



Hubungan Morfologi dengan Karakteristik Laterisasi pada Endapan Nikel Laterit Daerah AXZ, Kota Maba, Halmahera Timur, Maluku Utara

Muhammad Alfian Helmerdi

Universitas Trisakti, Indonesia

Email: M.alfan.helmerdi@gmail.com

KEYWORD	ABSTRACT
Laterite deposits; morphology; laterization; Nickel	<i>Nickel is one of the natural resources that has many benefits for various other types of products, this versatility is also what makes nickel very valuable and has a high selling value in the world market. The existence of laterite nickel deposits is generally widely spread in the eastern region of Indonesia, including in East Halmahera, Central Halmahera, in addition to the South Sulawesi region, Central Sulawesi, and Southeast Sulawesi. This research was conducted at PT. Antam Tbk, located in East Halmahera, North Maluku, aims to determine the morphological relationship with the characteristics of laterization of laterite nickel deposits. The research methodology was carried out by literature study, field mapping, geomorphological analysis, lithological analysis, laterite thickness analysis, and analysis of Ni, Co, Fe₂O₃, SiO₂, MgO, and Al₂O₃ levels. The geomorphology of the study area is divided into steep hill geomorphology units, steep hill geomorphology units, and sloping plain geomorphology units, with lherzolite units and dunits that fill the geological units of the study area which are ultra-alkaline rock formations. The geological structure of the research area is fractured with a relative orientation of northwest – southeast and then northeast – southwest. The laterite deposits in the study area consist of top soil, limonite, saprolite, and host rock zones that are included in the hydrosilicate deposit type, with the thickness of the saprolite zone higher than the limonite zone and top soil. The morphological relationship to the distribution of laterite nickel can be seen in the steeper the slope, the thicker the saprolite zone compared to the steeper slope and the steeper the slope, the thinner the laterite deposit, where the Ni element experiences enrichment in the saprolite zone and then the element Co experiences enrichment in the limonite zone while the Fe element experiences enrichment in the top soil zone. Laterization and weathering processes are most developed on steep slopes and thicker laterite deposits. The results of this study are expected to be a reference in exploration and evaluation activities of laterite nickel deposits in similar areas.</i>
KATA KUNCI	ABSTRAK
Endapan laterit; morfologi; laterisasi; Nikel	Nikel merupakan salah satu sumberdaya alam yang memiliki banyak manfaat untuk berbagai jenis produk lainnya, keserbagunaan ini pula yang menjadikan nikel sangat berharga dan memiliki nilai jual tinggi di pasar dunia. Keberadaan endapan nikel laterit umumnya banyak tersebar di wilayah timur Indonesia, antara lain di terdapat di Halmahera Timur, Halmahera tengah, Selain di wilayah Sulawesi Selatan, Sulawesi Tengah, serta Sulawesi Tenggara. Penelitian ini dilakukan di PT. Antam Tbk yang terletak di halmahera timur, maluku utara bertujuan untuk mengetahui hubungan morfologi dengan karakteristik laterisasi terhadap endapan nikel laterit. Metodologi penelitian dilakukan dengan studi pustaka, pemetaan lapangan, analisis geomorfologi, analisis litologi, analisis ketebalatan laterit, serta analisis kadar Ni, Co, Fe ₂ O ₃ , SiO ₂ , MgO, dan Al ₂ O ₃ . Geomorfologi daerah penelitian terbagi menjadi satuan geomorfologi bukit curam, satuan geomorfologi bukit terjal, dan satuan geomorfologi dataran landai, dengan satuan lherzolit dan dunit yang mengisi satuan geologi daerah penelitian yang merupakan formasi batuan ultrabasa. Struktur geologi daerah penelitian beruka rekahan yang memiliki orientasi relatif Barat laut – tenggara lalu Timur laut-Barat daya. Endapan laterit daerah penelitian terdiri dari zona top soil, limonit, saprolit, dan batuan induk yang termasuk kedalam tipe endapan hidrosilikat, dengan ketebalan zona saprolit lebih tinggi dari zona limonit dan top soil. Hubungan morfologi terhadap sebaran nikel laterit dapat terlihat pada semakin curam lereng maka semakin tebal zona saprolitnya dibandingkan pada kelerengan lebih landai serta semakin terjal lereng maka endapan laterit menjadi semakin tipis, dimana unsur Ni

mengalami pengkayaan di zona saprolite lalu unsur lalu unsur Co mengalami pengkayaan di zona limonit sedangkan unsur Fe mengalami pengkayaan di zona top soil. Laterisasi dan proses pelapukan paling berkembang pada lereng curam-terjal serta endapan laterit yang lebih tebal. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam kegiatan eksplorasi dan evaluasi endapan nikel laterit di wilayah serupa.

