangan, kertas saring, spatula, saringan, botol semprot, spektrofotometer, pipet, buret, labu ukur, erlenmeyer, gelas ukur, corong, gelas piala
- b. Bahan yang digunakan: sampel tanah, kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) 1 N, asam sulfat (H_2SO_4) pekat, aquades.

5. Kapasitas tukar kation (KTK) dan Kejenuhan basa

- a. Alat yang digunakan: pH meter, labu ukur, pipet, botol semprot, corong, kertas saring, timbangan.
- b. Bahan yang digunakan: sampel tanah, NH_4OAc 1 N (pH 7).

6. Tekstur tanah

- a. Alat yang digunakan: hydrometer, silinder ukur, timbangan, mixer, saringan 200 mesh, termometer, bak air, karet penutup tabung, stopwatch, spatula tanah.
- b. Bahan yang digunakan: sampel tanah, aquades, 5% natrium hexametaphosphate

C. Metode Penelitian

1. Ruang lingkup penelitian

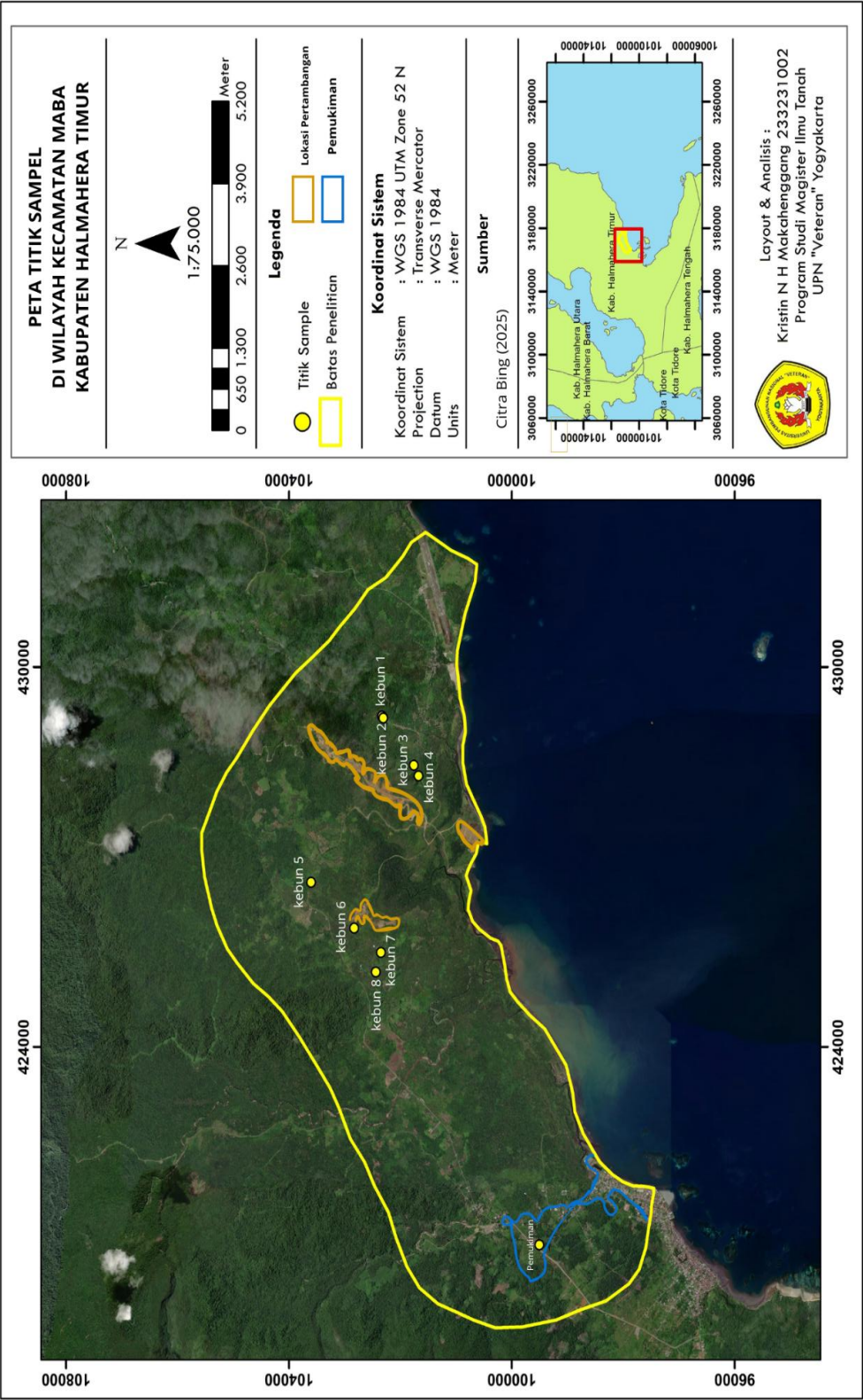
Penelitian ini bersifat deskriptif kuantitatif dengan pendekatan korelasional.

Fokus utamanya adalah mengkaji hubungan kadar logam berat yang bersifat

karsinogenik (Cr, Ni, As) di tanah dan jaringan tanaman pisang mas (akar dan buah).

2. Metode pengambilan sampel

Teknik pengambilan sampel menggunakan *purposive sampling*, yaitu pemilihan titik secara sengaja berdasarkan jarak lahan dari area tambang. Jarak ditetapkan pada interval: 0,5 km, 1 km, 1,5 km, 3 km, 4 km, 5 km, dan jarak pemukiman ± 10 km (Gambar 3.2). Tanah diambil pada kedalaman 0–20 cm dengan bobot ± 1 –2 kg per titik, kemudian disimpan dalam karung. Tanaman pisang mas diambil dari bagian akar dan buah pisang pada kebun 1, 3, 5, 7 dan pemukiman dari lokasi yang sama dengan pengambilan sampel tanah. Setiap titik mewakili perbedaan tingkat paparan aktivitas pertambangan terhadap tanah dan tanaman pisang mas.



Gambar 3.2 Titik Penelitian

3. Parameter penelitian

Parameter yang diamati meliputi:

a. Kandungan logam berat dalam tanah

1. Kromium (Cr)
2. Nikel (Ni)
3. Arsenik (As)

b. Kandungan logam berat dalam tanaman pisang mas (akar dan buah)

1. Kromium (Cr)
2. Nikel (Ni)
3. Arsenik (As)

c. Sifat kimia tanah

1. pH tanah (H_2O dan KCl)
2. C-Organik
3. Kapasitas tukar kation
4. Kejenuhan basa
5. Tekstur tanah

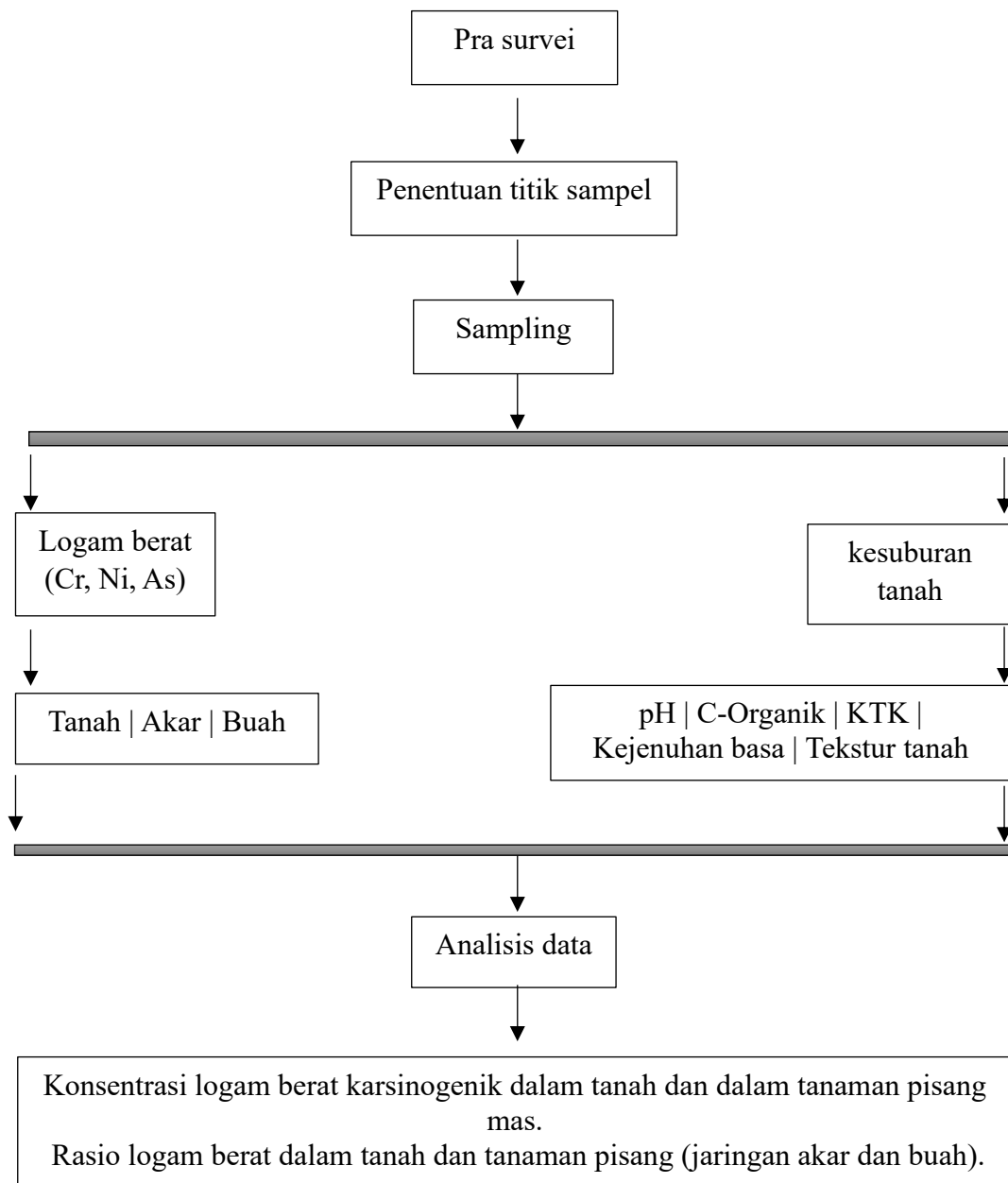
4. Metode analisis

Analisis kandungan logam berat dilakukan menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), sedangkan parameter kimia tanah dianalisis sesuai dengan metode standar analisis kimia tanah.

Setelah mendapatkan hasil dari analisis kadar logam berat karsinogenik dalam tanah dan dalam tanaman pisang mas kemudian dihitung rasio.

D. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir dalam penelitian ditampilkan pada Gambar 3.3



Gambar 3.3 Diagram alir penelitian

E. Tata Laksana Penelitian

1. Survei lapangan

Tahap awal penelitian diawali dengan survei lapangan untuk menentukan lokasi pengambilan sampel. Survei dilakukan pada lahan kebun masyarakat yang berada di sekitar area pertambangan.

Koordinat lokasi pengambilan sampel dan jarak terhadap pertambangan dan pemukiman di sajikan pada tabel 3.1, dan kondisi masing-masing titik lokasi penelitian disajikan pada Gambar 3.4

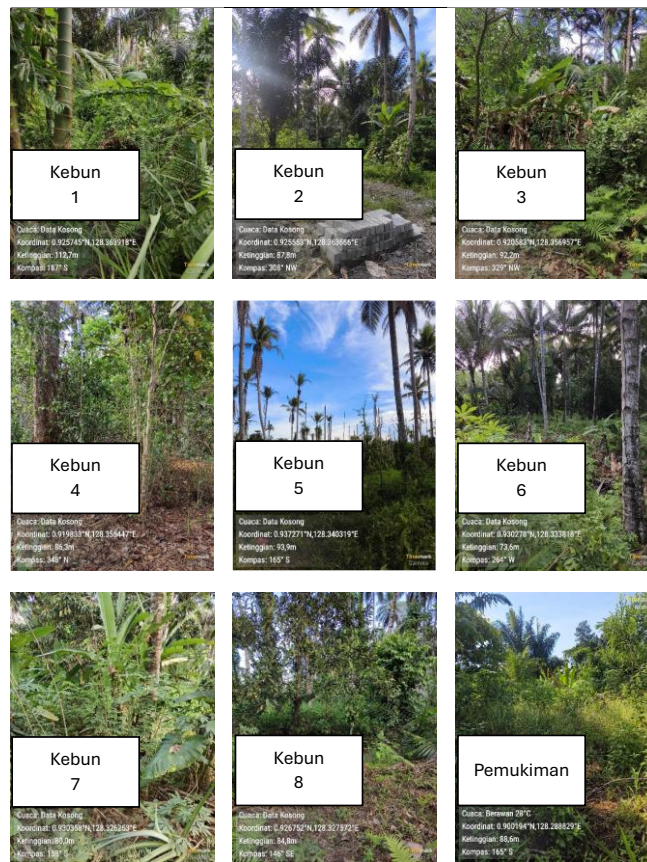
Lokasi	Koordinat	Jarak (km)		Ketinggian (m)
		*	**	
Kebun 1	0°55'32.68" N, 128°21'50.11" E	0,5	2,5	112,7
Kebun 2	0°55'32.0" N, 128°21'49.2" E	0,5	2,0	87,8
Kebun 3	0°55'14.1" N, 128°21'25.0" E	1,0	1,0	92,2
Kebun 4	0°55'11.4" N, 128°21'19.6" E	0,5	0,5	86,3
Kebun 5	0°56'14.2" N, 128°20'25.1" E	1,5	2,0	93,9
Kebun 6	0°55'49.0" N, 128°20'1.7" E	3,0	5,0	73,6
Kebun 7	0°55'33.3" N, 128°19'49.3" E	4,0	7,0	40,0
Kebun 8	0°55'36.3" N, 128°19'39.3" E	5,0	8,0	84,8
Pemukiman	0°54'0.7" N, 128°17'19.8" E	±10	-	88,6

*Pertambangan

**Pemukiman

2. Pengambilan sampel tanah

Sampel tanah diperoleh dengan menggali lapisan permukaan tanah hingga kedalaman 0–20 cm menggunakan cangkul. Setiap sampel diambil sebanyak kurang lebih 1–2 kg, kemudian dimasukkan ke dalam karung sesuai lokasi (Gambar 3.5)



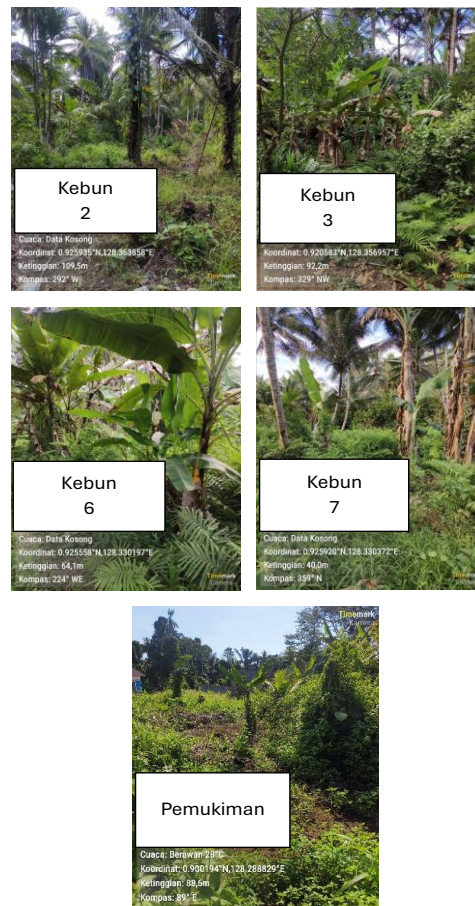
Gambar 3.4 Foto kondisi titik pengambilan sampel



Gambar 3.5 Pengambilan sampel tanah

3. Pengambilan sampel tanaman pisang

Sampel tanaman yang digunakan adalah tanaman pisang, bagian yang digunakan meliputi buah dan jaringan akar. Jenis tanaman pisang yang digunakan adalah pisang mas atau dengan nama latin *Musa Acuminata*. Pisang mas digunakan karena merupakan jenis tanaman pisang yang banyak ditemukan di lokasi. Akar dan buah tanaman pisang yang telah diambil jaringan akar dan buah kemudian dimasukkan ke dalam plastik *ziplock* dan diberi label berdasarkan lokasi. Kondisi masing-masing titik lokasi disajikan pada Gambar 3.6



Gambar 3.6 Lokasi pengambil sampel tanaman pisang mas

4. Preparasi Sampel

Sampel tanah dan tanaman pisang dikeringkan dengan cara diangin-anginkan dan menggunakan oven bersuhu rendah. Tanah dan tanaman pisang yang sudah kering kemudian dihaluskann menggunakan mortar, dan diayak dengan saringan 100 mesh (Lampiran 1), kemudian dari masing-masing sampel tanah dan tanaman pisang dibagi menjadi dua bagian: (1) analisis logam berat dalam tanah dan tanaman pisang mas (jaringan akar dan buah), (2) untuk analisis sifat kimia tanah (pH, C-Organik, KTK, kejenuhan basa dan tekstur).

5. Analisis Laboratorium

a. Logam berat dalam tanah dengan XRF

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah metode analisis non-destruktif yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan konsentrasi unsur dalam sampel serbuk, padatan maupun cairan. Prinsipnya didasarkan pada pancaran sinar-X primer ke sampel, yang menyebabkan elektron tereksitasi. Ketika elektron kembali ke orbital asal, energi dilepaskan dalam bentuk radiasi fluoresensi karakteristik tiap unsur (Alloway, 2013).

Sampel tanah dikeringkan dan setelah kering dihaluskan menggunakan mortar hingga lolos ayakan 100 mesh. Diambil 3-7gram ke dalam cawan sampel kemudian dipadatkan dan diratakan untuk minim rongga udara, kemudian dicatat massa yang terisi dan dimasukkan ke dalam wadah (holder), kemudian dipindai dengan instrumen XRF (Jenkins, 1999). Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk konsentrasi, baik dalam satuan ppm maupun persen

(%). Kelebihan XRF: cepat, minimal preparasi, mampu mendeteksi unsur dari Na hingga U, serta cocok untuk studi geokimia tanah dan batuan.

Penentuan standar ambang batas total logam berat Kromium, Nikel dan Arsenik dalam tanah menurut FAO/WHO, EU Soil Quality Standards dan WHO (Tabel 2.2).

b. Logam berat dalam tanaman

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah metode analisis non-destruktif yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menentukan konsentrasi unsur dalam sampel serbuk, padatan maupun cairan. Prinsipnya didasarkan pada pancaran sinar-X primer ke sampel, yang menyebabkan elektron tereksitasi. Ketika elektron kembali ke orbital asal, energi dilepaskan dalam bentuk radiasi fluoresensi karakteristik tiap unsur (Alloway, 2013).

Sampel tanaman bagian akar dan buah dikeringkan dan setelah kering dihaluskan menggunakan mortar hingga lolos ayakan 100 mesh. Diambil 3-7gram ke dalam cawan sampel kemudian dipadatkan dan diratakan untuk minim rongga udara, kemudian dicatat massa yang terisi dan dimasukkan ke dalam wadah (holder), kemudian dipindai dengan instrumen XRF (Jenkins, 1999). Hasil pengukuran ditampilkan dalam bentuk konsentrasi, baik dalam satuan ppm maupun persen (%).