PENDAHULUAN

Berdasarkan letak geologinya Indonesia merupakan negara yang kaya akan sumberdaya alam, terutama bahan tambang yang merupakan sumberdaya alam yang tidak dapat diperbaharui (Asseggaf, 2017; Hills, 2024; Prakoso & Burhannudinnur, 2020). Salah satu contoh sumberdaya alam tersebut yang sangat penting adalah Nikel. Nikel merupakan salah satu sumberdaya alam yang memiliki banyak manfaat seperti pembuatan logam anti karat, campuran pada pembuatan stainless steel dan berbagai jenis barang lainnya (Van der Ent et al., 2013). Keserbagunaan ini pula yang menjadikan nikel sangat berharga dan memiliki nilai jual tinggi di pasar dunia. Setidaknya sejak 1950 permintaan akan nikel rata-rata mengalami kenaikan 4% tiap tahun, dan diperkirakan sepuluh tahun mendatang terus mengalami peningkatan.

Keberadaan endapan nikel laterit umumnya banyak tersebar di wilayah timur Indonesia, antara lain di provinsi Maluku Utara yang terdapat di Halmahera Timur seperti kabupaten Maba, Buli dan Wasile, kemudian di wilayah Halmahera tengah yaitu kabupaten Weda. Selain itu, endapan nikel laterit juga terdapat di wilayah Sulawesi Selatan yaitu Luwu Timur dan Barru, Sulawesi Tengah yaitu Morowali dan Luwuk Banggai, serta Provinsi Sulawesi Tenggara (Butt & Cluzel, 2013; Freyssinet et al., 2005; Li et al., 2019). Berdasarkan dari *website* resmi PT. Antam Tbk, Komoditas bijih nikel diproduksi dari tambang nikel Kolaka, Sulawesi Tenggara, tambang nikel Konawe Utara, tambang nikel Halmahera Timur, serta tambang nikel Pulau Gag yang dioperasikan oleh UBP nikel masing masing. Pada Akhir 2021, total cadangan konsolidasian ANTAM tercatat sebesar 381,91 juta wet metric ton (WMT) yang terdiri dari 332,69 wmt bijih nikel saprolit dan 49,22 juta wmt bijih nikel limonit (Hartami et al., 2023).

Penelitian ini berlandaskan pada studi-studi sebelumnya yang relevan, khususnya yang menggunakan kerangka klasifikasi dan analisis serupa. Sebagai landasan teoretis utama, penelitian terdahulu yang mengacu pada klasifikasi Van Zuidam (1985) untuk analisis morfometri, klasifikasi Brand dkk. (1998) untuk penentuan tipe endapan nikel laterit, serta pendekatan kuantitatif Babechuk dkk. (2014) untuk menilai tingkat laterisasi menjadi acuan fundamental. Selain itu, berbagai penelitian telah menerapkan analisis geokimia berbasis X-Ray Fluorescence (XRF) untuk mengkaji distribusi dan pengayaan unsur-unsur seperti Ni, Co, Fe, dan Si pada profil laterit di berbagai daerah dengan kondisi geomorfologi berbeda. Sintesis dari literatur sebelumnya ini memberikan dasar metodologis dan konteks komparatif yang kuat bagi penelitian untuk menganalisis hubungan spesifik antara morfologi, proses laterisasi, dan karakteristik endapan di lokasi studi (Inagaki & Sadohara, 2018; Triany et al., 2021; Pertiwi & Marniati, 2024).

Tentunya keberadaan endapan nikel laterit tersebut, memiliki perbedaan karakteristik pada masing-masing daerah (Quast et al., 2015; Tong et al., 2015). Perbedaan tersebut dapat diketahui dari sifat fisik yang nampak di atas permukaan meliputi jenis laterit, litologi dan kondisi morfologi. Selain itu perbedaan sifat kimia berupa persentase kandungan unsur-unsur kimianya. Oleh karena itu dilakukan penelitian ini untuk mengetahui “Hubungan Morfologi dan Karakteristik Laterisasi Pada Endapan Nikel Laterit Daerah AXZ, Kota Maba, Halmahera Timur, Maluku Utara”.