Penentuan standar ambang batas total logam berat Kromium, Nikel dan Arsenik dalam tanah menurut FAO/WHO dan PP (Tabel 2.3).

c. Analisis pH

Pengukuran pH tanah dilakukan dengan metode potensiometri mengacu pada Soil Survey Staff (2004) menggunakan alat pH meter. Sebanyak 10 g sampel tanah dicampurkan dengan 25 mL akuades untuk pengukuran pH H₂O, atau dengan 25 mL larutan KCl 1 N untuk pengukuran pH KCl. Campuran kemudian dikocok selama 30 menit sebelum dilakukan pengukuran nilai pH.

$$\text{pH} = -\log [H^+] \quad \text{.....1)}$$

keterangan:

[H⁺] = konsentrasi ion hydrogen dalam larutan (mol/L)

d. Analisis C-Organik

Analisis kandungan C-Organik tanah dilakukan dengan metode Walkley & Black. Sebanyak 0,5 g sampel tanah ditambahkan 10 mL larutan K₂Cr₂O₇ 1 N dan 20 mL H₂SO₄ pekat, kemudian didiamkan selama 30 menit. Selanjutnya, larutan tersebut dititrasi menggunakan FeSO₄ hingga terjadi perubahan warna menjadi merah bata sebagai indikator titik akhir titrasi.

$$\% \text{C-Organik} = \frac{(Vb - Vs) \times N \times 0,003 \times 100}{W} \quad \text{.....2)}$$

Keterangan:

Vb = volume titrasi blanko (mL)

Vs = volume titrasi sampel (mL)

N = normalitas larutan FeSO₄

0,003 = beratekuivalen C (g) yang dioksidasi oleh 1 mL K₂Cr₂O₇ 1 N

W = berat sampel tanah (g)

e. Analisis KTK (Kapasitas Tukar Kation) dan Kejenuhan Basa

Analisis Kapasitas Tukar Kation (KTK) dilakukan dengan metode ekstraksi menggunakan larutan NH₄OAc 1 N pada pH 7 sesuai dengan prosedur Chapman (1965). Selanjutnya, kation-kation basa yang meliputi Ca²⁺, Mg²⁺,

K⁺, dan Na⁺ dianalisis menggunakan Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) atau flame photometer. Nilai kejenuhan basa diperoleh dengan menghitung perbandingan antara jumlah kation basa dengan nilai KTK. Kapasitas Tukar Kation (KTK/CEC)

$$CEC \text{ (cmol(+)/kg)} = \frac{C \times V \times 100}{W \times 100} \quad \dots\dots 3)$$

Keterangan:

C = konsentrasi kation (mg/L)

V = volume larutan ekstrak (mL)

W = berat sampel tanah (g)

Konsentrasi ke cmol (+)/kg dengan faktor 10

1. Kejenuhan Basa

$$KB \text{ (\%)} = \frac{\Sigma (Ca^{2++}Mg^{2++}K^{++}Na^{+})}{CEC} \times 100 \quad \dots\dots 4)$$

Keterangan:

Semua kation dinyatakan dalam cmol (+)/kg

KB menunjukkan persentase kejenuhan koloid tanah oleh kation basa

f. Analisis Tekstur Tanah

Analisis tekstur tanah dilakukan dengan menggunakan metode hidrometer Bouyoucos. Sebanyak 40 g sampel tanah dicampurkan dengan larutan Na-hexametafosfat 5% yang berfungsi sebagai bahan dispersan. Selanjutnya, kecepatan pengendapan partikel tanah yang terdiri atas fraksi pasir, debu, dan lempung diukur menggunakan hidrometer untuk menentukan proporsi masing-masing fraksi.

1. Persentase pasir

$$\% \text{ Pasir} = \frac{1000 - \text{Hidrometer bacaan 40 detik}}{10} \quad \dots\dots 5)$$

2. Persentase debu

$$\% \text{Debu} = \frac{\text{Hidrometer bacaan 40 detik} - \text{Hidrometer bacaan 2 jam}}{10} \dots\dots 6)$$

3. Persentase lempung

$$\% \text{Lempung} = \frac{\text{Hidrometer bacaan 2 jam}}{10} \dots\dots 7)$$

Keterangan:

Hasil bacaan hydrometer dikoreksi dengan suhu dan faktor meniskus

Jumlah pasir + debu + lempung \approx 100%

F. Analisis Data

Analisis data dilakukan untuk mengetahui kadar logam berat karsinogenik (Cr, Ni, As) dalam tanah dan tanaman pisang mas (jaringan akar dan buah), dan untuk melihat rasio logam berat antar tanah, akar dan buah tanaman pisang mas dengan menghitung:

1. Rasio akar pisang dan tanah (A/T)
2. Rasio buah pisang dan akar pisang (B/A)

BAB IV

KEADAAN UMUM DAERAH PENELITIAN

A. Kondisi Geografis

Desa Baburino terletak di pesisir timur Pulau Halmahera dan merupakan salah satu dari sebelas wilayah administrasi Kecamatan Maba di Kabupaten Halmahera Timur, dengan pusat pemerintahan berada di Desa Buli. Secara geografis, wilayah ini berbatasan langsung dengan Teluk Buli di sisi timur. Informasi terkait luas wilayah dan komposisi administratif tercantum dalam publikasi BPS Kabupaten Halmahera Timur Dalam Angka 2025 serta pada basis data administratif resmi Kabupaten Halmahera Timur.

- a) Baburino merupakan salah satu desa di Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur, Provinsi Maluku Utara. Berdasarkan data Kemendagri/BPS. Titik koordinat Baburino tercatat pada 0° 54' 15,34" LU, 128° 18' 50,87" BT. Perhitungan dari koordinat menunjukkan jarak garis lurus Baburino ke pusat kecamatan di Desa Buli sekitar ± 10 km. Secara topografis, Baburino berada di bagian timur Kecamatan Maba dan berhadapan langsung dengan Teluk.
- b) Buli merupakan desa pesisir sekaligus pusat administrasi Kecamatan Maba. Menurut basis data Kemendagri dan BPS, desa ini memiliki koordinat 0° 52' 50,02" LU, 128° 18' 12,99" BT, terletak di tepian Teluk Buli, dan secara historis berfungsi sebagai pelabuhan serta pintu akses maritim utama kawasan Maba.

Sejumlah penelitian geologi dan lingkungan telah dilakukan di kawasan ini. Misalnya, Ramadhan *et al.* (2020) meneliti proses lateritisasi di sekitar Buli yang berhubungan dengan batuan ultrabasa–laterit.

B. Keadaan Iklim

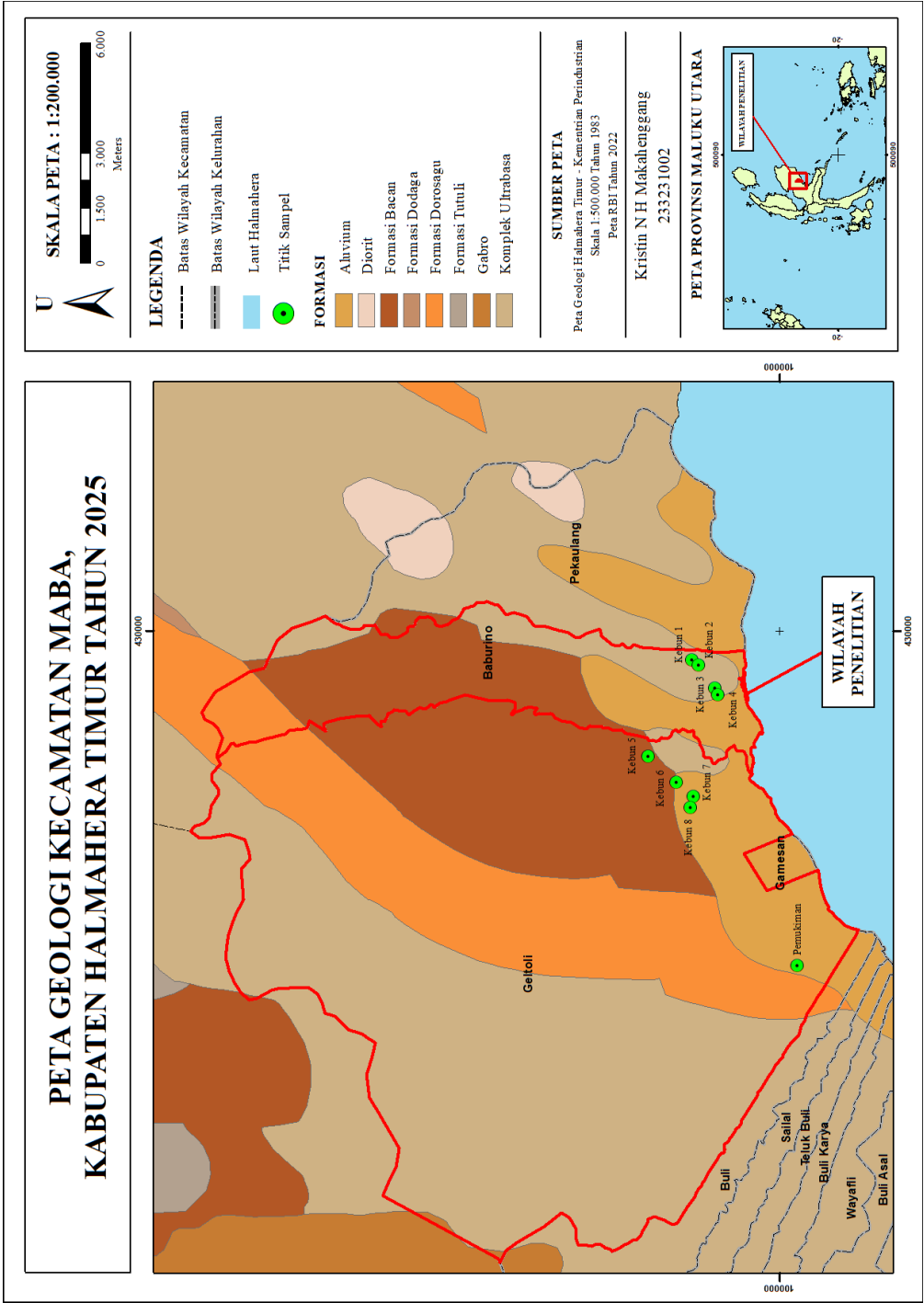
Kecamatan Maba yang berada di pesisir Teluk Buli memiliki desa-desa pesisir seperti Pekaulang dan Teluk Buli, serta desa pedalaman seperti Wayafli. Secara umum, kawasan ini beriklim tropis lembap dengan curah hujan sepanjang tahun dan fluktuasi suhu harian yang relatif kecil. Data iklim Maba diperoleh dari publikasi BPS Kabupaten Halmahera Timur Dalam Angka (2024–2025) yang bersumber dari jaringan BMKG.

- a) Berdasarkan klasifikasi Schmidt–Ferguson, Halmahera Timur termasuk dalam tipe iklim A (sangat basah), ditandai dengan semua bulan tergolong basah (≥ 100 mm/bulan) dan tidak ada bulan kering (< 60 mm/bulan). Data pemerintah daerah (profil PKP 2021) mencatat curah hujan maksimum mencapai sekitar 243,8 mm dan minimum sekitar 82,2 mm per bulan, yang konsisten dengan kategori iklim tipe A.
- b) Publikasi BPS Halmahera Timur menampilkan data tahunan/bulanan curah hujan dan hari hujan, yang menunjukkan pola hujan merata sepanjang tahun dengan variasi musiman. Data tersebut konsisten dengan tipologi iklim basah Maluku–Halmahera.
- c) Informasi operasional BMKG pada laman prakiraan cuaca untuk Kecamatan Maba menunjukkan rentang kelembapan relatif tinggi (± 75 –99%) dengan

suhu harian rata-rata 21–28 °C. Pola angin dominan berasal dari timur–tenggara, terutama pada pertengahan tahun, yang sejalan dengan pengaruh monsun Australia di Maluku Utara.

C. Formasi Geologi

Peta pada Gambar 4.1 merupakan peta formasi geologi dari daerah penelitian Kecamatan Maba, Halmahera Timur yang menggambarkan sebaran satuan batuan, struktur geologi, dan kondisi geomorfologi.



Gambar 4.1 Peta Geologi

Formasi geologi Kabupaten Halmahera Timur dari Gambar 4.1 dijabarkan dalam Tabel 4.1

Tabel 4.1 Formasi Geologi Kecamatan Maba, Halmahera Timur

Formasi	Warna	Batuan	Peran terhadap logam
Kompleks Ultrabasa	Cokelat muda kekuningan	Peridotit serpentinit	Sumber utama Ni dan Cr melalui pelapukan batuan ultrabasa
Kompleks Ultrabasa	Cokelat muda kekuningan	Peridotit harzburgit	Pelepasan Ni dan Cr tinggi
Aluvium pantai	Kuning kecokelatan	Endapan-pasir Lanau-lempung Peridotit	Zona akumulasi sekunder logam
Aluvium pantai	Kuning kecokelatan	Sedimen halus bercampur bahan organik	Logam berat terperap pada fraksi halus dan bahan organik
Kompleks Ultrabasa	Cokelat muda kekuningan	Batuan gunungapi mafik–intermediat	Penyumbang Cr dan Fe, Ni lebih rendah
Formasi Bacan (kontak dengan ultrabasa)	Cokelat tua	Vulkanik mafik teralterasi	Akumulasi Cr dan Ni tinggi
Formasi Dorosagu	Oranye	Batugamping dan sedimen terubah	Bukan sumber utama Ni dan Cr, namun dapat menjadi zona pengendapan
Aluvium	Kuning kecokelatan	Endapan pantai sungai	Akumulasi logam antropogenik dan alami

Wilayah Kecamatan Maba, Halmahera Timur, berada di zona geologi yang banyak tersusun dari batuan ultrabasa seperti dunit, lherzolit, dan harzburgit. Batuan ini berasal dari bagian mantel bumi yang terangkat ke permukaan akibat proses tektonik. Kandungan kimia utamanya adalah magnesium (Mg) dan besi (Fe)

dengan kadar silika (SiO_2) yang rendah. Selain itu, batuan ultrabasa juga kaya unsur logam seperti nikel (Ni), kromium (Cr), dan kobalt (Co) yang kemudian diwariskan ke dalam tanah ketika batuan mengalami pelapukan (Pardosi *et al.*, 2024).

Di daerah tropis lembap seperti Halmahera, batuan ultrabasa sangat mudah mengalami pelapukan akibat curah hujan tinggi dan suhu panas. Profil seperti ini sering disebut tanah laterit nikel, yang banyak ditemukan di Halmahera (Farrokhpay *et al.*, 2019). Proses ini menghasilkan tanah dengan horizon (lapisan) yang khas, yaitu:

1. Lapisan atas (limonit): berwarna coklat kemerahan, kaya besi (Fe) dan kromium (Cr).
2. Lapisan tengah (zona transisi): campuran sisa mineral asli dengan oksida besi.
3. Lapisan bawah (saprolit): berwarna hijau kecokelatan, masih menyisakan mineral asal batuan dan kaya nikel (Ni).

Tanah dari pelapukan ultrabasa memiliki ciri khas yang berbeda dengan tanah biasa. Beberapa sifat kimianya yaitu:

1. Rasio kalsium/magnesium (Ca/Mg) sangat rendah (<1) karena Mg sangat dominan sementara Ca sedikit. Kondisi ini bisa membuat tanaman sulit tumbuh normal (Rajakaruna, 2014).
2. Kadar logam berat tinggi (Ni, Cr, Co) yang berasal langsung dari batuan induk. Logam ini sering mencapai konsentrasi melebihi ambang batas aman bagi tanaman maupun lingkungan (Konopka *et al.*, 2022).
3. Kadar hara esensial rendah (fosfor, kalium, nitrogen) sehingga tanah miskin unsur yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh (Galey *et al.*, 2017).

Tanah ultrabasa umumnya memiliki pH agak masam sampai netral. Pada lapisan atas (limonit), pH cenderung lebih rendah akibat proses pencucian (pelindian) unsur basa, sedangkan di lapisan bawah (saprolit) pH bisa lebih netral karena masih banyak mengandung mineral Mg-silikat (Farrokhpay *et al.*, 2019). Teksturnya bervariasi dari lempung berpasir pada bagian atas hingga lebih berpasir atau lempung pada lapisan bawah.

Dalam tanah ultrabasa, nikel (Ni) lebih mudah larut dan bergerak dibandingkan kromium (Cr). Hal ini karena Ni sering menempel pada mineral lempung atau oksida Fe yang masih bisa terlarut, sedangkan Cr lebih stabil dan terikat kuat dalam mineral kromit atau oksida Fe sehingga lebih sulit terbawa air (Hseu, 2018). Itulah sebabnya nikel biasanya lebih banyak terakumulasi pada lapisan bawah (saprolit), sedangkan kromium banyak tersisa di lapisan atas (limonit).

Kombinasi sifat kimia tersebut membuat tanah hasil pelapukan ultrabasa tergolong tanah dengan kesuburan rendah. Tanaman sering mengalami stres karena:

1. Kekurangan unsur hara penting (Ca, P, K).
2. Rasio Ca/Mg yang tidak seimbang.
3. Tingginya kandungan Ni dan Cr yang bisa bersifat racun.

Namun, di beberapa tempat ditemukan tanaman lokal yang mampu beradaptasi, bahkan ada spesies tertentu yang bisa mengakumulasi nikel dalam jumlah tinggi sehingga berpotensi dimanfaatkan untuk fitoremediasi atau “penambangan hijau” (agromining) (van der Ent *et al.*, 2013).

Wilayah Halmahera Timur secara umum ditandai dengan sabuk ultramafik (ultrabasa) yang memanjang dari Teluk Weda di bagian tengah hingga ke Teluk Buli dan Maba di bagian timur. Sabuk ini tersusun atas peridotit, serpentinit, dan sebagian gabro yang telah mengalami alterasi kuat. Hasil kajian petrografi oleh Pardosi et al. (2024) di lengan timur Halmahera menunjukkan bahwa batuan ultramafik didominasi oleh dunit dan lherzolit, yang secara mineralogi tersusun atas olivin (>70%), piroksen (10–20%), dan mineral minor seperti kromit serta serpentin hasil proses metasomatik. Analisis geokimia menunjukkan bahwa batuan ini memiliki karakteristik Mid-Ocean Ridge Basalt (MORB), yang menandakan sumber magma berasal dari mantel atas yang telah mengalami partial melting (Pardosi et al., 2024).

Kompleks ultrabasa tersebut merupakan batuan induk (parent rock) bagi pembentukan laterit nikel (Ni–Co) yang tersebar luas di wilayah Halmahera Timur, seperti di Weda, Gee, Sangaji, Tanjung Buli, dan Mornopo. Hasil pemetaan geologi oleh Konopka et al. (2022) menunjukkan bahwa lapisan pelapukan batuan ultrabasa di wilayah ini berkembang menjadi profil laterit dengan dua zona utama: zona oksida (limonit/goetit) yang kaya Fe dan Co, serta zona silikat (saprolit) yang kaya Ni dan Mg. Profil laterit ini terbentuk melalui pelapukan intensif di bawah kondisi tropis basah dan topografi curam khas Halmahera Timur.

Beberapa sebaran dan bukti lapangan batuan ultrabasa di Kecamatan Maba dijabarkan dalam Tabel 4.2

Tabel 4.2 Sebaran dan bukti lapangan batuan ultrabasa di Kecamatan Maba

Lokasi	Hasil	Sumber
Teluk Buli Kecamatan Maba	Area pesisir dan sungai di Teluk Buli ditemukan batuan Ultrabasa 10-47%, Serpentin 12-24%, Metamorf 3-13%. Sedimen dari dasar laut Teluk Buli memperlihatkan kandungan Nikel 0,0140-0,793%, Kromit 0,0179-0,1128%, Besi 1,2-6,85%.	Widiatmoko <i>et al.</i> 2020
Buli Karya dan Baburino	Banyak dijumpai singkapan batuan Ultrabasa seperti Serpentin dan Dunite, pada tebing pesisir area sekitar tambang nikel (ditandai dengan warna cokelat dan kemerahan pada lapisan Limonit, warna kehijauan pada lapisan Saprolit)	Van der Ent <i>et al.</i> 2013

D. Jenis Tanah

Kecamatan Maba memiliki keragaman jenis tanah, sebagian besar berkembang dari batuan ultrabasa dan vulkanik muda. Tabel 4.3 menjabarkan beberapa jenis tanah utama yang ditemukan di Kecamatan Maba, Halmahera Timur:

Tabel 4.3 Jenis Tanah di Kecamatan Maba, Halmahera Timur

Jenis	Padanan menurut Soil Taxonomy (2014)	Lokasi	Deskripsi
Oksisol	OXISOLS	Baburino Pekaulang Wayafli	Tanah dengan horison B oksik yang kaya oksida Fe dan Al serta KTK rendah (<16 cmol(+)/kg). Kesuburan tanah ini rendah sehingga sering dimanfaatkan untuk perkebunan dengan input tambahan. Jenis tanah ini umum di daerah tropis basah (Sanchez, 2019).
Kambisol	INCEPTISOLS	Baburino Pekaulang Teluk Buli	Ditandai horison B kambik serta lapisan A umbrik/molik tanpa gejala hidromorfik. Sebaran Kambisol cukup luas di Maba dengan produktivitas sedang hingga tinggi tergantung bahan organik dan pengelolaan (FAO, 2015).
Aluvial	ENTISOLS	Teluk Buli Kota Maba Muara sungai (sekitar pesisir)	Tanah muda hasil endapan banjir dan pasang surut, memiliki kesuburan sedang hingga tinggi. Namun, sifatnya sangat bergantung pada dinamika banjir dan sedimentasi (BBSDLP, 2016).
Gleisol	INCEPTISOLS (AQUEPTS)	Kawasan mangrove Teluk Buli	Tanah Gleisol selalu jenuh air, memiliki kondisi reduksi tinggi, dengan kandungan bahan organik cukup tinggi. Pada beberapa lokasi dijumpai potensi tanah sulfat masam (BBSDLP, 2020).
Regosol	ENTISOLS	Pesisir Wayafli Pantai Buli	Bertekstur kasar (pasir/pasir berlempung) dengan lapisan A tebal, drainase baik, tetapi miskin bahan organik.
Renzina	MOLLISOLS	Maba Selatan Maba Tengah	Tanah dangkal dengan lapisan A molik tipis di atas batuan kapur.
Podsolik	ULTISOLS	Wasile Maba	Memiliki horison B argilik, KTK <50%, dan sifat masam dengan kandungan bahan organik rendah. Tanah ini kurang subur tanpa pengelolaan intensif.

E. Jenis Tata Guna Lahan

Penggunaan lahan di Kecamatan Maba terbagi ke dalam beberapa kategori utama, yaitu hutan alam, pertanian, perkebunan masyarakat, semak belukar (lahan tidak aktif), area pertambangan, dan permukiman. Pola tata guna lahan ini dipengaruhi oleh kondisi topografi, jenis tanah, serta aktivitas ekonomi masyarakat. Penelitian Rahman (2020) dan Putri *et al.* (2021) menegaskan bahwa keberadaan hutan dan perkebunan masyarakat menjadi faktor penting dalam sistem pemanfaatan lahan di Halmahera Timur.

Pada Tabel 4.4 menyajikan tata guna lahan yang berada di Kecamatan Maba menurut beberapa peneliti.

Tabel 4.4 Tata Guna Lahan di Kecamatan Maba, Halmahera Timur

Kategori	Deskripsi	Sumber
Hutan alam	Hutan primer/sekunder di lereng bukit, jumlah biodiversitas yang masih tinggi	Usman. 2019
Pertanian	Lahan sawah dan tegalan di sepanjang aliran sungai, didominasi oleh sawah dan palawija	Arifin & Nur. 2020
Kebun masyarakat	Komoditas utama kelapa, cengkeh, pala, pisang, kopi	Hamid. 2021
Lahan tidak aktif	Lahan terlantar, alang-alang di sekitar hutan dan sawah	Sutopo. 2018
Pertambangan	Tersebar di beberapa titik Kecamatan Maba dan salah satunya di desa Baburino	Setiawan. 2022
Pemukiman	Perkampungan, infrastruktur, jalan raya dan fasilitas umum	Nurhayati. 2020

Sumber daya alam Kecamatan Maba sebagian besar berasal dari sektor perkebunan (kopi, pala, pisang, kelapa, dan cengkeh), pertanian sawah dan ladang, serta hasil tangkapan laut. Kondisi ini menjadikan mayoritas penduduk bermata pencaharian sebagai petani dan nelayan (BPS Halmahera Timur, 2022). Namun,

pengelolaan lahan perkebunan masyarakat umumnya belum optimal. Banyak di antaranya kemudian dijual kepada pihak perusahaan tambang karena telah masuk dalam wilayah konsesi pertambangan (Idrus, 2021). Dampak dari kondisi tersebut adalah berkurangnya sumber penghidupan tradisional masyarakat sehingga sebagian beralih profesi menjadi buruh tambang, pedagang, maupun pegawai.

Aktivitas penambangan nikel di Kecamatan Maba menimbulkan perubahan besar terhadap kualitas lingkungan dan kehidupan sosial masyarakat. Hasil survei dan wawancara menunjukkan adanya penurunan hasil perkebunan, di mana sebagian besar tanaman kelapa mati akibat kondisi lahan yang kritis (Abdullah, 2020). Penambangan juga memicu deforestasi dalam skala luas, dengan kehilangan hutan mencapai lebih dari 2 juta hektar serta penurunan tutupan hutan alam sekitar 7,7% (Walhi Maluku Utara, 2021). Selain itu, sekitar 20–25 hektar tanah adat masyarakat dilaporkan diambil alih perusahaan tambang, yang berdampak pada hilangnya kebun sagu dan hutan adat (Said, 2022).

Secara umum, sejumlah dampak lingkungan dan sosial akibat aktivitas tambang di Kecamatan Maba dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Deforestasi dan hilangnya lahan adat yang mengurangi ruang hidup masyarakat lokal.
2. Pencemaran air yang memicu akumulasi logam berat seperti Ni, Cr, Fe, dan As (Yunus *et al.*, 2020).
3. Penurunan sumber pangan baik dari hasil pertanian maupun tangkapan ikan.
4. Meningkatnya erosi dan banjir, yang memperbesar potensi bencana hidrometeorologi.

5. Munculnya konflik sosial antara masyarakat, perusahaan, dan aparat pemerintah/TNI-Polri (Fauzi, 2021).
6. Penurunan kesejahteraan masyarakat akibat hilangnya mata pencaharian tradisional dan berkurangnya akses terhadap sumber daya alam.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Kimia Tanah

Hasil analisis sifat kimia tanah pada lahan perkebunan masyarakat menunjukkan adanya variasi nilai pH, C-organik, kejenuhan basa, kapasitas tukar kation (KTK), serta tekstur tanah antar titik sampling. Hasil analisis sifat kimia tanah dan tekstur disajikan dalam Tabel 5.1 dan 5.2.

Tabel 5.1 Hasil analisis sifat kimia tanah

Lokasi	pH		C-Organik (%)	KTK (cmol(+)/kg)	Kejenuhan Basa (%)
	H ₂ O	KCl			
Kebun 1	7,39	5,49	3,32	12,2	79
Kebun 2	7,43	6,11	2,21	16,2	71
Kebun 3	7,51	6,99	3,36	10,1	63
Kebun 4	6,76	5,82	3,76	12,9	56
Kebun 5	7,92	6,61	0,38	7,57	11
Kebun 6	6,72	5,42	2,40	15,6	67
Kebun 7	6,81	6,14	3,11	11,8	95
Kebun 8	7,01	5,53	2,84	11,4	96
Pemukiman	7,74	5,69	1,84	10,7	77

Hasil analisis menunjukkan variasi pH tanah berkisar antara 6,7–7,9 (pH H₂O) dan 5,4–7,0 (pH KCl). Nilai ini menunjukkan bahwa tanah pada lokasi penelitian umumnya berada dalam kondisi netral hingga agak masam. Kondisi pH berperan penting dalam mengatur ketersediaan logam berat. Pada pH rendah, ion logam lebih mudah larut dan tersedia bagi tanaman, sedangkan pada pH netral–basa, mobilitas logam cenderung menurun (Alloway, 2013).

Kandungan C-organik tanah bervariasi dari 0,38–3,76%. Kebun 5 menunjukkan kadar terendah, sementara kebun 4 tertinggi. C-organik berfungsi sebagai sumber energi mikroorganisme serta memengaruhi ketersediaan logam melalui pembentukan senyawa kompleks (humat dan fulvat). Tingginya bahan organik umumnya meningkatkan kemampuan tanah menjerap logam, sehingga menurunkan ketersediaan bioavailable (Kabata-Pendias, 2011).

Kapasitas Tukar Kation (KTK) berkisar 7,57–16,2 cmol (+)/kg. Nilai terendah terdapat di kebun 5, sedangkan tertinggi di kebun 2. KTK berhubungan erat dengan kemampuan tanah menahan kation logam, termasuk logam berat. Tanah dengan KTK tinggi lebih efektif mengadsorpsi ion logam sehingga menekan mobilitasnya (Hardjowigeno, 2010).

Kejenuhan basa menunjukkan variasi yang cukup besar, yaitu 11–96%. Kebun 5 sangat rendah (11%), menunjukkan tanah cenderung masam dengan dominasi kation Al^{3+} dan H^+ . Sebaliknya, kebun 7 dan 8 sangat tinggi (95–96%), menunjukkan tanah kaya akan basa dapat dipertukarkan (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+). Menurut Hakim *et al.* (1986), kejenuhan basa >60% termasuk kategori subur, sedangkan <20% menunjukkan tanah miskin basa.

Tabel 5.2 Hasil analisis tekstur tanah

Lokasi	Fraksi (%)			Tekstur*)
	Debu	Lempung	Pasir	
Kebun 1	62	19	18	<i>Silty Clay</i> (Lempung berdebu)
Kebun 2	30	49	19	<i>Clay</i> (Lempung)
Kebun 3	4,6	9,5	85	<i>Sand</i> (Pasir)
Kebun 4	35	49	15	<i>Clay loam</i> (Lempung bergeluh)
Kebun 5	7,6	8,4	83	<i>Loamy Sand</i> (Pasir)
Kebun 6	61	19	19	<i>Silty Clay</i> (Lempung berdebu)
Kebun 7	60	21	17	<i>Silty Clay</i> (Lempung berdebu)
Kebun 8	53	11	35	<i>Sand Clay</i> (Pasir berlempung)
Pemukiman	30	23	45	<i>Clay</i> (Lempung)

*) *USDA Soil Texture Triangle*

Variasi tekstur tanah pada lokasi penelitian menunjukkan pengaruh kuat dari bahan induk ultramafik yang kaya mineral Fe-Mg serta adanya campuran material hasil aktivitas tambang. Lokasi seperti Kebun 1, 6, dan 7 didominasi oleh tekstur silty loam, yang memiliki proporsi debu tinggi ($\geq 60\%$) dan lempung rendah. Tanah bertekstur debu memiliki kemampuan mengikat ion logam lebih rendah dibandingkan tanah berlempung, sehingga logam berat seperti Ni dan Cr cenderung lebih mudah bergerak dan tersedia bagi tanaman. Hal ini sejalan dengan kecenderungan bahwa fraksi liat dan bahan organik yang rendah mengurangi kapasitas tanah menahan kation logam berat (Alloway, 2013). Dengan demikian, tingginya kandungan Ni dan Cr yang tampak pada lokasi-lokasi bertekstur silty loam kemungkinan dipengaruhi oleh rendahnya fraksi liat yang berperan sebagai

adsorben utama. Reaksi tanah yang cenderung netral hingga masam juga memengaruhi perilaku logam, karena pada pH rendah sebagian Cr dan Ni menjadi lebih larut dan tetap tersedia meskipun tertahan oleh fraksi lempung (Kabata-Pendias, 2011). Hal ini menjelaskan mengapa tanah Clay seperti di Kebun 2 dan Kebun 4 tetap menunjukkan kandungan logam sangat tinggi. Sebaliknya, lokasi bertekstur Sand dan Loamy Sand (Kebun 3 dan 5) memiliki daya ikat logam rendah, namun total logam tetap besar akibat pengaruh mineralogi ultrabasa yang memang kaya Ni dan Cr, sehingga tekstur bukan satu-satunya pengendali utama.

Pada lokasi Kebun 2 dan Kebun 4, tekstur clay loam menunjukkan fraksi lempung yang tinggi ($\pm 49\%$), sehingga tanah memiliki kapasitas jerapan yang lebih baik. Tanah bertekstur lebih halus umumnya memiliki KTK yang lebih tinggi, sehingga logam berat lebih banyak terikat dalam kompleks jerapan tanah dan menjadi kurang tersedia bagi tanaman (Kabata-Pendias, 2011). Hal ini dapat menjelaskan mengapa pada beberapa titik clay loam, meskipun total logam dalam tanah tinggi akibat pelapukan ultrabasa, konsentrasi logam dalam akar dan buah cenderung lebih rendah dibandingkan lokasi bertekstur sandy atau silty—karena sebagian besar logam berat terfiksasi pada permukaan lempung.

Sementara itu, Kebun 3 dan Kebun 5 didominasi oleh tekstur sand dan loamy sand, dengan kandungan pasir lebih dari 80%. Tanah berpasir memiliki porositas besar, permeabilitas tinggi, dan kemampuan menahan air serta kation logam yang rendah. Kondisi ini menyebabkan logam berat lebih mudah bergerak secara vertikal maupun horizontal sehingga berpotensi meningkatkan

bioavailabilitas logam terhadap tanaman, terutama Ni yang merupakan elemen mobil pada tanah ber-pH agak masam (Reeves et al., 2018). Fakta bahwa konsentrasi Ni dan Cr dalam akar atau buah lebih tinggi pada lokasi berpasir selaras dengan prinsip bahwa tanah kasar lebih sedikit menahan logam sehingga tanaman lebih mudah menyerapnya.

Kebun 8 memperlihatkan tekstur sandy loam, yaitu campuran pasir tinggi (35%) dengan debu sedang dan lempung rendah. Tanah jenis ini cenderung memiliki kemampuan jerapan yang sedang, sehingga beberapa logam dapat tertahan, tetapi sebagian lainnya masih cukup mobil. Pada lokasi ini, kandungan logam dalam akar cenderung berada pada kategori menengah, mencerminkan kondisi fisik tanah yang tidak se-ekstrem pasir murni namun juga tidak se-stabil clay loam dalam mengikat logam (Brady & Weil, 2017). Tekstur ini biasanya sensitif terhadap perubahan pH tanah; pada pH rendah, logam lebih mudah terlepas dari koloid tanah dan diserap tanaman.

Sedangkan pada lokasi pemukiman, tekstur loam menunjukkan komposisi yang seimbang antara pasir, debu, dan lempung. Loam memiliki kemampuan menahan air dan unsur hara yang baik, termasuk logam berat. Pada titik kontrol dan pemukiman yang jauh dari area tambang, tekstur loam membantu mengurangi mobilitas logam sehingga kandungan logam total maupun logam dalam jaringan tanaman jauh lebih rendah dibandingkan kebun dekat tambang. Hal ini konsisten dengan konsep bahwa tanah yang kaya lempung dan bahan organik memiliki kapasitas penyangga lebih baik terhadap logam berat (Adriano, 2001).

Dari keseluruhan lokasi, hubungan tekstur dengan ketersediaan logam berat sangat terlihat:

- Tekstur kasar (sand, loamy sand) → logam lebih mudah bergerak → tanaman menyerap lebih banyak.
- Tekstur halus (clay loam) → logam lebih terikat → serapan tanaman lebih rendah.
- Tekstur menengah (silty loam, loam) → respon moderat, sangat dipengaruhi pH & KTK.

Fakta ini mendukung hasil penelitian bahwa tanah ultrabasa yang telah mengalami pelapukan lanjut, terutama di daerah dengan aktivitas tambang, memperlihatkan mobilitas unsur Ni dan Cr yang lebih tinggi pada tanah bertekstur kasar dan ber-pH rendah. Sebaliknya, tanah dengan fraksi liat tinggi mampu menghambat pergerakan logam berat sehingga mengurangi akumulasi pada akar dan buah tanaman pisang mas (*Musa acuminata*).

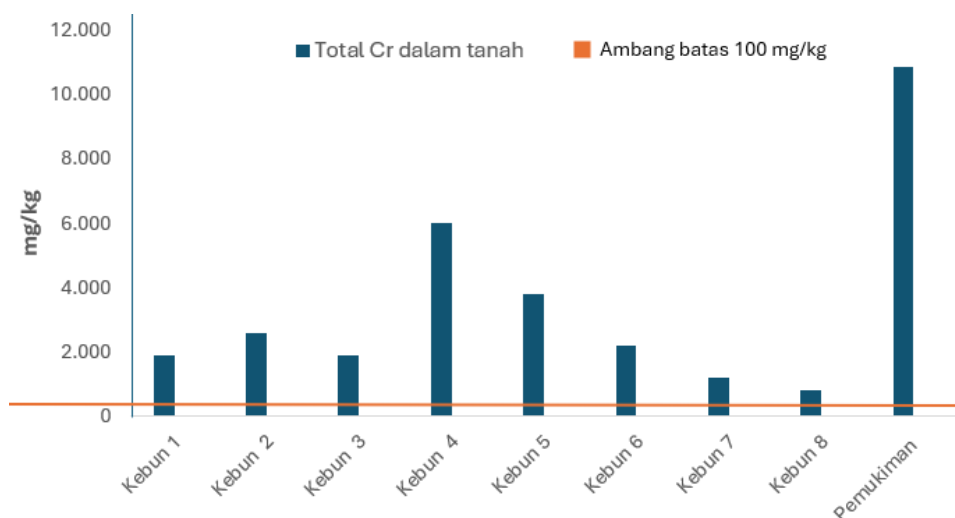
B. Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah

Analisis logam berat total menunjukkan variasi kadar Cr antara 800–10.900 mg/kg, Ni antara 800–14.400 mg/kg, dan As 5–20 mg/kg. Konsentrasi logam tertinggi ditemukan pada kebun 4 (dekat tambang), sedangkan terendah pada kebun 8. Lokasi pemukiman menunjukkan kadar Cr dan Ni sangat tinggi, diduga akibat faktor geogenik tanah ultrabasa yang memang kaya Ni dan Cr (Santoso, 2014). Jika

dibandingkan dengan standar WHO/FAO (2008) dan PP No. 22 Tahun 2021, sebagian lokasi penelitian telah melebihi ambang batas, khususnya untuk Ni (>75 mg/kg) dan Cr (>100 mg/kg). Kondisi ini menunjukkan adanya risiko kontaminasi yang signifikan terhadap lahan pertanian.

1. Total logam berat kromium (Cr) dalam tanah

Grafik pada Gambar 5.1 menunjukkan bahwa kadar Cr (Kromium) total di seluruh titik sampel tanah berada jauh di atas standar ambang batas Cr = 100 mg/kg (Dutch Soil Quality Standards).



Gambar 5.1 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam tanah

Kebun 1 sampai dengan kebun 8 memiliki total kadar Cr dalam tanah 800–6.000 mg/kg. Lokasi pemukiman justru paling tinggi dengan nilai 10.900 mg/kg, hal ini menandakan adanya kontaminasi Cr yang signifikan baik di lokasi penelitian maupun di lokasi pemukiman. Tingginya Cr di pemukiman kemungkinan besar menunjukkan sumber geogenik dari batuan ultramafik/laterit, bukan semata pengaruh aktivitas tambang.

Menurut ATSDR (2012), konsentrasi Cr dalam tanah alami berkisar 37 mg/kg, jauh lebih rendah dibandingkan hasil penelitian ini. Morrison *et al.* (2015) menemukan Cr pada tanah serpentinit/ultramafik bisa mencapai 1.700–10.000 mg/kg, sehingga nilai 10.900 mg/kg pada pemukiman masih sesuai dengan rentang tanah ultramafik. Fakta ini memperkuat dugaan bahwa kadar Cr yang tinggi di Kecamatan Maba lebih dominan dipengaruhi faktor geogenik.

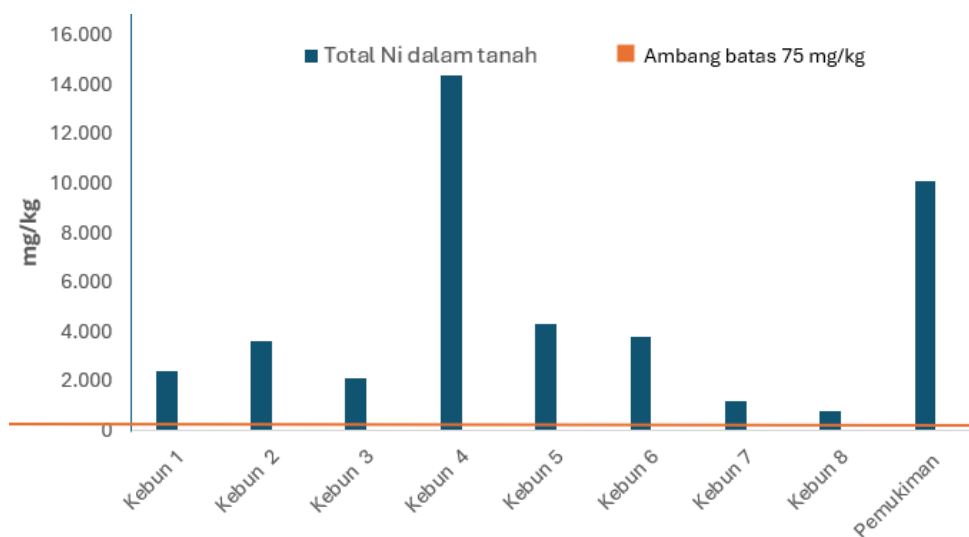
Wilayah Halmahera Timur, termasuk Kecamatan Maba, didominasi oleh batuan ultramafik dan tanah laterit. Kondisi ini secara alami menyebabkan akumulasi logam berat, terutama Ni, Cr, dan Co dalam konsentrasi tinggi (Lopez *et al.*, 2019). Penelitian van der Ent (2013) juga melaporkan bahwa tanah ultramafik di Sulawesi dan Halmahera memiliki kandungan logam berat ribuan mg/kg. Dengan demikian, tingginya Cr di lokasi penelitian konsisten dengan kondisi geologi setempat.

Dampak yang dapat terjadi akibat dari pencemaran kromium (Cr) dalam tanah adalah mengganggu pertumbuhan tanaman karena Cr dapat mengganggu penyerapan hara dan kesehatan masyarakat karena jika logam terakumulasi ke jaringan tanaman pangan dan tanaman dikonsumsi oleh manusia.

2. Total logam berat nikel (Ni) dalam tanah

Grafik pada Gambar 5.2 menyajikan hasil total logam berat Ni dalam tanah dan terlihat bahwa kadar Ni pada seluruh titik sampel (kebun 1 sampai 8 dan pemukiman) jauh melebihi standar ambang batas yang ditetapkan KLHK (75 mg/kg; PP No. 101 Tahun 2014). Misalnya, pada kebun 4 kadar Ni mencapai

14.400 mg/kg, atau hampir 192 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas. Bahkan pada titik terendah (8: 800 mg/kg), nilainya masih >10 kali lipat dibanding standar ambang batas. Hal ini mengindikasikan adanya akumulasi Ni yang signifikan di tanah sekitar areal penelitian.