Berdasarkan uraian di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut: (1) Bagaimana hubungan kondisi morfologi terhadap distribusi endapan laterit; (2) Bagaimana hubungan karakteristik laterisasi terhadap persebaran unsur pada endapan laterit; serta (3)

Bagaimana hubungan kondisi morfologi dengan karakteristik laterisasi terhadap karakteristik endapan nikel laterit. Maksud dan tujuan penelitian ini adalah: (1) Mengetahui karakteristik morfologi terhadap distribusi endapan laterit di daerah penelitian; (2) Mengetahui karakteristik laterisasi serta persebaran unsur pada endapan laterit di daerah penelitian; dan (3) Mengetahui hubungan kondisi morfologi serta karakteristik laterisasi terhadap karakteristik endapan nikel laterit di daerah penelitian.

Dalam penelitian ini, batasan wilayah ditetapkan pada Daerah XX di Provinsi Maluku Utara, Indonesia. Fokus penelitian adalah analisis morfologi dan geokimia dengan mengacu pada klasifikasi Brand et al. (1998) untuk tipe endapan nikel laterit, klasifikasi Van Zuidam (1985) untuk faktor morfometri, serta nilai kualitatif Babechuk et al. (2014) sebagai landasan teoretis utama dalam menilai tingkat laterisasi. Penelitian ini dibatasi pada analisis sampel pemboran, morfometri, geomorfologi, petrografi, litologi, geokimia, dan data kuantitatif unsur di Daerah AXZ, Kota Maba, Halmahera Timur, Maluku Utara. Tujuan utama adalah mengkaji hubungan antara kondisi morfologi dan proses geokimia dengan hasil laterisasi yang berkembang, serta pengaruhnya terhadap karakteristik endapan nikel laterit di wilayah tersebut. Data diperoleh melalui kajian literatur, observasi lapangan, pengambilan sampel, data perusahaan, dan pengujian laboratorium yang relevan dengan aspek morfologi dan laterisasi. Namun, penelitian ini tidak membahas secara mendalam kondisi drainase, struktur geologi yang berkembang, kelerengan lahan, faktor keekonomian, kondisi sosial setempat, maupun estimasi sumber daya di daerah tersebut (Marsh & Anderson, 2011; Maurizot et al., 2019; Trotet et al., 2015).

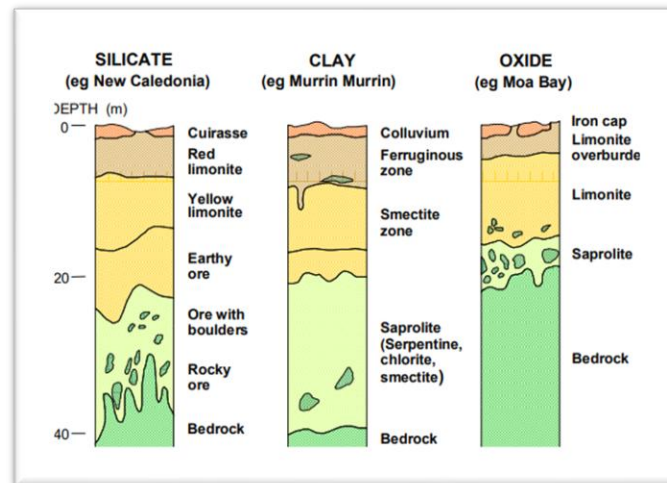
Penelitian ini diharapkan memiliki manfaat signifikan dalam beberapa aspek penting. Pertama, penelitian ini dapat mengidentifikasi kondisi morfologi di daerah XY, termasuk fitur geologi, topografi, dan morfologi yang unik dan menarik, yang dapat digunakan untuk merancang dalam kegiatan eksplorasi endapan nikel laterit. Selain itu, penelitian ini akan memberikan wawasan tambahan tentang kondisi geologi lokal seperti jenis batuan, persebaran unsur, kelerengan/*slope*, mineralogi, dan tingkat pelapukan yang mempengaruhi karakteristik endapan nikel laterit daerah AXZ, Kota Maba, Halmahera Timur, Maluku Utara. Penelitian ini juga penting untuk evaluasi lahan dan kondisi geologi daerah penelitian, Dengan demikian hasil penelitian dapat membantu dalam merancang strategi dalam kegiatan eksplorasi maupun estimasi sumberdaya. Manfaat-manfaat ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengembangan dan pengelolaan sumberdaya mineral ekonomis di daerah penelitian. Manfaat dari penelitian ini secara umum sebagai referensi yang berkaitan dengan hubungan morfologi dengan karakteristik laterisasi terhadap karakteristik endapan nikel laterit.