Gambar 5.2 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam tanah

Menurut Alloway (2013), konsentrasi Ni di tanah normal biasanya berkisar 5–500 mg/kg, tergantung jenis batuan induk. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh pada lokasi penelitian tergolong sangat tinggi dan mengarah pada kondisi tercemar. Distribusi kadar Ni terlihat bervariasi antar lokasi. Kebun 4 (14.400 mg/kg) merupakan konsentrasi tertinggi, disusul oleh titik pemukiman (10.100 mg/kg).

Hal ini menarik, karena lokasi pemukiman (>5 km dari tambang) justru masih menunjukkan nilai tinggi, diduga akibat faktor geologi alami, di mana tanah di Halmahera Timur berasal dari batuan ultrabasa yang kaya Ni (Sudrajat *et al.*, 2020). Sementara itu, kebun 7 (1.200 mg/kg) dan 8 (800 mg/kg) menunjukkan

konsentrasi terendah, yang kemungkinan disebabkan variasi topografi, pencucian oleh aliran air, atau perbedaan vegetasi penutup lahan.

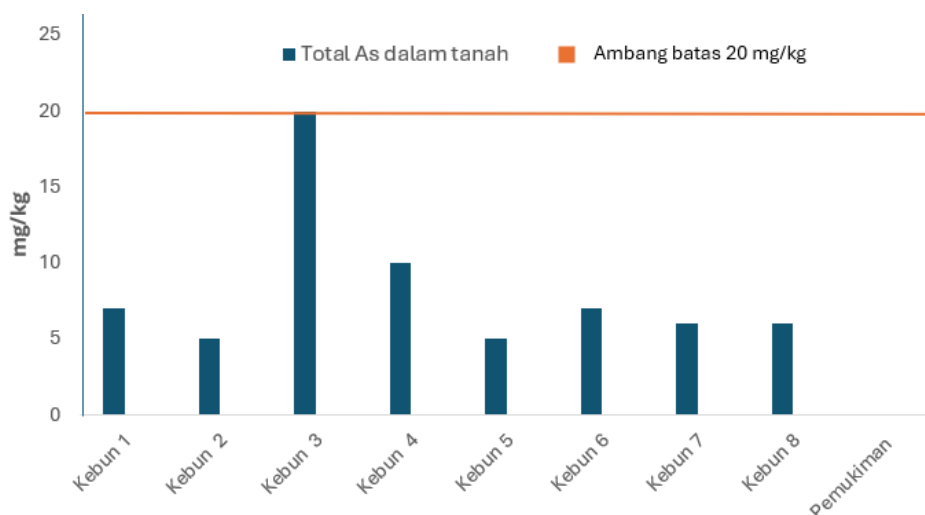
Kadar Ni yang tinggi dalam tanah berpotensi menimbulkan akumulasi dalam tanaman, terutama tanaman pangan seperti pisang yang diteliti di lokasi ini. Penelitian Handayanto & Hairiah (2007) menyatakan bahwa Ni dapat terakumulasi dalam jaringan akar dan buah, sehingga berisiko masuk ke rantai makanan. Menurut WHO/FAO (2007), batas maksimum Ni dalam tanaman pangan adalah 10 mg/kg, sehingga tanah dengan kadar Ni seperti yang terlihat pada grafik sangat berpotensi memicu kontaminasi biomagnifikasi.

Faktor penyebab tingginya kadar Ni di lokasi penelitian dapat terjadi karena secara geologi alami, adanya aktivitas pertambangan dan sifat dari jenis tanah. Secara geologi alami karena Halmahera dikenal sebagai wilayah dengan batuan ultramafik/ultrabasa, yang merupakan sumber utama Ni (Hakim *et al.*, 2021). Aktivitas pertambangan pada proses penambangan, pengolahan bijih, dan pembuangan tailing dapat mempercepat pelepasan Ni ke lingkungan sekitar (Sutrisno *et al.*, 2019). Berdasarkan sifat tanah, jenis tanah yang bertekstur lempung dan bereaksi asam–netral lebih mudah mengikat logam berat. Pada lokasi penelitian, variasi pH dan KTK kemungkinan berperan dalam perbedaan distribusi Ni antar titik.

3. Total logam berat arsenik (As) dalam tanah

Grafik pada Gambar 5.3 menunjukkan perbandingan kadar Arsenik (As) dalam tanah di berbagai titik sampel (kebun 1-8) dan satu titik pemukiman dengan

nilai ambang batas arsenik (20 mg/kg) sesuai Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup.



Gambar 5.3 Total kadar logam berat arsenik (As) dalam tanah

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa kadar As di seluruh lokasi kebun berada jauh di bawah ambang batas 20 mg/kg, dengan nilai berkisar antara 5–10 mg/kg, kecuali pada kebun 3 yang mencapai 20 mg/kg (sama dengan ambang batas). Titik pemukiman menunjukkan kadar As 0 mg/kg, yang menandakan bahwa daerah yang lebih jauh dari aktivitas tambang tidak terpengaruh oleh pencemaran arsenik.

Kebun 1, 2, 5, 6, 7 dan 8 memiliki kadar As antara 5–7 mg/kg, masih tergolong rendah. Kebun 4 sedikit lebih tinggi (10 mg/kg), tetapi tetap aman di bawah ambang batas. Kebun 3 menampilkan konsentrasi tertinggi (20 mg/kg), sama dengan ambang batas kualitas tanah untuk arsenik. Hal ini mengindikasikan adanya potensi akumulasi logam berat di area tersebut yang mungkin dipengaruhi oleh jarak lebih dekat ke aktivitas tambang nikel.

Lokasi penelitian yang lebih dekat dengan area pertambangan (terutama kebun 3 dan 4) menunjukkan kadar As yang relatif lebih tinggi dibanding kebun lainnya. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian Sulastri *et al.* (2019) yang menyebutkan bahwa tanah di sekitar area tambang nikel di Sulawesi Tenggara cenderung memiliki akumulasi arsenik dan logam berat lain akibat proses pelapukan mineral sulfida dan aktivitas penambangan.

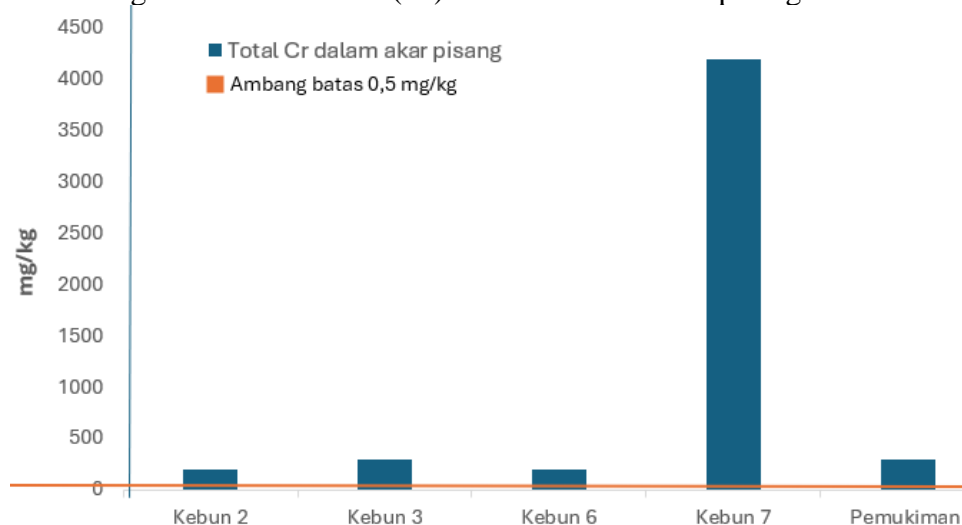
Selain itu, Rahman *et al.* (2021) juga menjelaskan bahwa arsenik dapat terakumulasi dalam tanah akibat deposisi debu tambang dan limpasan air yang membawa partikel logam berat ke lahan di sekitarnya. Hal ini mendukung data penelitian bahwa titik terdekat dengan tambang memperlihatkan kecenderungan kadar As yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik pemukiman.

Walaupun sebagian besar kebun masih berada di bawah ambang batas, kebun 3 yang mencapai nilai maksimum baku mutu (20 mg/kg) perlu diwaspadai. Konsentrasi arsenik pada level tersebut, jika terus meningkat akibat aktivitas tambang yang berkelanjutan, dapat berdampak pada penurunan kualitas tanah dan berpotensi masuk ke dalam jaringan tanaman (misalnya akar dan buah pisang yang diteliti di lokasi penelitian ini). Menurut WHO/FAO (2001), akumulasi arsenik dalam tanaman pangan dapat menimbulkan risiko kesehatan, termasuk karsinogenik jika dikonsumsi jangka panjang.

C. Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanaman Pisang Mas

Hasil analisis kandungan cemaran logam berat dalam tanaman pada lahan perkebunan masyarakat menunjukkan adanya hasil yang melebihi dari standar baku mutu yang telah ditetapkan.

a. Total logam berat kromium (Cr) dalam akar tanaman pisang mas



Gambar 5.4 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam akar pisang

Grafik pada Gambar 5.4 menunjukkan konsentrasi Cr pada kebun 2 dan 6 ini berada pada level yang sama, yakni 200 mg/kg, atau sekitar 400 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas aman. Hal ini menunjukkan adanya akumulasi Cr yang signifikan meskipun relatif lebih rendah dibanding titik lainnya. Menurut Kabata-Pendias (2011), Cr mudah terikat di akar karena afinitasnya terhadap dinding sel tanaman, sehingga lebih banyak terakumulasi pada jaringan bawah tanah dibanding jaringan atas.

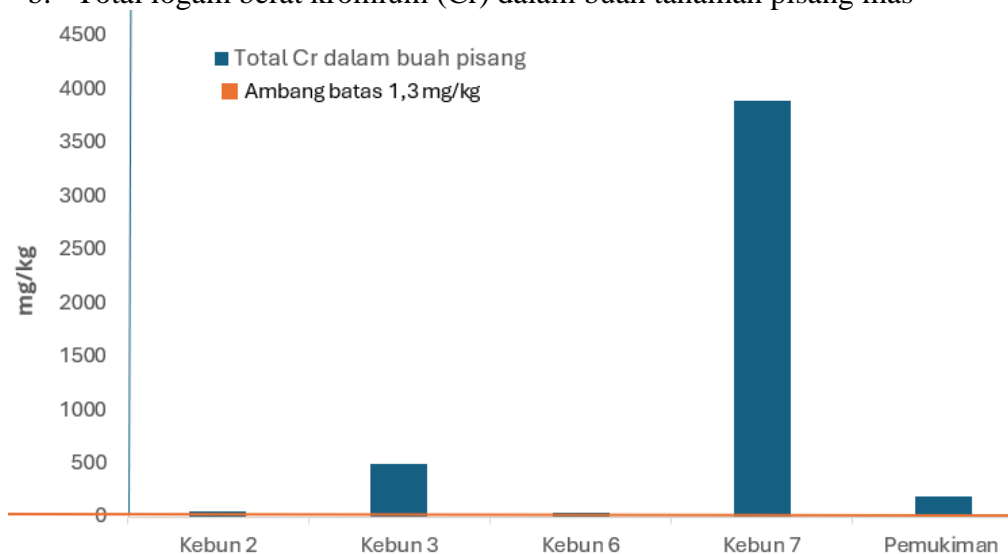
Kebun 3 dan pemukiman memperlihatkan nilai Cr yang sama yaitu 300 mg/kg. Menariknya, lokasi pemukiman yang seharusnya berada jauh dari

pengaruh tambang justru menunjukkan kandungan Cr tinggi. Hal ini dapat disebabkan oleh faktor geogenik, karena tanah di Halmahera Timur diketahui mengandung batuan ultrabasa yang kaya unsur nikel, kromium, dan logam berat lainnya (Sembiring *et al.*, 2020). Dengan demikian, kontaminasi Cr tidak hanya berasal dari aktivitas antropogenik, melainkan juga dari kondisi geologi setempat.

Kebun 7 menunjukkan nilai ekstrem dengan kadar Cr mencapai 4.200 mg/kg, yaitu 8.400 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas. Angka ini menegaskan bahwa titik ini berada dalam zona paparan paling tinggi terhadap pencemaran tambang. Penelitian serupa oleh Rahman *et al.* (2019) menjelaskan bahwa akar tanaman yang tumbuh di tanah terkontaminasi logam berat dapat menyerap dan menyimpan Cr dalam jumlah sangat besar, sehingga berisiko menurunkan kualitas hasil panen dan meningkatkan potensi toksisitas terhadap manusia maupun hewan yang mengonsumsinya.

Akumulasi logam di akar lebih tinggi dibanding bagian lain tanaman. Akar merupakan organ utama akumulasi Cr karena proses adsorpsi logam pada rizosfer. Menurut Alloway (2013) Cr (III) relatif kurang mobil, sehingga cenderung tertahan di akar. Konsentrasi Cr yang tinggi dapat menghambat pertumbuhan akar, mengganggu penyerapan hara, dan menurunkan fotosintesis (Shanker *et al.*, 2005). WHO (2001) menegaskan bahwa akumulasi Cr pada jaringan tanaman pangan berpotensi membahayakan konsumen karena Cr dalam bentuk heksavalen bersifat karsinogenik.

b. Total logam berat kromium (Cr) dalam buah tanaman pisang mas



Gambar 5.5 Total kadar logam berat kromium (Cr) dalam buah pisang

Grafik pada Gambar 5.5 menunjukkan kebun 2 dan 6 menunjukkan kadar Cr yang relatif lebih rendah dibanding kebun lain, namun tetap 40–46 kali lebih tinggi dari ambang batas aman. Hal ini membuktikan bahwa meskipun kadar Cr dalam buah lebih rendah dibanding akar (200 mg/kg pada akar vs 50–60 mg/kg pada buah), masih terdapat risiko akumulasi logam berat pada jaringan yang dikonsumsi manusia.

Kebun 3 memiliki kadar Cr dalam buah mencapai 570 mg/kg, atau sekitar 438 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas. Konsentrasi yang tinggi ini sejalan dengan kadar Cr pada akar (300 mg/kg), menunjukkan adanya mekanisme translokasi Cr dari akar menuju buah. Menurut Rahman *et al.* (2019), meskipun sebagian besar Cr terakumulasi di akar, sebagian dapat ditranslokasikan ke jaringan atas (buah dan daun) melalui xilem.

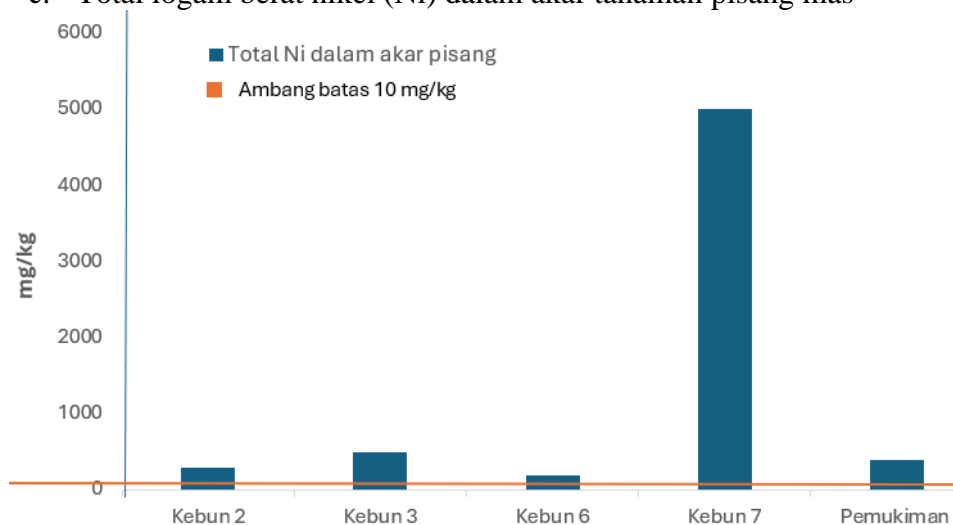
Kebun 7 menunjukkan nilai paling ekstrem dengan kadar Cr sebesar 3.900 mg/kg, atau sekitar 3.000 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas. Jika

dibandingkan dengan jaringan akar pada kebun yang sama (4.200 mg/kg), terlihat bahwa Cr dalam buah hampir setara dengan akar, menandakan tingkat pencemaran yang sangat tinggi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa kebun 7, yang berdekatan dengan aktivitas tambang, menjadi area paling rentan terhadap kontaminasi logam berat.

Pada pemukiman, kadar Cr dalam buah mencapai 190 mg/kg, atau 146 kali lipat lebih tinggi dari ambang batas. Fenomena ini sama dengan pola pada akar (300 mg/kg), yang kemungkinan besar dipengaruhi oleh kondisi geogenik tanah di Halmahera Timur yang kaya batuan ultrabasa, meskipun jauh dari area tambang (Sembiring *et al.*, 2020).

Secara umum, kadar Cr dalam akar lebih tinggi dibanding buah, sesuai dengan teori bahwa akar merupakan organ utama akumulasi logam berat (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013). Misalnya, di kebun 2 = 200 mg/kg sedangkan buah = 60 mg/kg. Pada kebun 7 kadar Cr dalam buah (3.900 mg/kg) hampir setara dengan akar (4.200 mg/kg). Hal ini menunjukkan adanya mekanisme translokasi yang kuat pada kondisi pencemaran ekstrem. Baik pada akar maupun buah, lokasi kontrol tetap menunjukkan kadar Cr jauh di atas ambang batas, memperkuat dugaan bahwa faktor geologi turut berperan selain aktivitas tambang.

c. Total logam berat nikel (Ni) dalam akar tanaman pisang mas



Gambar 5.6 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam akar pisang

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.6, kadar total nikel (Ni) pada jaringan akar pisang di lokasi penelitian menunjukkan variasi yang signifikan antar titik sampel. Nilai kadar Ni terendah terdapat pada kebun 6 yaitu 200 mg/kg, sedangkan kadar tertinggi ditemukan pada kebun 7 sebesar 5.000 mg/kg. Untuk lokasi kebun lain, kadar Ni di kebun 2 mencapai 300 mg/kg, kebun 3 sebesar 500 mg/kg, dan pada pemukiman (lokasi >5 km dari tambang) sebesar 400 mg/kg. Jika dibandingkan dengan ambang batas Ni dalam jaringan akar tanaman yang hanya sekitar 10 mg/kg (FAO/WHO, 2001; Kabata-Pendias, 2011), seluruh titik penelitian memperlihatkan nilai yang jauh melampaui ambang batas aman.

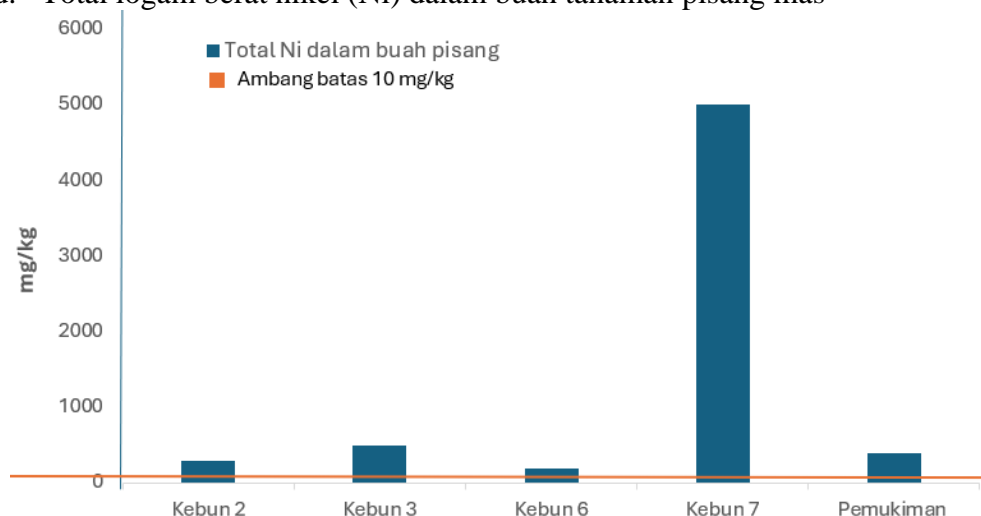
Kadar Ni tertinggi (5.000 mg/kg di kebun 7) mengindikasikan adanya akumulasi logam berat yang kuat di area perkebunan yang lebih dekat dengan aktivitas pertambangan nikel. Hal ini sejalan dengan temuan Siahaan *et al.* (2020) yang menunjukkan bahwa jarak lahan kebun dari tambang memengaruhi konsentrasi logam berat dalam jaringan tanaman pisang.

Meskipun berfungsi sebagai lokasi pembanding, titik pemukiman tetap menunjukkan kadar Ni sebesar 400 mg/kg, jauh di atas ambang batas. Kondisi ini menunjukkan bahwa pencemaran Ni tidak hanya terbatas di sekitar lokasi tambang, namun dapat menyebar melalui aliran air tanah, debu tambang, maupun deposisi atmosfer (Alloway, 2013).

Tanaman pisang cenderung mengakumulasi logam berat, terutama di bagian akar dibandingkan dengan jaringan lainnya. Haryati & Sari (2019) menyebutkan bahwa akar memiliki kemampuan mengikat ion logam melalui interaksi dengan eksudat akar dan koloid tanah. Hal ini dapat menjelaskan tingginya konsentrasi Ni di jaringan akar.

Akumulasi Ni pada akar dalam jumlah tinggi berpotensi memengaruhi fisiologi tanaman, termasuk penurunan fotosintesis, penghambatan pertumbuhan, dan gangguan metabolisme (Yusuf *et al.*, 2011). Dari sisi kesehatan manusia, meskipun akar pisang jarang dikonsumsi langsung, akumulasi tinggi ini tetap berisiko karena logam dapat ditranslokasikan ke jaringan buah yang menjadi konsumsi masyarakat. Konsumsi Ni berlebih dapat menyebabkan alergi kulit, gangguan pernapasan, hingga bersifat karsinogenik (ATSDR, 2005).

d. Total logam berat nikel (Ni) dalam buah tanaman pisang mas



Gambar 5.7 Total kadar logam berat nikel (Ni) dalam buah pisang

Berdasarkan grafik pada Gambar 5.7 kadar nikel (Ni) dalam jaringan buah pisang pada lokasi penelitian bervariasi antara 50 mg/kg hingga 3800 mg/kg, jauh melampaui baku mutu Ni dalam buah sebesar 10 mg/kg (FAO/WHO, 2001; Kabata-Pendias, 2011).

Kebun 2: 60 mg/kg, lokasi 3: 700 mg/kg, kebun 6: 50 mg/kg, kebun 7: 3.800 mg/kg, pemukiman: 100 mg/kg. Nilai tertinggi akar (5.000 mg/kg di kebun 7) masih lebih besar daripada nilai tertinggi buah (3.800 mg/kg di kebun 7). Pola distribusi menunjukkan bahwa kadar Ni dalam buah mengikuti tren yang sama dengan akar, yaitu semakin dekat dengan area tambang maka konsentrasi semakin tinggi. Pada titik pemukiman kadar Ni dalam buah (100 mg/kg) lebih rendah daripada kadar Ni dalam akar (400 mg/kg), menunjukkan adanya mekanisme fisiologis tanaman yang lebih menahan logam di akar ketimbang ditranslokasikan ke buah (Yusuf *et al.*, 2011).

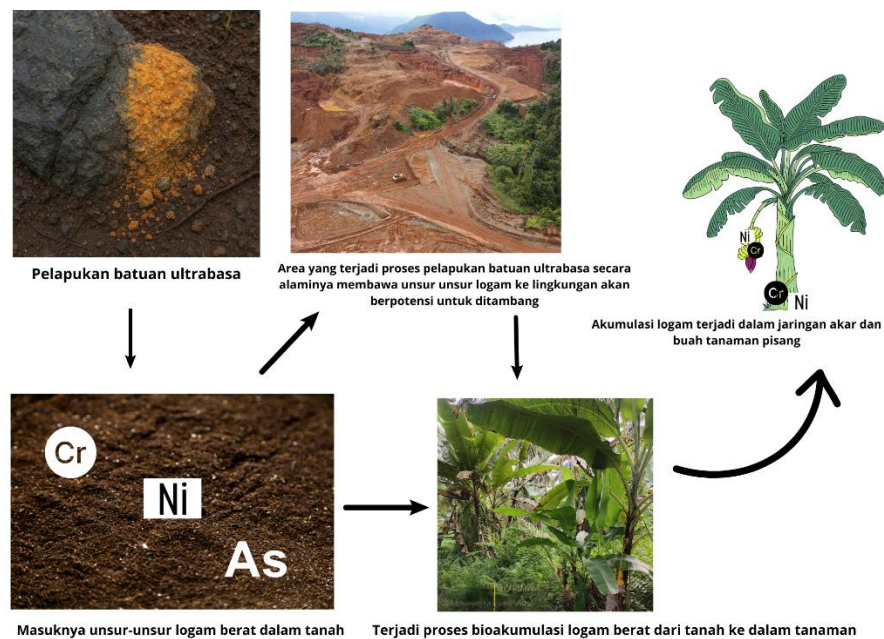
Buah pisang sebagai organ yang dikonsumsi manusia menunjukkan kadar Ni sangat tinggi dibandingkan ambang batas aman (10 mg/kg). Kandungan hingga 3.800 mg/kg (kebun 7) dapat menimbulkan risiko kesehatan serius bagi masyarakat sekitar. Menurut ATSDR (2005), konsumsi Ni berlebih dapat menyebabkan alergi, gangguan pernapasan, gangguan ginjal, bahkan bersifat karsinogenik.

Akar berfungsi sebagai penyaring awal logam, namun sebagian Ni tetap ditranslokasikan ke jaringan buah melalui mekanisme transportasi xilem (Haryati & Sari, 2019). Penelitian oleh Siahaan *et al.* (2020) di Halmahera juga menemukan fenomena serupa, di mana konsentrasi logam pada akar lebih tinggi dibanding buah, tetapi keduanya tetap jauh di atas ambang batas.

Fakta bahwa lokasi pemukiman memiliki kadar Ni 100 mg/kg (buah) dan 400 mg/kg (akar) menunjukkan bahwa kontaminasi logam berat telah meluas, kemungkinan melalui deposisi debu tambang, limpasan air hujan, dan pergerakan air tanah (Alloway, 2013).

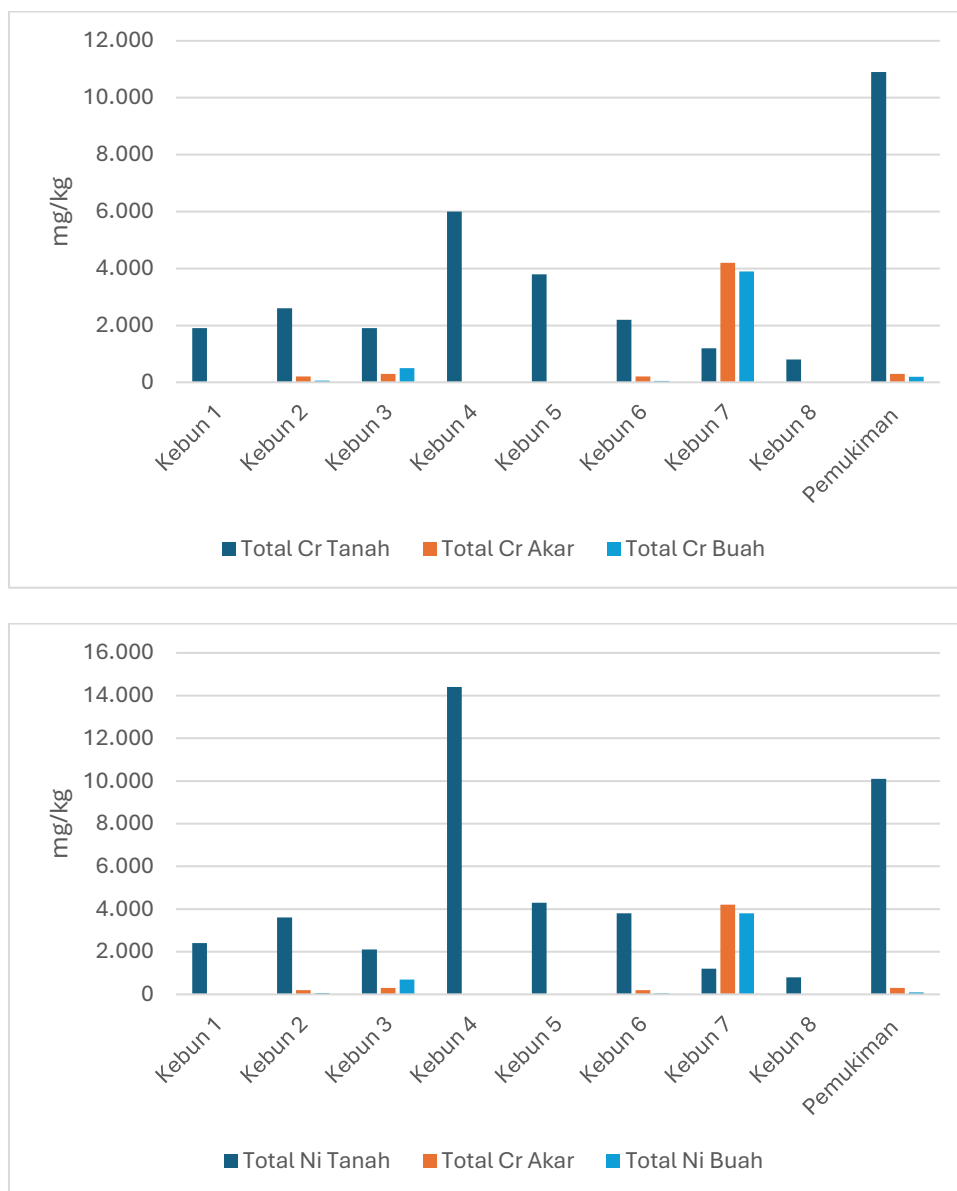
D. Rasio Logam Berat Karsinogenik Dalam Tanah, Akar dan Buah Tanaman Pisang

Gambar 5.8 merupakan proses masuknya unsur-unsur logam berat di lingkungan yang dapat terjadi cara alami dan adanya aktivitas pertambangan dapat meningkatkan jumlah dari logam menjadi meningkat.



Gambar 5.8 Proses masuknya unsur-unsur logam berat di lingkungan

Sumber logam berat seperti kromium (Cr), nikel (Ni), dan arsenik (As) berasal pelapukan batuan ultrabasa tetapi masih dalam kadar ambang batas yang aman. Kadar logam yang sudah berada di lingkungan dapat meningkat jika terjadi aktivitas-aktivitas lainnya seperti adanya aktivitas pertambangan. Kedua proses ini memperkaya tanah dengan unsur-unsur logam berat. Perbandingan masing-masing unsur logam berat dalam tanah, akar dan buah disajikan pada Gambar 5.9



Gambar 5.9 Total logam berat karsinogenik (Cr, Ni) dalam tanah, akar dan buah tanaman pisang mas

Dua grafik yang menampilkan sebaran Cr dan Ni pada tanah, akar, dan buah pisang menunjukkan pola umum yang konsisten di seluruh lokasi penelitian. Baik Cr maupun Ni memiliki konsentrasi tertinggi pada tanah, yang mencerminkan karakteristik alami tanah ultrabasa yang memang kaya logam berat, ditambah pengaruh aktivitas pertambangan di wilayah sekitar yang dapat meningkatkan

akumulasi logam pada lapisan permukaan tanah. Dibandingkan dengan tanah, kadar Cr dan Ni pada akar jauh lebih rendah, namun tetap lebih tinggi daripada buah. Hal ini menunjukkan bahwa akar bertindak sebagai organ utama yang menangkap dan menahan logam dari lingkungan, sementara buah hanya menerima sebagian kecil logam akibat proses translokasi internal tanaman yang sangat terbatas.

Meskipun demikian, kedua grafik memperlihatkan perbedaan menarik antar lokasi. Pada Cr maupun Ni, Kebun 4 dan titik Pemukiman menampilkan kadar logam tanah tertinggi, tetapi tingginya nilai tersebut tidak selalu menghasilkan akumulasi yang besar pada akar atau buah. Fenomena ini menguatkan bahwa kadar total logam dalam tanah bukan satu-satunya penentu besarnya serapan tanaman, karena ketersediaan logam (bioavailabilitas) sangat dipengaruhi oleh sifat kimia tanah seperti pH, C-organik, tekstur, dan KTK. Sebaliknya, Kebun 7 menjadi lokasi paling menonjol karena pada titik tersebut baik Cr maupun Ni pada akar meningkat drastis, dan bahkan kadar pada buah juga ikut naik. Lonjakan ini menunjukkan bahwa kondisi tanah pada lokasi tersebut membuat Cr dan Ni lebih mudah terlarut dan tersedia bagi tanaman, sehingga penyerapan menjadi lebih tinggi dibandingkan lokasi lain yang memiliki nilai tanah besar tetapi bioavailabilitas rendah.

Secara keseluruhan, pola hubungan antara tanah, akar, dan buah untuk Cr dan Ni menunjukkan urutan yang sama, yaitu tanah > akar > buah. Namun intensitas perpindahannya berbeda-beda tiap lokasi, tergantung faktor lingkungan dan karakteristik tanah setempat. Kebun 7 menjadi titik yang paling kritis karena memperlihatkan tingginya serapan logam sampai ke buah, sedangkan lokasi seperti Kebun 4 dan Pemukiman meskipun memiliki logam tanah sangat tinggi, tidak

menghasilkan penyerapan sebesar itu pada jaringan tanaman. Temuan ini menunjukkan bahwa risiko bioakumulasi tidak hanya ditentukan oleh besarnya logam total di tanah, tetapi lebih bergantung pada seberapa mudah logam tersebut tersedia dan diserap oleh tanaman.

Secara ilmiah, penyebab utama fenomena ini berasal dari kondisi tanah yang meningkatkan *bioavailability* logam. pH tanah yang agak masam dapat mempercepat pelarutan Cr dan Ni, membuatnya lebih bebas dalam larutan tanah sehingga mudah diserap tanaman. Kandungan C-organik tertentu juga mampu membentuk kompleks terlarut dengan logam, yang justru meningkatkan pergerakan ion logam menuju akar. Tekstur tanah yang lebih berpasir atau berdebu dapat memperkecil kemampuan tanah mengikat logam, sehingga lebih banyak berada dalam bentuk ion bebas. Kombinasi faktor-faktor inilah yang diduga kuat menjadi penyebab unik mengapa Kebun 7 memiliki tingkat akumulasi logam paling tinggi dalam seluruh jaringan tanaman.

Unsur logam yang terbawa dari batuan atau hasil eksploitasi tambang kemudian terlepas ke dalam tanah. Konsentrasi logam dalam tanah dapat meningkat jauh melebihi ambang batas normal, sehingga mengubah sifat kimia tanah. Tanaman yang tumbuh di atas tanah terkontaminasi, seperti pisang, akan menyerap unsur logam berat tersebut melalui akar. Proses ini disebut bioakumulasi, yaitu penyerapan dan penumpukan logam berat dari tanah ke dalam jaringan tanaman.

Logam berat yang masuk melalui akar tidak hanya tertahan di akar, tetapi juga dapat ditranslokasikan ke jaringan lain seperti pada buah pisang. Hal ini

menyebabkan kontaminasi langsung pada bagian yang dikonsumsi manusia, sehingga menimbulkan risiko kesehatan.

Hasil grafik Cr dan Ni menunjukkan bahwa Kebun 7 memiliki akumulasi logam yang paling tinggi pada akar dan buah, meskipun kadar total logam dalam tanah tidak setinggi lokasi lain. Kondisi ini menandakan bahwa logam di Kebun 7 berada dalam bentuk yang lebih tersedia (bioavailable) bagi tanaman. Pada tanah ultrabasa, sedikit penurunan pH dapat meningkatkan kelarutan Cr dan Ni sehingga lebih mudah diserap akar (Kabata-Pendias, 2011). Jika pH Kebun 7 lebih masam dibanding titik lainnya, maka mobilitas logam semakin tinggi (Alloway, 2013).

Parameter tanah lain seperti C-organik, KTK, dan kejenuhan basa juga berpengaruh. Kandungan C-organik yang lebih tinggi dapat membentuk kompleks organik-logam yang bersifat larut, sehingga memperbesar fraksi logam yang dapat diserap tanaman (Becquer et al., 2010). Selain itu, tingginya KTK pada tanah ultrabasa yang kaya Mg dan Ca dapat menyebabkan pertukaran kation yang lebih aktif, mendorong pelepasan Ni dan Cr ke larutan tanah (Reeves et al., 2018). Kondisi ini diperkuat oleh tekstur tanah yang lebih halus, sehingga logam lebih mudah terakumulasi di zona perakaran dan meningkatkan intensitas kontak akar-logam.

Tingginya Cr dan Ni pada akar kemudian diikuti oleh translokasi logam yang efisien menuju buah. Ni merupakan unsur yang sangat mobile dalam jaringan tanaman, sehingga ketika akumulasi pada akar meningkat, perpindahannya ke buah juga meningkat secara signifikan (Reeves & Baker, 2000). Pada kondisi stres logam, tanaman dapat meningkatkan aktivitas transporter logam seperti ZIP dan

NRAMP yang memperkuat proses ini (Shanker et al., 2005). Untuk Cr, keberadaan fraksi Cr(VI) yang lebih mobile dibanding Cr(III) juga memungkinkan perpindahan menuju buah terjadi lebih besar.

Fenomena ini kemungkinan dipengaruhi pula oleh faktor eksternal seperti paparan debu tambang atau sedimen limpasan, yang dapat memperkaya logam pada permukaan tanah. Kombinasi faktor kimia tanah, fisik tanah, bioavailabilitas logam, dan respons fisiologis tanaman inilah yang menjadikan Kebun 7 sebagai hotspot bioakumulasi, sehingga kandungan logam pada tanaman di lokasi ini jauh lebih tinggi dibandingkan titik lainnya meskipun kadar tanah tidak dominan.

Untuk mengetahui kadar logam berat karsinogenik dalam tanaman didekati dengan penentuan rasio logam berat dalam tanaman:

1. Rasio logam berat dalam tanah dan akar tanaman pisang mas

Rasio logam berat Cr, Ni, dan As dalam tanah dan akar tanaman pisang mas disajikan pada Tabel 5.3

Tabel 5.3 Rasio logam berat Cr, Ni, dan As dalam tanah dan akar tanaman pisang mas

Lokasi	Total logam dalam tanah (T) (mg/kg)			Total logam dalam akar (A) (mg/kg)			Rasio (A/T)		
	Cr	Ni	As	Cr	Ni	As	Cr	Ni	As
Kebun 1	1.900	2.400	7	-	-	-	0,00	0,00	0,00
Kebun 2	2.600	3.600	5	200	300	-	0,10	0,12	0,00
Kebun 3	1.900	2.100	20	300	500	-	0,15	0,23	0,00
Kebun 4	6.000	14.400	10	-	-	-	0,00	0,00	0,00
Kebun 5	3.800	4.300	5	-	-	-	0,00	0,00	0,00
Kebun 6	2.200	3.800	7	200	200	-	0,05	0,04	0,00
Kebun 7	1.200	1.200	6	4.200	5.000	-	3,50	4,16	0,00
Kebun 8	800	800	6	-	-	-	0,00	0,00	0,00
Pemukiman	10.900	10.100	-	300	400	-	0,27	0,03	0,00

Rasio A/T memberikan gambaran seberapa besar kemampuan akar dalam menyerap logam dibandingkan konsentrasinya di tanah. Kebun 7 menunjukkan nilai rasio tertinggi, yaitu Cr 3,50 dan Ni 4,16, menandakan bahwa akar mampu mengakumulasi logam lebih dari 3–4 kali lipat dari konsentrasi tanah. Kondisi ini berbahaya jika translokasi ke bagian buah terjadi, karena dapat masuk ke rantai makanan manusia. Sebaliknya, kebun 2, 3 dan 6 menunjukkan rasio rendah ($<0,23$), artinya logam yang ada di tanah hanya sedikit terserap akar, dan di permukaan menunjukkan rasio 0,27.

Pada kebun 7 menunjukan hasil kadar logam dalam akar lebih tinggi dibandingkan dalam tanah, hal ini dapat terjadi saat tanah memiliki pH agak masam hingga netral serta kandungan bahan organik dan kapasitas tukar kation (KTK) yang tinggi. Kondisi seperti ini dapat meningkatkan mobilitas ion logam berat seperti Ni dan Cr, sehingga logam lebih mudah diserap oleh akar. Selain itu, akar tanaman pisang di lokasi ini mungkin memiliki sistem perakaran yang lebih aktif, dengan luas permukaan akar dan aktivitas enzimatis lebih besar, yang mempercepat proses penyerapan logam dari larutan tanah.

Kemungkinan yang kedua penyebab tingginya kandungan logam dalam akar dibandingkan tanah juga bisa disebabkan oleh mekanisme penyerapan biologis (bioadsorpsi), di mana dinding sel akar mengikat logam berat secara kuat melalui gugus karboksil, hidroksil, dan sulfhidril. Proses ini berfungsi sebagai sistem pertahanan tanaman untuk mencegah logam berpindah ke bagian atas (buah), sehingga logam tertahan dalam jaringan akar. Dengan demikian, kebun 7 menunjukkan kemampuan bioakumulasi tertinggi yang menandakan adanya

tekanan lingkungan tinggi akibat kandungan logam berat di tanah yang mudah tersedia, sekaligus menunjukkan respons adaptif tanaman pisang dalam mengisolasi logam berlebih di akar untuk mengurangi dampak toksik pada bagian yang lebih vital seperti buah.

Arsenik dalam tanah umumnya terdapat dalam dua bentuk utama, yaitu arsenat (As^{5+}) dan arsenit (As^{3+}). Tanaman lebih mudah menyerap arsenit yang larut dalam kondisi tanah reduktif (anaerob), misalnya pada sawah tergenang. Namun, di tanah kering seperti lahan pisang, arsenik cenderung hadir sebagai arsenat yang terikat kuat pada mineral oksida besi (Fe) dan aluminium (Al), sehingga bioavailabilitasnya rendah (Meharg & Hartley-Whitaker, 2002).

Meskipun kandungan arsenik (As) di tanah cukup tinggi, misalnya di kebun 3 mencapai 20 mg/kg, data menunjukkan bahwa akar pisang sama sekali tidak menyerap unsur ini (nilai akumulasi = 0). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui beberapa faktor:

- a. Pada tanah yang cenderung netral–basa, arsenat semakin kuat terikat pada kompleks tanah, sehingga sulit diserap akar tanaman. Kapasitas Tukar Kation (KTK) yang tinggi juga berkontribusi menahan arsenik dalam bentuk tidak larut (Kabata-Pendias, 2011). Hal ini dapat menjelaskan mengapa meskipun kandungan tanah cukup besar, arsenik tidak masuk ke jaringan akar pisang.
- b. Pisang mas bukanlah tanaman hiperakumulator arsenik. Sistem perakaran pisang mas lebih selektif menyerap unsur hara esensial (seperti P, K, Mg) dan relatif menolak arsenik karena adanya kemiripan kimia antara arsenat dengan fosfat. Penyerapan arsenat bisa terhambat oleh tingginya ketersediaan fosfat

di tanah, karena keduanya bersaing memanfaatkan transporter yang sama pada membran akar (Zhao *et al.*, 2010).

Studi di India menunjukkan bahwa tanaman pangan seperti padi dapat menyerap As tinggi di tanah tergenang, namun tanaman darat seperti pisang dan jagung umumnya tidak menyerap As secara signifikan, meski tanahnya terkontaminasi (Tripathi *et al.*, 2007). Hal ini konsisten dengan hasil penelitian, di mana kadar As pada akar pisang tetap nol di semua lokasi meskipun tanahnya mengandung 5–20 mg/kg.

Hasil ini menegaskan bahwa:

- a. Pisang di wilayah tambang memiliki potensi bahaya kontaminasi tinggi, terutama pada akar. Jika logam berpindah ke buah, risiko kesehatan masyarakat meningkat karena Cr dan Ni dikenal bersifat karsinogenik (Nordberg *et al.*, 2014).
- b. Variasi serapan antar lokasi menunjukkan peran penting sifat tanah dalam menentukan bioavailabilitas logam. Tanah dengan pH asam–netral umumnya membuat logam lebih mudah tersedia dibanding tanah basa.

Area pemukiman yang berjarak jauh dari tambang (± 10 km) ternyata masih menunjukkan kandungan tinggi (Cr 10.900 mg/kg; Ni 10.100 mg/kg). Hal ini menandakan pencemaran logam berat telah meluas hingga ke wilayah pemukiman, sejalan dengan temuan Wahyono *et al.* (2020) di Halmahera Timur.

2. Rasio logam berat dalam akar dan buah tanaman pisang mas

Rasio logam berat Cr, Ni, dan As dalam akar dan buah tanaman pisang mas disajikan pada Tabel 5.4.

Tabel 5.4 Rasio logam berat Cr, Ni, dan As dalam akar dan buah tanaman pisang mas

Lokasi	Total logam dalam akar (A) (mg/kg)			Total logam dalam buah (B) (mg/kg)			Rasio (B/A)		
	Cr	Ni	As	Cr	Ni	As	Cr	Ni	As
Kebun 2	200	300	-	60	60	-	0,30	0,20	0,00
Kebun 3	300	500	-	500	700	-	1,66	1,40	0,00
Kebun 6	200	200	-	50	50	-	0,25	0,25	0,00
Kebun 7	4.200	5.000	-	3.900	3.800	-	0,92	0,76	0,00
Pemukiman	300	400	-	190	100	-	0,63	0,25	0,00

Rasio B/A menggambarkan seberapa besar logam yang berpindah dari akar ke buah. Nilai tertinggi terdapat di kebun 3 dengan Cr (1,66) dan Ni (1,40), yang berarti konsentrasi di buah lebih tinggi dibandingkan akar. Kondisi ini patut diperhatikan karena menunjukkan translokasi logam yang efisien ke bagian konsumtif (buah).

Pada kebun 7, meskipun kadar logam di akar dan buah sama-sama tinggi, rasio B/A relatif sedang (0,92 untuk Cr dan 0,76 untuk Ni). Artinya, sebagian besar logam tetap tertahan di akar, tetapi jumlah yang masuk ke buah masih berbahaya untuk dikonsumsi. Kebun 6 menunjukkan rasio rendah (0,25 untuk Cr dan Ni), mengindikasikan kemampuan akar menahan sebagian besar logam sehingga hanya sedikit yang masuk ke buah.

Menariknya, meskipun tanah di beberapa lokasi memiliki kadar As cukup tinggi (hingga 20 mg/kg pada data sebelumnya), arsenik tidak terdeteksi baik di akar maupun buah pisang. Hal ini konsisten dengan sifat arsenat (As^{5+}) yang

cenderung terikat kuat pada mineral Fe/Al dalam tanah, serta tidak mudah diserap oleh tanaman darat seperti pisang (Meharg & Hartley-Whitaker, 2002; Zhao *et al.*, 2010). Dengan demikian, risiko pencemaran As pada buah pisang relatif kecil dibandingkan Ni dan Cr.

Kandungan total logam berat dalam buah yang lebih tinggi dibandingkan dengan akar menunjukkan bahwa telah terjadi proses translokasi logam yang kuat dari akar menuju jaringan atas tanaman (kebun 3). Kondisi ini bisa disebabkan oleh beberapa faktor fisiologis dan lingkungan yang saling berkaitan.

Sifat logam dan bentuk kimianya berpengaruh besar terhadap kemampuan logam untuk berpindah di dalam jaringan tanaman. Logam seperti nikel (Ni) memiliki mobilitas tinggi dalam bentuk ion terlarut (Ni^{2+}), sehingga mudah bergerak melalui xilem bersama aliran air ke bagian atas tanaman, termasuk ke buah. Hal ini berbeda dengan logam seperti kromium (Cr) yang umumnya kurang mobil, tetapi bila berada dalam bentuk Cr(VI), maka kelarutannya meningkat dan memungkinkan perpindahan lebih jauh (Kabata-Pendias, 2011; Alloway, 2013).

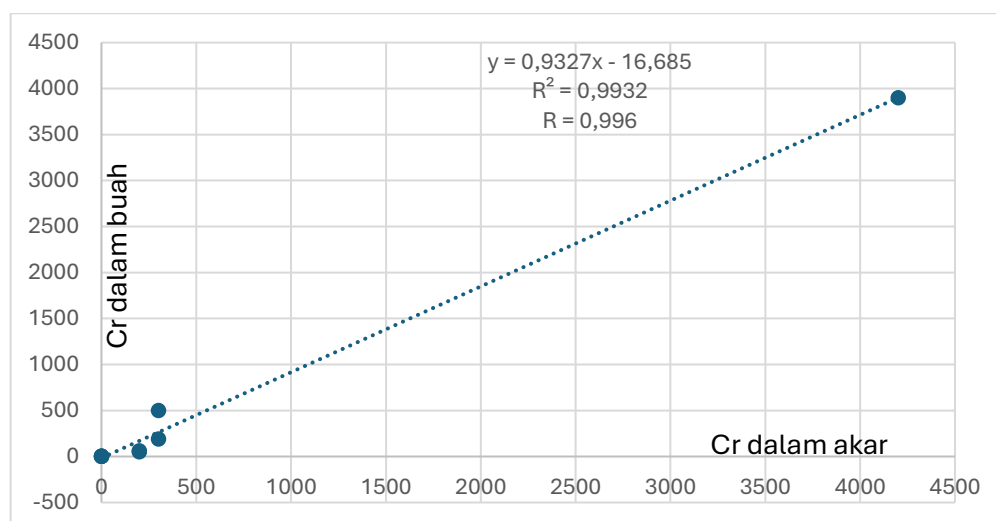
Aktivitas metabolisme tanaman pisang berperan penting, pada fase pembentukan dan pematangan buah, terjadi peningkatan transportasi unsur hara dan air dari akar ke buah. Jika tanah mengandung logam berat dalam bentuk yang mudah tersedia misalnya akibat pH agak masam dan bahan organik tinggi maka logam tersebut ikut terbawa bersama unsur hara ke buah. Proses ini diperkuat oleh adanya mekanisme pengangkutan aktif melalui protein transporter yang tidak mampu membedakan antara ion logam esensial (seperti Fe^{2+} , Zn^{2+} , dan Mn^{2+}) dengan logam toksik seperti Ni dan Cr (Reeves *et al.*, 2018; Baker & Brooks, 1989).

Lingkungan sekitar lokasi tanaman, terutama di area dekat aktivitas pertambangan, dapat mempercepat akumulasi logam di jaringan atas melalui serapan foliar (dari debu atau partikel logam yang menempel di permukaan daun dan buah). Partikel logam halus dari debu tambang bisa menempel, larut oleh embun atau hujan, lalu terserap ke jaringan buah (Wahyudi *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2020). Temuan ini penting karena kadar Cr dan Ni pada buah pisang jauh melebihi ambang batas konsumsi aman. Menurut WHO/FAO, ambang batas konsumsi Cr dalam buah adalah $\leq 1,3$ mg/kg dan Ni ≤ 10 mg/kg (WHO, 2011).

E. Hubungan Korelasi Logam Berat dalam Tanah, Akar dan Buah Tanaman Pisang Mas

1. Total Logam Berat Karsinogenik Kromium (Cr) dalam dan Buah Tanaman Pisang Mas

Hasil dari analisis regresi korelasi total logam berat Kromium (Cr) dalam akar dan buah pisang disajikan dalam Gambar 5.10.



Gambar 5.10 Hubungan korelasi total logam berat karsinogenik kromium (Cr) dalam akar dan buah pisang mas

Grafik memperlihatkan hubungan linier yang sangat kuat antara kadar kromium (Cr) dalam akar dan kadar Cr dalam buah pisang, dengan persamaan regresi $y = 0,9327x - 16,685$, $R^2 = 0,9932$, dan $R = 0,996$. Nilai R yang sangat tinggi menunjukkan bahwa peningkatan Cr di akar hampir sepenuhnya diikuti oleh peningkatan Cr di buah. Dengan kata lain, akar menjadi indikator utama yang menentukan seberapa besar Cr dapat berpindah menuju organ buah. Nilai $R^2 > 0,99$ menegaskan bahwa hampir seluruh variasi Cr dalam buah dijelaskan oleh Cr dalam akar (Montgomery, 2017).

Koefisien regresi 0,93 menunjukkan bahwa sebagian besar Cr yang telah terakumulasi di akar dapat diteruskan menuju jaringan atas (xilem–floem), meskipun tingkat translokasinya tidak mencapai 100%. Translokasi Cr dari akar ke buah relatif terbatas karena Cr merupakan unsur non-esensial dan toksik, sehingga pergerakannya dibatasi oleh penghalang fisiologis seperti endodermis dan casparian strip (Panda & Choudhury, 2005). Namun, pada area penelitian Anda, tingginya kadar Cr di akar—terutama pada lokasi ekstrem seperti yang mencapai >4.000 mg/kg—menjadi faktor pendorong utama meningkatnya Cr pada buah. Dalam kondisi konsentrasi tinggi seperti ini, mekanisme pertahanan tanaman tidak lagi mampu sepenuhnya menahan logam, sehingga sebagian Cr tetap berhasil tertranslokasi ke buah.

Fenomena ini juga sejalan dengan karakteristik tanah ultrabasa di Halmahera Timur yang kaya Cr dari mineral kromit, serta kontribusi tambahan dari debu tambang yang memperkaya logam berat pada permukaan tanah dan jaringan

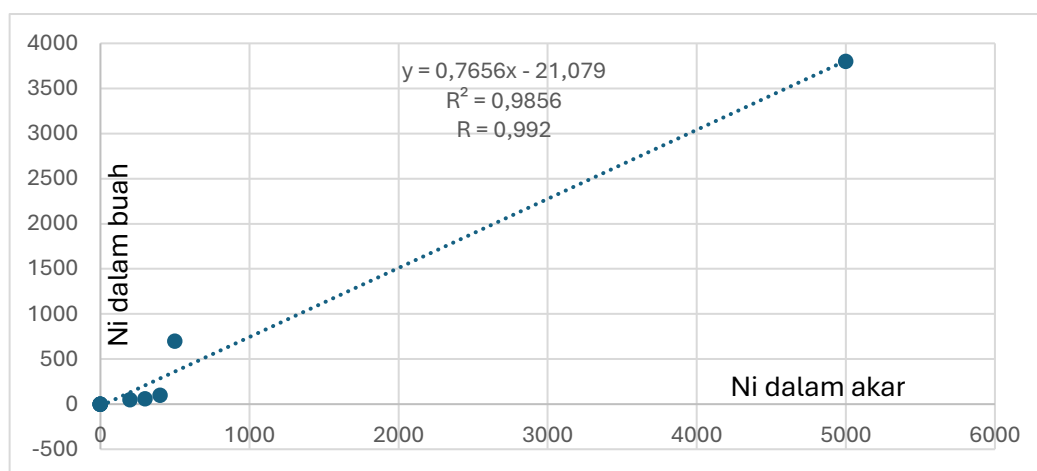
tanaman (Reeves et al., 2018). Ketika akar menyerap Cr dalam jumlah besar, gradien konsentrasi yang tinggi mendorong logam berpindah ke jaringan lain termasuk buah, sehingga meningkatkan risiko bioakumulasi pada bagian tanaman yang dikonsumsi manusia.

Dari grafik terlihat titik ekstrim di mana Cr pada buah mendekati 4.000 mg/kg saat akar berada pada kisaran konsentrasi hampir sama. Nilai ini jauh melebihi batas aman FAO/WHO (umumnya $<0,1$ mg/kg dalam buah konsumsi), menunjukkan bahwa kondisi kontaminasi di lokasi penelitian tergolong berat dan berpotensi membahayakan kesehatan apabila buah tersebut dikonsumsi. Pada beberapa literatur, peningkatan Cr dalam buah pada konsentrasi tinggi seperti ini terjadi akibat dua faktor: (1) konsentrasi Cr tanah yang ekstrem sehingga akar jenuh, dan (2) gangguan fisiologis tanaman akibat toksisitas yang membuat pengaturan ion menjadi tidak stabil, sehingga logam mudah bergerak ke jaringan buah (Shanker et al., 2005).

Secara keseluruhan, grafik ini menunjukkan bahwa akar pisang berfungsi sebagai reservoir utama Cr, tetapi pada kondisi tanah yang sangat tercemar, buah juga ikut menerima beban logam berat yang signifikan. Hal ini menjadi bukti bahwa aktivitas pertambangan dan pelapukan batuan ultrabasa secara langsung berdampak pada keamanan pangan lokal.

2. Total Logam Berat Karsinogenik Nikel (Ni) dalam Akar dan Buah Tanaman Pisang Mas

Hasil dari analisis regresi korelasi total logam berat Nikel (Ni) dalam akar dan buah pisang disajikan dalam Gambar 5.13.



Gambar 5.11 Hubungan korelasi total logam berat karsinogenik nikel (Ni) dalam akar dan buah pisang mas

Grafik menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara kadar nikel (Ni) dalam akar dan kadar Ni dalam buah pisang, dengan persamaan regresi $y = 0,7656x - 21,079$, $R^2 = 0,9856$, dan $R = 0,992$. Nilai R yang mendekati 1 menunjukkan bahwa kandungan Ni pada akar merupakan penentu utama seberapa besar Ni dapat berpindah ke buah, sehingga semakin tinggi akumulasi Ni di akar, semakin besar pula peluang logam tersebut ditemukan di jaringan buah. Nilai R^2 sebesar 0,9856 mengindikasikan bahwa hampir seluruh variasi kadar Ni dalam buah dapat dijelaskan oleh kadar Ni di akar, menandakan hubungan biologis yang sangat kuat (Montgomery, 2017).

Nilai koefisien regresi 0,76 menunjukkan bahwa kemampuan translokasi Ni dari akar menuju buah cukup besar, meskipun tidak sebesar 1:1 seperti pada logam dengan mobilitas sangat tinggi. Ni dikenal sebagai unsur yang relatif mobile di tanaman, khususnya dalam bentuk ion Ni^{2+} yang dapat ditransportasikan melalui jaringan xilem dan floem menuju organ pertumbuhan seperti daun dan buah (Seregin & Kozhevnikova, 2006). Tingginya mobilitas inilah yang menyebabkan buah pisang pada area penelitian Anda ikut terkontaminasi Ni ketika akar telah mengalami akumulasi dalam jumlah besar.

Fenomena ini sangat mungkin terjadi pada tanah ultrabasa Halmahera Timur, yang secara alami kaya Ni dari mineral olivin, serpentin, dan garnierit, serta diperparah oleh aktivitas pertambangan yang meningkatkan deposisi debu kaya Ni di permukaan tanah dan tanaman (Reeves et al., 2018). Pada grafik terlihat titik ekstrim sekitar 5000 mg/kg Ni dalam akar menghasilkan hampir 3800 mg/kg Ni dalam buah, menunjukkan bahwa sistem perakaran sudah jenuh, dan mekanisme pertahanan tanaman tidak mampu lagi membatasi pergerakan Ni menuju jaringan reproduktif.

Secara fisiologis, tanaman pisang bukan tanaman hiperakumulator, sehingga ketika kadar Ni mencapai konsentrasi tinggi, terjadi gangguan pada mekanisme pengaturan ion. Hal ini menyebabkan peningkatan translokasi Ni ke buah, terutama saat akar tidak mampu lagi menghambat akumulasi logam berlebih (Panda & Choudhury, 2005). Kondisi ini berbahaya karena buah pisang merupakan bagian yang dikonsumsi langsung oleh manusia, sementara kadar Ni pada buah

yang terlihat di grafik jauh melampaui ambang aman konsumsi pangan yang direkomendasikan (<10 mg/kg menurut FAO/WHO).

Dengan demikian, grafik ini memperlihatkan bahwa kontaminasi Ni pada tanah—baik secara geologis maupun akibat aktivitas tambang—berdampak langsung terhadap keamanan buah pisang yang tumbuh di wilayah tersebut. Hasil regresi yang hampir sempurna ini menegaskan bahwa upaya mitigasi harus difokuskan pada pengendalian kualitas tanah dan debu tambang, sebab apa pun yang terserap akar hampir pasti dapat berpindah ke buah dalam proporsi yang signifikan.

Pada Tabel 5.5 menyajikan hasil dari hubungan korelasi signifikan dari hasil analisis korelasi total logam berat dalam tanah, akar dan buah tanaman pisang mas.

Tabel 5.5 Korelasi Sifat Kimia Tanah dan Total Logam Berat

Hubungan variabel	Persamaan	r	Signifikansi*)
pH H ₂ O – Cr tanah	$y = 14,164e^{0,717x}$	0,398	Tidak signifikan
pH H ₂ O – Ni tanah	$y = -3480\ln(x) + 11634$	0,046	Tidak signifikan
pH H ₂ O – As tanah	$y = -1,6154x + 19,052$	0,132	Tidak signifikan
pH KCl – Cr tanah	$y = 2402,4e^{0,0114x}$	0,126	Tidak signifikan
pH KCl – Ni tanah	$y = -1424,3x + 13259$	0,169	Tidak signifikan
pH KCl – As tanah	$y = 5,7869x - 27,26$	0,574	Tidak signifikan
C Organik – Cr tanah	$y = 3363,9x^{-0,334}$	0,265	Tidak signifikan
C Organik – Ni tanah	$y = 272,07x + 4042,5$	0,061	Tidak signifikan
C Organik – As tanah	$y = 2,7455x + 0,2499$	0,519	Tidak signifikan
Cr tanah – Cr akar	$y = -565,5\ln(x) + 5018,5$	0,330	Tidak signifikan
Cr akar – Cr buah	$y = 0,9327x - 16,685$	0,996	Signifikan (α 0,01)
Ni tanah – Ni akar	$y = -685,7\ln(x) + 6258,1$	0,391	Tidak signifikan
Ni akar – Ni buah	$y = 0,7656x - 21,079$	0,992	Signifikan (α 0,01)

*) Doral Academy Prep. (2005).

Persamaan regresi yang digunakan dalam analisis ini berfungsi untuk menggambarkan bentuk hubungan matematis antara variabel tanah (pH H₂O, pH KCl, C-organik, Cr, Ni, As) dengan kandungan logam berat baik dalam tanah maupun jaringan tanaman (akar dan buah). Setiap persamaan memberikan

gambaran tentang bagaimana perubahan satu variabel akan mempengaruhi variabel lainnya. Dalam penelitian tanah ultrabasa, penggunaan persamaan regresi sangat penting untuk mengidentifikasi pola dasar, meskipun hubungan tersebut tidak selalu signifikan secara statistik. Menurut Montgomery & Runger (2014), model regresi memungkinkan peneliti memahami arah hubungan, laju perubahan, serta kecenderungan umum dari data lingkungan yang sering bersifat kompleks dan bervariasi.

Pada beberapa hubungan seperti pH H₂O–Cr tanah dan pH KCl–Cr tanah, digunakan persamaan eksponensial ($y = a \cdot e^{bx}$). Persamaan jenis ini digunakan ketika perubahan variabel bebas menghasilkan respon yang meningkat atau menurun secara bertahap, bukan linier. Dalam konteks tanah, persamaan eksponensial membantu menjelaskan bahwa perubahan kecil pada pH dapat menghasilkan perubahan kelarutan logam dalam pola yang tidak proporsional, sesuai dengan teori kimia tanah bahwa perubahan pH dapat mempengaruhi kelarutan logam secara eksponensial (Alloway, 2013). Meskipun nilai korelasi pada tabel menunjukkan hubungan lemah, bentuk persamaannya tetap menggambarkan bagaimana potensi respons logam tergantung pada kondisi pH.

Beberapa persamaan lainnya menggunakan bentuk linier ($y = bx + c$), seperti pada hubungan Cr akar–Cr buah dan Ni akar–Ni buah. Model linier digunakan karena pola data menunjukkan hubungan yang searah dan relatif konsisten antara kedua variabel. Fungsi utama persamaan linier ini ialah mengukur besarnya kenaikan logam pada jaringan buah ketika kadar logam di akar meningkat. Dalam fisiologi tanaman, pola linier seperti ini menandakan bahwa proses

translokasi logam dari akar ke bagian atas tanaman berlangsung stabil, sehingga persamaan linier menjadi representasi paling sederhana dan paling tepat untuk hubungan tersebut (Kabata-Pendias, 2011).

Selain itu, digunakan pula persamaan logaritmik seperti pada hubungan Cr tanah–Cr akar atau Ni tanah–Ni akar ($y = a \cdot \ln(x) + b$). Persamaan logaritmik dipilih ketika data menunjukkan pola awal yang tinggi namun kemudian melandai, atau ketika peningkatan variabel X memberikan pengaruh yang semakin kecil terhadap Y. Dalam ilmu tanah, bentuk logaritmik sangat umum digunakan ketika membahas hubungan antara logam total dan logam yang benar-benar terserap tanaman, karena kenaikan logam total tidak selalu berarti kenaikan logam tersedia. Hal ini sesuai dengan pernyataan Adriano (2001) bahwa hubungan logam total–logam terlarut atau terserap sering bersifat menurun dan tidak proporsional, sehingga model logaritmik menjadi representasi matematis yang tepat.

Hasil korelasi antara berbagai parameter kimia tanah terhadap kandungan logam berat menunjukkan bahwa sebagian besar hubungan memiliki nilai r yang rendah dan berada pada kategori tidak signifikan. Hal ini menggambarkan bahwa variasi logam berat di lokasi penelitian lebih banyak dikendalikan oleh faktor geogenik alami dari pelapukan batuan ultrabasa dibandingkan sifat kimia tanah seperti pH, C-Organik, atau KTK. Tanah ultrabasa umumnya memiliki kandungan Ni dan Cr yang sangat tinggi secara alami sehingga sering kali korelasinya lemah dengan variabel tanah lainnya (Reeves et al., 2018; Kabata-Pendias, 2011).

Nilai korelasi antara pH H₂O maupun pH KCl dengan Cr, Ni, dan As menunjukkan r yang rendah (0,03–0,39) dan semuanya tidak signifikan. Kondisi ini

mengindikasikan bahwa perubahan pH pada tanah ultrabasa di lokasi studi tidak cukup kuat memengaruhi mobilitas logam. Pada tanah ultrabasa yang kaya Mg-Si, logam berat seperti Ni dan Cr cenderung terikat dalam struktur mineral serpentin, sehingga tidak mudah berubah ketersediaannya meskipun pH sedikit bervariasi (Becquer et al., 2010). Dengan demikian, faktor litologi tampak lebih dominan dibandingkan sifat kimia tanah itu sendiri.

Korelasi antara C-Organik dan Cr, Ni, As juga menunjukkan r yang rendah (0,26–0,57) dan tidak signifikan. Secara umum, C-Organik berperan dalam mengikat logam melalui gugus karboksil dan fenolat, namun pada tanah ultrabasa yang miskin bahan organik dan kaya mineral Fe-Mg, peranan bahan organik menjadi kurang dominan (Alloway, 2013). Kelemahan korelasi ini menegaskan bahwa tingginya logam berat lebih dikendalikan oleh pelapukan mineral kromit, olivin, atau piroksen daripada proses organik.

Hubungan antara Cr tanah–Cr akar menunjukkan $r = 0,33$, yang berarti hubungan positif tetapi tidak signifikan. Meski nilai Cr di akar terlihat tinggi, tetapi variasinya antara lokasi tidak mengikuti pola konsentrasi Cr di tanah. Hal ini dapat terjadi karena Cr dalam tanah sebagian besar berada dalam bentuk Cr(III) yang sukar larut dan tidak mudah diserap tanaman (ATSDR, 2012). Kandungan Cr akar yang tinggi kemungkinan berasal dari bentuk Cr yang tersedia (Cr larut atau Cr(VI)) meskipun dalam jumlah kecil, sehingga korelasinya tidak sejalan dengan kadar Cr total.

Dua hubungan yang menunjukkan korelasi signifikan adalah: Cr akar – Cr buah ($r = 0,996$, $\alpha = 0,01$), Ni akar – Ni buah ($r = 0,992$, $\alpha = 0,01$). Hasil ini

menunjukkan bahwa perpindahan logam dari akar ke buah berlangsung konsisten dan linear, terutama pada Ni yang hampir mendekati $r = 1$. Mekanisme translokasi logam ke jaringan atas sangat dipengaruhi oleh sifat Ni dan Cr yang dapat bergerak melalui xilem ketika sudah masuk ke sistem perakaran (Reeves & Baker, 2000). Ni dikenal sebagai unsur yang relatif lebih mobile dalam tanaman sehingga mudah mencapai organ buah, sementara Cr yang masuk ke akar dalam bentuk Cr(VI) juga berpotensi ditranslokasikan meskipun dalam jumlah kecil (Shanker et al., 2005). Hubungan yang signifikan ini memperlihatkan bahwa begitu logam terakumulasi di akar, peluang berpindah ke buah cukup besar, terutama untuk Ni, sehingga dapat menjadi risiko bagi keamanan pangan.

Hubungan ini memiliki $r = 0,39$ dan tidak signifikan. Hal ini menegaskan bahwa kadar Ni yang diserap akar tidak sepenuhnya dikendalikan oleh kadar Ni total tanah, melainkan oleh fraksi yang tersedia (Ni-exchangeable). Tanah ultrabasa memiliki kandungan Ni total tinggi tetapi fraksi tersedia rendah sehingga korelasi dengan tanaman biasanya lemah (Bani et al., 2014). Dengan demikian, nilai Ni akar lebih mencerminkan mekanisme fisiologis tanaman dan kondisi mikro-lingkungan tanah daripada total logam.

Secara keseluruhan, tabel korelasi menunjukkan bahwa parameter kimia tanah tidak memberikan pengaruh kuat terhadap variasi logam berat, sedangkan hubungan antar-logam antara akar dan buah sangat signifikan, terutama pada Ni. Kondisi ini menggambarkan bahwa akumulasi logam dalam tanaman lebih ditentukan oleh kemampuan tanaman menyerap dan mentranslokasikan logam

tersebut, sementara kadar logam tanah lebih banyak dikendalikan oleh faktor geologis ultrabasa dan aktivitas pertambangan.

BAB VI

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan dengan hasil analisis data dan pembahasan yang menyeluruh yang telah dilakukan pada parameter-parameter yang diamati, maka dapat dirumuskan beberapa kesimpulan yang menggambarkan capaian dari tujuan penelitian ini:

1. Penelitian menunjukkan bahwa sifat kimia tanah di Desa Baburino memiliki karakteristik yang dipengaruhi oleh kondisi geologi ultrabasa. Nilai pH berada pada kisaran netral hingga agak masam (6,7–7,9), kandungan C-organik tergolong rendah hingga sedang (0,38–3,76%), kapasitas tukar kation (KTK) berkisar sedang (7,57–16,2 cmol(+)/kg), dan tekstur tanah bervariasi antar lokasi dari berpasir hingga berdebu–lempung. Variasi sifat-sifat ini sangat menentukan kemampuan tanah dalam menahan maupun melepaskan logam berat, sehingga turut memengaruhi tingkat bioavailabilitas logam dalam lingkungan tanaman.
2. Konsentrasi total logam berat Cr dan Ni dalam tanah berada jauh di atas baku mutu yang ditetapkan, baik pada titik kebun yang dekat tambang maupun pada lokasi pemukiman. Tingginya kandungan Cr (800–10.900 mg/kg) dan Ni (800–14.400 mg/kg) menunjukkan bahwa sumber logam berasal dari kombinasi proses geogenik batuan ultrabasa dan pengaruh aktivitas pertambangan. Akumulasi logam dalam tanaman pisang mas juga sangat tinggi, terutama pada jaringan akar yang menjadi organ utama penyerapan, namun buah pisang—yang dikonsumsi masyarakat—juga menunjukkan

kandungan Cr dan Ni jauh melebihi ambang batas aman. Arsenik (As) meskipun ditemukan di tanah, tidak terdeteksi dalam akar maupun buah, menunjukkan bahwa bioavailabilitasnya rendah pada kondisi tanah ultrabasa kering.

3. Rasio akumulasi logam berat menunjukkan bahwa mekanisme bioakumulasi berlangsung kuat pada tanaman pisang mas, terutama terhadap Cr dan Ni. Lokasi seperti Kebun 7 dan Kebun 3 memiliki rasio tinggi, yang menunjukkan bahwa akar mampu mengakumulasi logam hingga beberapa kali lipat dari konsentrasi tanah, dan sebagian logam tersebut dapat ditranslokasikan ke buah. Perbedaan rasio antar lokasi menegaskan bahwa kadar total logam dalam tanah bukan satu-satunya penentu akumulasi, karena bioavailabilitas logam sangat dipengaruhi oleh pH, tekstur, KTK, dan kandungan C-organik. Hasil ini menunjukkan bahwa hubungan antara sifat kimia tanah dan serapan tanaman sangat kuat, serta menegaskan adanya risiko lingkungan dan kesehatan akibat tingginya paparan logam berat di wilayah penelitian.

B. Saran

Berdasarkan dengan kesimpulan yang telah didapatkan, maka beberapa saran yang diajukan sebagai bentuk rekomendasi ilmiah yang dapat diterapkan dalam pengelolaan lahan-lahan perkebunan yang berada di pertambangan yang masih aktif serta untuk menjadi acuan penelitian lanjutan.

1. Pemerintah dan perusahaan tambang

Pengelolaan lahan di sekitar area tambang perlu diarahkan pada sistem pertanian aman. Tanaman konsumsi seperti pisang mas sebaiknya tidak dibudidayakan pada radius < 3 km dari aktivitas tambang nikel, terutama di tanah dengan pH masam dan tekstur halus, karena potensi bioakumulasi logam berat sangat tinggi. Perlu dilakukan program remediasi dan revegetasi pada lahan yang memiliki kadar logam berat tinggi. Jenis tanaman hiperakumulator seperti *Alyssum murale*, *Pteris vittata*, atau tanaman lokal toleran logam dapat digunakan untuk menurunkan kadar Ni, Cr, dan As melalui mekanisme fitoremediasi. Pemantauan berkala terhadap logam berat dalam tanah dan tanaman konsumsi perlu dilakukan oleh pemerintah daerah bersama pihak tambang. Data jangka panjang akan membantu dalam menetapkan batas aman dan pengelolaan risiko lingkungan di kawasan pertanian sekitar tambang.

2. Masyarakat

Edukasi masyarakat tentang bahaya logam berat dan pilihan tanaman alternatif perlu digalakkan. Masyarakat di Baburino dan sekitarnya disarankan menanam komoditas non-edible atau tanaman keras (pohon peneduh, bambu, atau tanaman industri) pada lahan yang berpotensi tercemar.

3. Penelitian lanjutan

Disarankan untuk menilai bentuk logam berat yang tersedia (bioavailable) dan uji toksisitas biologis terhadap tanaman lain di lahan sama, sehingga dapat diketahui fraksi logam yang benar-benar berisiko terhadap rantai pangan dan kesehatan manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriano, D. C. (2001). *Trace elements in terrestrial environments: Biogeochemistry, bioavailability, and risks of metals*. Springer.
- Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability* (3rd ed.). Springer.
- Arifin, S. (2021). Teknologi pirometalurgi dalam pengolahan bijih nikel laterit di Indonesia. *Jurnal Teknologi Mineral Indonesia*, 9(2), 45–53.
- ATSDR. (2019). *Toxicological profile for chromium, nickel, and arsenic*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U.S. Department of Health and Human Services.
- Baker, A. J. M., & Brooks, R. R. (1989). Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—A review of their distribution, ecology, and phytochemistry. *Biorecovery*, 1, 81–126.
- Balai Penelitian Tanah. (2009). *Petunjuk teknis analisis kimia tanah, tanaman, air, dan pupuk*. Balai Penelitian Tanah, Bogor.
- BBSDLP. (2016). *Atlas sumber daya tanah Indonesia skala 1:1.000.000*. Badan Litbang Pertanian, Kementerian Pertanian RI.
- Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The nature and properties of soils* (15th ed.). Pearson Education.
- Broadhurst, C. L., Chaney, R. L., Angle, J. S., Erbe, E. F., Mangel, T. K., & Reeves, R. D. (2016). Nickel hyperaccumulation in *Alyssum* species: Nickel tolerance, uptake, and translocation. *Plant and Soil*, 265(1–2), 225–237.
- Caillempungte, M., Laporte, M. A., & Briat, J. F. (2010). NRAMP1 gene function in metal transport and tolerance. *Plant Physiology*, 158(3), 1707–1717.*
- Campbell, P. G. C. (1995). Interactions between trace metals and aquatic organisms: A critique of the free-ion activity model. *Environmental Chemistry*, 9(1), 43–55.*

- Carey, A. M., Norton, G. J., & Meharg, A. A. (2011). Phloem transport of arsenic species in plants. *New Phytologist*, 192(1), 245–252.*
- Catarecha, P., Segura, M. D., & Hernandez, L. E. (2007). The PHT1 phosphate transporter family and arsenate uptake in Arabidopsis. *Plant and Soil*, 301(1–2), 29–38.*
- Chen, Y., Wang, C., & Wang, Z. (2009). Residual effects of copper, cadmium, lead, and zinc on soil–plant systems. *Environmental Pollution*, 157(1), 93–99.*
- Chapman, H. D. (1965). *Cation-exchange capacity*. In C. A. Black (Ed.), *Methods of soil analysis* (pp. 891–901). American Society of Agronomy.
- Christita, A., & Iwanuddin. (2018). Bioremediasi logam berat Cr(VI) pada tanah pascatambang Tanjung Buli menggunakan bakteri lokal. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(2), 101–108.*
- Cobbett, C. S., & Goldsbrough, P. (2002). Phytochelatins and metallothioneins: Roles in heavy metal detoxification and homeostasis. *Annual Review of Plant Biology*, 53(1), 159–182.*
- Coleman, R. G., & Jove, C. (1992). *Ophiolite and ultramafic rocks*. Springer-Verlag.
- Costa, M., & Klein, C. B. (2006). Toxicity and carcinogenicity of chromium compounds in humans. *Critical Reviews in Toxicology*, 36(2), 155–163.*
- Dalvi, A. D., Bacon, W. G., & Osborne, R. C. (2004). *The past and the future of nickel laterites*. PDAC International Convention, Toronto.
- Doral Academy Prep. (2005). *Table A-6: Critical Values of the Pearson Correlation Coefficient r*.
- Dublet, G., Fandeur, D., Juillot, F., Morin, G., Fritsch, E., & Brown, G. E. (2015). Ni and Cr behavior during lateritic weathering of ultramafic rocks in New Caledonia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 160, 1–15.*
- Duffus, J. H. (2002). Heavy metals—a meaningless term? (IUPAC technical report). *Pure and Applied Chemistry*, 74(5), 793–807.*

- Echevarria, G. (2018). Genesis and behavior of ultramafic soils and consequences for nickel biogeochemistry. *Soil Science and Plant Nutrition*, 64(2), 1–12.*
- Effendi, H. (2003). *Telaah kualitas air bagi pengelolaan sumber daya dan Lingkungan perairan*. Kanisius.
- Effendi, H. (2016). *Kajian pencemaran tanah dan air akibat limbah B3*. Gadjah Mada University Press.
- Fadillah, I., Setiawan, D., & Nuraini, S. (2020). Dampak aktivitas pertambangan terhadap kualitas tanah. *Jurnal Lingkungan Tropis*, 4(1), 13–20.*
- FAO. (2015). *World reference base for soil resources 2014, update 2015*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO/WHO. (2008). *Joint FAO/WHO food standards programme: Codex committee on contaminants in foods*. WHO Press.
- Ferguson, J. F., & Gavis, J. (1972). A review of the arsenic cycle in natural waters. *Water Research*, 6(11), 1259–1274.*
- Galey, M. L., van der Ent, A., & Echevarria, G. (2017). Plant-soil relations in ultramafic environments. *Journal of Geochemical Exploration*, 181, 85–95.*
- Golightly, J. P. (2010). *Progress in understanding the lateritization process of ultramafic rocks*. Geological Society of America.
- Gunawan, H., Priyanto, D., & Salundik. (2015). Dampak aktivitas pertambangan nikel terhadap kualitas tanah dan pakan ternak di Halmahera Timur. *Jurnal Peternakan Tropis*, 3(2), 101–109.*
- Hakim, N., Nyakpa, M. Y., Lubis, A. M., Nugroho, S. G., Diha, M. A., Hong, G. B., & Bailey, H. H. (1986). *Dasar-dasar ilmu tanah*. Universitas Lampung.
- Handayanto, E., Widiastuti, E., & Sugiarto, Y. (2019). Revegetasi lahan pasca tambang nikel menggunakan tanaman pionir lokal. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 21(3), 101–111.*
- Hardjowigeno, S. (2015). *Ilmu tanah*. Akademika Pressindo.

- Hanikenne, M., Talke, I. N., Haydon, M. J., Lanz, C., Nolte, A., Motte, P., ... & Krämer, U. (2008). Evolution of metal hyperaccumulation required cis-regulatory changes and gene duplication. *Nature*, 453(7193), 391–395.*
- Hersenanto, D., & Hermansyah, H. (2010). Kandungan logam berat di sedimen pesisir tambang nikel Halmahera. *Jurnal Geologi Kelautan*, 8(2), 51–60.*
- Hseu, Z. Y. (2018). Mobilization and redistribution of nickel and chromium in ultramafic soils. *Chemosphere*, 191, 153–162.*
- IARC. (2012). *Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans: Arsenic, metals, fibres and dusts (Vol. 100C)*. World Health Organization.
- Imelda, N. (2020). Pengaruh limbah tailing terhadap kualitas tanah dan vegetasi di sekitar tambang nikel. *Jurnal Ilmu Tanah Indonesia*, 8(2), 87–96.*
- Islam, M. S., Rahman, M. M., & Hossain, K. F. (2023). Arsenic accumulation pattern in banana (*Musa spp.*) tissues. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(5), 6221–6233.*
- Jenkins, R. (1999). *X-ray fluorescence spectrometry*. John Wiley & Sons.
- Jomova, K., & Valko, M. (2011). Advances in metal-induced oxidative stress and human disease. *Toxicology*, 283(2–3), 65–87.*
- Kadir, S., Nuraini, S., & Taufik, A. (2020). Dampak sistem tambang terbuka terhadap sifat fisik tanah di Halmahera. *Jurnal Geoteknologi*, 14(1), 55–63.*
- Kabata-Pendias, A. (2011). *Trace elements in soils and plants* (4th ed.). CRC Press.
- Kabata-Pendias, A., & Pendias, H. (2001). *Trace elements in soils and plants* (3rd ed.). CRC Press.
- Kasprzak, K. S., Sunderman, F. W., & Salnikow, K. (2003). Nickel carcinogenesis. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 533(1–2), 67–97.*

- Kementerian Lingkungan Hidup. (2006). *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 7 Tahun 2006 tentang Baku Mutu Kerusakan Tanah untuk Produksi Biomassa*.
- Khan, M. A., Singh, A., & Rahman, M. S. (2025). Competitive phosphate–arsenate uptake in plants. *Environmental Research*, 251, 118–128.*
- Kicińska, A. (2019). Soil-plant transfer of heavy metals in areas affected by mining activity. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(4), 1671–1686.*
- Konopka, G., Hohenegger, J., & Setiawan, A. (2022). Geochemical and mineralogical characteristics of nickel laterite soils in Halmahera, Indonesia. *Ore Geology Reviews*, 144, 104827.*
- Kosmulski, M. (2021). The pH-dependent surface charging and points of zero charge. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 614, 126190.*
- Kosmulski, M. (2023). *Surface charging and points of zero charge: An update*. Elsevier.
- Lestari, E., Nuraini, S., & Suryawan, B. (2020). Akumulasi nikel (Ni) pada tanaman pisang di area tambang laterit. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 205–215.*
- Lindsay, W. L., & Norvell, W. A. (1978). Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese, and copper. *Soil Science Society of America Journal*, 42(3), 421–428.*
- Liu, W., Zhou, Q., & Wang, Y. (2025). Phytoremediation potential of *Sedum alfredii* for cadmium-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(4), 3891–3903.*
- Ma, L. Q., Komar, K. M., Tu, C., Zhang, W., Cai, Y., & Kennelley, E. D. (2001). A fern that hyperaccumulates arsenic. *Nature*, 409(6820), 579–579.*
- Marschner, H. (2012). *Mineral nutrition of higher plants* (3rd ed.). Academic Press.
- McBride, M. B. (1994). *Environmental chemistry of soils*. Oxford University Press.

- McLaughlin, M. J., Hamon, R. E., McLaren, R. G., Speir, T. W., & Rogers, S. L. (2000). Review: Bioavailability of metals to terrestrial plants. *Soil Research*, 38(4), 793–806.*
- Mielke, H. W., & Reagan, P. L. (2017). Soil is an important pathway of human lead exposure. *Environmental Health Perspectives*, 106(Suppl 1), 217–229.*
- Miller, E. C., & Miller, J. A. (1981). Mechanisms of chemical carcinogenesis. *Cancer*, 47(5), 1055–1064.*
- Miller, G. T., & Spoolman, S. E. (2012). *Environmental science* (14th ed.). Brooks/Cole.
- Morel, M., Crouzet, J., Gravot, A., Auroy, P., Leonhardt, N., Vavasseur, A., & Richaud, P. (2009). AtHMA3, a P1B-ATPase allowing Cd/Zn/Co/Pb vacuolar storage in Arabidopsis. *Plant Physiology*, 149(2), 894–904.*
- Nasution, D. N., Sari, I. N., & Rahayu, N. (2016). Akumulasi logam berat Cr pada pisang di sekitar limbah industri. *Jurnal Biologi Indonesia*, 12(3), 217–225.*
- Nordberg, G. F., Fowler, B. A., & Nordberg, M. (2015). *Handbook on the toxicology of metals* (5th ed.). Academic Press.
- Nurcholis, W., Yulianto, A., & Rahman, M. (2022). Risiko paparan logam berat dari konsumsi buah pisang di sekitar tambang nikel. *Jurnal Ekotoksikologi Indonesia*, 4(1), 55–63.*
- Nuraini, S., & Sari, R. (2018). Analisis dampak lingkungan penambangan nikel terhadap kualitas perairan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 16(3), 89–97.*
- Pardosi, D. T., Rahman, M., & Santoso, E. (2024). Petrografi dan geokimia batuan ultramafik Halmahera Timur. *Jurnal Geosains Indonesia*, 9(2), 177–189.*
- Primandani, M., Yuliana, E., & Adi, R. (2020). Bioakumulasi logam berat Ni dan Cr pada pisang di sekitar area tambang nikel Sulawesi. *Jurnal Agroteknologi Tropika*, 8(3), 155–163.*

- Primandani, M., Yuliana, E., & Adi, R. (2021). Risiko konsumsi buah pisang tercemar logam berat di sekitar tambang. *Jurnal Ekologi Pangan*, 9(1), 1–10.*
- Proctor, J. (2003). Vegetation and soil of ultramafic rocks in tropical and temperate regions. *Journal of Environmental Quality*, 32(2), 573– 582.*
- Prayogo, D. (2016). Rehabilitasi lahan pascatambang nikel melalui revegetasi lokal. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 40(2), 99–108.*
- Pusat Penelitian Tanah. (1983). *Klasifikasi kesuburan tanah Indonesia*. Pusat Penelitian Tanah, Bogor.
- Purwanto, R., Arifin, S., & Lestari, N. (2021). Hubungan batuan ultrabasa dengan sumber daya mineral di wilayah tropis Indonesia. *Jurnal Geologi Indonesia*, 16(2), 85–97.*
- Rahman, M., Wahyudi, T., & Yusuf, A. (2020). Kandungan nikel pada tanah pertanian di sekitar tambang Halmahera Timur. *Jurnal Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 7(1), 45–55.*
- Rajakaruna, N. (2014). Evolutionary ecology of serpentine soils. *Plant and Soil*, 383(1–2), 1–10.*
- Rajmohan, N., & Prathibha, P. (2020). Environmental impacts of laterite nickel mining. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 1–13.*
- Ramadhan, D., Wibowo, S., & Hartono, R. (2020). Proses lateritisasi batuan ultrabasa di sekitar Buli, Halmahera Timur. *Jurnal Geologi Indonesia*, 15(3), 211–222.*
- Raswan, A. (2017). Geologi batuan ultrabasa daerah Buli, Halmahera Timur. *Jurnal Geologi Indonesia*, 13(2), 75–84.*
- Raza, S. H., Ali, Q., & Ashraf, M. (2017). Phytotoxicity of heavy metals on banana (*Musa acuminata*) under soil contamination. *Plant Physiology Reports*, 22(4), 505–512.*
- Rauret, G., Lopez-Sanchez, J. F., Sahuquillo, A., Rubio, R., Davidson, C., Ure, A., & Quevauviller, P. (1999). Improvement of the BCR three-step sequential extraction procedure. *Journal of Environmental Monitoring*, 1(1), 57–61.*

- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., Jaffré, T., Erskine, P. D., Echevarria, G., & van der Ent, A. (2018). *Tropical hyperaccumulators of metals: Ecological distribution and phylogenetics*. Springer.
- Reeves, R. D., Baker, A. J. M., & Brooks, R. R. (2003). *Biology of metal hyperaccumulation in plants*. Springer.
- Reddy, K. R., & D'Angelo, E. M. (1997). Biogeochemical indicators to evaluate pollutant dynamics in wetlands. *Soil Science Society of America Journal*, 61(2), 452–458.*
- Rieuwerts, J. S., Thornton, I., Farago, M. E., & Ashmore, M. R. (2006). Factors influencing metal bioavailability in soils. *Applied Geochemistry*, 21(11), 1970–1993.*
- Robinson, J. C., & Saúco, V. G. (2010). *Bananas and plantains* (2nd ed.). CABI.
- Rosita, D., & Haris, M. (2019). Kajian topografi dan geologi dalam eksplorasi nikel di Sulawesi. *Jurnal Teknologi Mineral*, 11(1), 11–21.*
- Sanchez, P. A. (2019). *Properties and management of soils in the tropics* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Santoso, E. (2014). Kandungan Ni pada tanah dan tanaman pisang di area tambang Halmahera Timur. *Jurnal Sumberdaya Alam*, 5(1), 55–63.*
- Sharma, S., Shukla, R., & Sinha, P. (2008). Chromium and nickel accumulation in banana roots and fruits near tanneries. *Environmental Monitoring and Assessment*, 143(1–3), 111–117.*
- Smith, A. H., Lingas, E. O., & Rahman, M. (2002). Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh: A public health emergency. *Bulletin of the World Health Organization*, 78(9), 1093–1103.*
- Soemarwoto, O. (2009). *Ekologi, lingkungan hidup, dan pembangunan* (5th ed.). Djambatan.
- Sparks, D. L. (2003). *Environmental soil chemistry* (2nd ed.). Academic Press.
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils* (2nd ed.). Oxford University Press.
- Steenland, K., & Ward, E. (1991). Lung cancer incidence among beryllium-exposed workers. *American Journal of Industrial Medicine*, 19(6), 755–762.*

- Suryawan, B., Lestari, E., & Nuraini, S. (2020). Risiko kesehatan akibat konsumsi buah pisang tercemar logam berat di Halmahera Timur. *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 17(1), 33–42.*
- Sutrisno, A., Wulandari, T., & Rahmawati, D. (2015). Kandungan kromium pada tanah bekas industri penyamakan di Yogyakarta. *Jurnal Lingkungan Tropis*, 2(1), 21–29.*
- Suwandhi, W. (2017). Eksplorasi potensi bijih nikel di Sulawesi menggunakan metode geolistrik. *Jurnal Geoteknologi*, 13(2), 55– 63.*
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. *Experientia Supplementum*, 101, 133–164.*
- USGS. (2025). *Mineral commodity summaries: Nickel 2025*. U.S. Geological Survey.
- van der Ent, A., Echevarria, G., & Reeves, R. D. (2013). Distribution and evolution of hyperaccumulator plants in Southeast Asia. *Plant and Soil*, 362(1–2), 1–16.*
- Vert, G., Grotz, N., Dedaldechamp, F., Gaymard, F., Guerinot, M. L., Briat, J. F., & Curie, C. (2002). IRT1, an Arabidopsis transporter essential for iron uptake from the soil. *Plant Cell*, 14(6), 1223– 1233.*
- Waalkes, M. P. (2003). Cadmium carcinogenesis. *Mutation Research*, 533(1–2), 107–120.*
- Wahyono, E., Lestari, N., & Santoso, E. (2021). Kandungan Ni dan Cr pada pisang di sekitar tambang laterit Halmahera Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(3), 211–220.*
- Wahyudi, T., Rahman, M., & Yusuf, A. (2021). Analisis kandungan logam berat di tanah tambang nikel Halmahera Timur. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya*, 6(2), 87–95.*
- Wang, X., Liu, Y., & Zhang, M. (2020). Soil texture effects on heavy metal mobility and plant uptake. *Environmental Pollution*, 263(Pt B), 114–203.*
- WHO. (2010). *Exposure to arsenic: A major public health concern*. World Health Organization.

- WHO/FAO. (2011). *Joint FAO/WHO food standards programme: Codex alimentarius commission*. WHO Press.
- Widodo, A. (2015). Dampak sistem tambang terbuka terhadap lingkungan fisik dan sosial. *Jurnal Teknologi Mineral Indonesia*, 6(1), 33–40.*
- Widiatmoko, D., Mirnanda, D., & Kurnio, H. (2020). Analisis logam berat Ni dan Fe pada sedimen dasar Teluk Buli. *Jurnal Geologi Kelautan*, 8(1), 55–63.*
- Yu, R., Liu, X., & Wang, Y. (2017). Soil acidity and heavy metal bioavailability: A review. *Environmental Reviews*, 25(4), 421–433.*
- Yu, X., Zhao, Q., & Zhang, J. (2020). Heavy metal accumulation in banana plants under contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(18), 22419–22430.*
- Yoo, K., & James, B. R. (2002). Zinc, copper, and lead in soils and plants under different soil pH and texture conditions. *Soil Science*, 167(8), 515–523.*

LAMPIRAN

Lampiran 1. Sampel



Gambar 1. Dokumentasi sampel tanah, akar dan buah tanaman pisang yang di keringkan



Gambar 2. Sampel tanah, akar dan buah pisang yang sudah dihaluskan

Lampiran 2. Hasil laboratorium

Lokasi	pH		C-Organik (%)	KPK (%)	Kejenuhan Basa (%)	Tekstur Tanah (%)			Jenis Logam Berat dalam Tanah (mg/kg)		
	H ₂ O	KCL				Debu	Lempung	Pasir	Cr	Ni	As
1	7,39	5,49	3,32	12,2	79	62	19	18	1.900	2.400	7
2	7,43	6,11	2,21	16,2	71	30	49	19	2.600	3.600	5
3	7,51	6,99	3,36	10,1	63	4,6	9,5	85	1.900	2.100	20
4	6,76	5,82	3,76	12,9	56	35	49	15	6.000	14.400	10
5	7,92	6,61	0,38	7,57	11	7,6	8,4	83	3.800	4.300	5
6	6,72	5,42	2,4	15,6	67	61	19	19	2.200	3.800	7
7	6,81	6,14	3,11	11,8	95	60	21	17	1.200	1.200	6
8	7,01	5,53	2,84	11,4	96	53	11	35	800	800	6
Kontrol	7,74	5,69	1,84	10,7	77	30	23	45	10.900	10.100	-

Jenis Logam Berat dalam Akar (mg)		Jenis Logam Berat dalam Buah (mg/kg)		Basa Tertukar			
Cr	Ni	Cr	Ni	Ca	Mg	K	Na
200	300	60	60	79,4	11,3	3,21	3,45
				70,9	27,4	9,47	7,71
300	500	500	700	38,4	11,4	6,24	7,8
				51,7	12,2	5,53	2,9
200	200	50	50	65,4	9,85	5,41	3,37
				59,1	34,4	5,53	6,22
4.200	5.000	3.900	3.800	79,4	15,4	7,88	10,41
				78,4	13,3	6,04	11,89
300	400	190	100	69,7	6,15	4,94	2,41

Tabel 1. Hasil analisis parameter kimia tanah dan logam berat

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	<i>Omnian Standard with Helium</i>
Kode Sampel	:	Bp. 2	Metode Preparasi	:	<i>Loose Powder</i>
(sample code)			(preparation method)		
<u>Element</u>	<u>Conc</u>	<u>Unit</u>	<u>Element</u>	<u>Conc</u>	<u>Unit</u>
Mg	622,2	ppm	Mn	0,125	%
Al	0,306	%	Fe	2,518	%
Si	0,538	%	Co	156,7	ppm
P	0,214	%	Ni	726,3	ppm
S	282,6	ppm	Cu	83	ppm
Cl	0,471	%	Zn	242,8	ppm
K	6,511	%	Br	71,2	ppm
Ca	2,529	%	Rb	75,4	ppm
Ti	563,6	ppm	Sr	681,4	ppm
Cr	575,2	ppm			

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	<i>Omnian Standard with Helium</i>
Kode Sampel	:	Bp. 3	Metode Preparasi	:	<i>Loose Powder</i>
(sample code)			(preparation method)		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Mg	341,9	ppm	Mn	245	ppm
Al	0,286	%	Fe	0,29	%
Si	0,128	%	Co	19,6	ppm
P	0,212	%	Ni	51,9	ppm
S	190,8	ppm	Cu	48,5	ppm
Cl	0,3	%	Zn	192,8	ppm
K	6,502	%	Br	10,9	ppm
Ca	1,001	%	Rb	29	ppm
Ti	120,5	ppm	Sr	46,7	ppm
Cr	53,6	ppm			

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	Omnian Standard with Helium
Kode Sampel	:	Ap. 1	Metode Preparasi	:	Loose Powder
(sample code)			(preparation method)		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Mg	0,202	%	Mn	794	ppm
Al	0,593	%	Fe	1,675	%
Si	0,815	%	Co	82,2	ppm
P	0,31	%	Ni	318,6	ppm
S	334,7	ppm	Cu	58,3	ppm
Cl	0,382	%	Zn	186,8	ppm
K	17,01	%	Br	16,2	ppm
Ca	2,276	%	Rb	126,6	ppm
Ti	680,8	ppm	Sr	83,9	ppm
Cr	275,5	ppm			

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	Omnian Standard with Helium
Kode Sampel	:	Ap. 2	Metode Preparasi	:	Loose Powder
(sample code)			(preparation method)		
<div></div>			<div></div>		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Mg	879,7	ppm	Mn	0,185	%
Al	0,29	%	Fe	2,211	%
Si	1,314	%	Co	130,4	ppm
P	0,304	%	Ni	589,8	ppm
S	342	ppm	Cu	64,1	ppm
Cl	0,511	%	Zn	167,5	ppm
K	5,433	%	Br	85,5	ppm
Ca	3,706	%	Rb	75,7	ppm
Ti	580,8	ppm	Sr	758,7	ppm
Cr	350,6	ppm			

HASIL UJI X-RAY FLUORESCENCE (X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS RESULT) Laboratorium Radiasi Yogyakarta - BRIN					
ELSA ID	:	212870	Metode pengujian (analysis method)	:	Omnian Standard with Helium
Kode Sampel	:	T.1	Metode Preparasi (preparation method)	:	Loose Powder
(sample code)					
<u>Element</u>			<u>Element</u>		
	<u>Conc</u>	<u>Unit</u>		<u>Conc</u>	<u>Unit</u>
Na	1,053	%	Mn	0,336	%
Mg	0,57	%	Fe	20,027	%
Al	2,068	%	Co	0,154	%
Si	14,832	%	Ni	1,019	%
P	0,208	%	Cu	154,6	ppm
S	172,2	ppm	Zn	339,6	ppm
Cl	170,6	ppm	Ga	15,3	ppm
K	0,29	%	As	tidak terdeteksi	
Ca	0,708	%	Br	23,5	ppm
Sc	12,4	ppm	Rb	6,3	ppm
Ti	0,189	%	Sr	214,8	ppm
V	139,6	ppm	Y	18	ppm
Cr	1,059	%	Zr	78	ppm

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	<i>Omnian Standard with Helium</i>
Kode Sampel	:	T.2	Metode Preparasi	:	<i>Loose Powder</i>
(sample code)			(preparation method)		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Na	0,755	%	Mn	0,248	%
Mg	0,36	%	Fe	14,063	%
Al	2,894	%	Co	884,8	ppm
Si	13,795	%	Ni	0,248	%
P	0,179	%	Cu	256,5	ppm
S	144	ppm	Zn	223,8	ppm
Cl	107,6	ppm	Ga	33,5	ppm
K	0,503	%	As	7	ppm
Ca	2,12	%	Br	31,4	ppm
Sc	66,6	ppm	Rb	22,8	ppm
Ti	0,574	%	Sr	542,6	ppm
V	323,1	ppm	Y	49,8	ppm
Cr	0,199	%	Zr	172,8	ppm

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	Omnian Standard with Helium
Kode Sampel	:	T.3	Metode Preparasi	:	Loose Powder
(sample code)			(preparation method)		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Na	0,935	%	Mn	0,687	%
Mg	0,485	%	Fe	8,606	%
Al	2,015	%	Co	476,4	ppm
Si	10,626	%	Ni	0,218	%
P	0,318	%	Cu	77,6	ppm
S	592,7	ppm	Zn	118,7	ppm
Cl	89,3	ppm	Ga	19,2	ppm
K	0,275	%	As	21,4	ppm
Ca	14,593	%	Br	308,2	ppm
Sc	227,3	ppm	Rb	14,8	ppm
Ti	0,288	%	Sr	0,439	%
V	131,9	ppm	Y	37	ppm
Cr	0,198	%	Zr	101,3	ppm

ELSA ID	:	212870	Metode pengujian	:	Omnian Standard with Helium
Kode Sampel	:	T.4	Metode Preparasi	:	Loose Powder
(sample code)			(preparation method)		
Element	Conc	Unit	Element	Conc	Unit
Na	0,796	%	Mn	0,245	%
Mg	0,794	%	Fe	15,022	%
Al	2,769	%	Co	979,9	ppm
Si	14,374	%	Ni	0,437	%
P	0,19	%	Cu	226,7	ppm
S	122,1	ppm	Zn	241	ppm
Cl	95,6	ppm	Ga	27,1	ppm
K	0,299	%	As	5,7	ppm
Ca	2,743	%	Br	6,6	ppm
Sc	89	ppm	Rb	12,2	ppm
Ti	0,394	%	Sr	530,7	ppm
V	269,3	ppm	Y	35	ppm
Cr	0,382	%	Zr	122	ppm

Tabel 3. Hasil analisis logam berat dalam tanah dan tanaman pisang

Lampiran 3. Table A-6 Critical Values Of The Pearson Correlation Coefficient r

TABLE A-6 Critical Values of the Pearson Correlation Coefficient r

n	$\alpha = .05$	$\alpha = .01$
4	.950	.999
5	.878	.959
6	.811	.917
7	.754	.875
8	.707	.834
9	.666	.798
10	.632	.765
11	.602	.735
12	.576	.708
13	.553	.684
14	.532	.661
15	.514	.641
16	.497	.623
17	.482	.606
18	.468	.590
19	.456	.575
20	.444	.561
25	.396	.505
30	.361	.463
35	.335	.430
40	.312	.402
45	.294	.378
50	.279	.361
60	.254	.330
70	.236	.305
80	.220	.286
90	.207	.269
100	.196	.256

11

Gambar 3. Tabel Korelasi Signifikansi nilai r

Lampiran 4. Lokasi penelitian



Gambar 4. Lokasi penelitian dan titik pengambilan sampel



Gambar 5. Lokasi sekitar daerah pertambangan

Lampiran 5. Foto kegiatan

Gambar 6. Kegiatan pengambilan sampel



Gambar 7. Kegiatan wawancara dengan pemilik kebun di lokasi penelitian