METODE PENELITIAN

Metode Deskriptif : Metode ini berupa pengumpulan data secara tidak langsung dan langsung. Pada pengumpulan data tidak langsung (Sekunder) dilakukan dengan kegiatan studi pustaka pada literatur maupun hasil penelitian terdahulu kemudian dengan kegiatan pengeboran eksplorasi untuk mendapatkan data profil laterit dan juga data geokimia. Pada pengumpulan data langsung (Primer) dilakukan dengan kegiatan pemetaan lapangan untuk mendapatkan data deskripsi litologi megaskopis, data elevasi dan kemiringan lereng (*slope*), data geomorfologi, data struktur, data persebaran litologi, dan dokumentasi lapangan serta pencatatan koordinat.

Metode Kuantitatif : Analisis kuantitatif dilakukan untuk mengetahui kelimpahan unsur serta karakteristik laterisasi daerah penelitian dengan menggunakan data hasil pengeboran eksplorasi maupun sampel batuan dari kegiatan pemetaan lapangan. Selanjutnya dilakukan pengujian laboratorium sehingga menghasilkan data jenis unsur, kadar unsur, dan ketebalan profil laterit yang kemudian akan dilakukan pendekatan statistik guna melihat hubungan distribusi unsur pada sebaran endapan laterit.

Metode Kualitatif : Analisis kuantitatif dilakukan setelah data primer dan sekunder didapatkan, kemudian dilakukan penilaian menggunakan parameter dari klasifikasi Van Zuidam (1985) untuk menentukan tipe morfologi berdasarkan tingkat kemiringan lereng dari



data geomorfologi. Lalu ada parameter dari klasifikasi Brand, dkk. (1998) untuk menentukan tipe endapan laterit berdasarkan persebaran unsur, persebaran ketebalan laterit dan data profil laterit, serta menggunakan pendekatan dari Babechuk, dkk (2014) untuk menentukan tingkat laterisasi. Hasil dari analisis ini dapat digunakan untuk mengetahui hubungan karakteristik laterisasi dengan kondisi morfologi pada daerah penelitian.

Gambar 1. Tipe endapan laterit (Brand, dkk.1998)

Prosedur Kerja

Bahan Penelitian

Tujuan penelitian ialah untuk mengetahui hubungan kondisi morfologi dengan karakteristik geokimia terhadap karakteristik endapan laterit dengan melihat pada aspek persebaran unsur, kondisi geomorfologi, litologi, hingga tipe endapan laterit. Untuk melakukan penelitian yang komprehensif, berikut ini adalah beberapa bahan penelitian yang menjadi fokus utama:

- Geologi, Fisiografi, dan Stratigrafi Regional
- Data DEM dan Kontur
- Data Elevasi dan Kelerengan
- Sampel Batuan *Fresh* dan endapan laterit
- Data XRF dan Collar
- Data petrografi

Selain itu dalam pelaksanaan penelitian tugas akhir ini juga dituangkan kedalam diagram alir penelitian agar dalam pelaksanaannya tetap terorganisir dan sistematis, serta juga sebagai pedoman dalam pengembangan kegiatan penelitian tugas akhir ini.

Tahap Persiapan dan Perencanaan

Pada Penelitian ini sebelum dilakukan kegiatan pengumpulan dan analisis data, terlebih dahulu dilakukan pengurusan administrasi baik dalam rangka pengajuan penelitian tugas akhir kepada pihak kampus maupun kepada pihak perusahaan. Selain itu juga terdapat berbagai persiapan agar tercapainya kelancaran kegiatan penelitian yang meliputi bimbingan dan diskusi mengenai topik dan daerah penelitian, persiapan alat dan bahan yang akan digunakan saat penelitian, Studi Pustaka terhadap daerah penelitian, Studi Literatur penelitian sebelumnya yang terkait, serta mempelajari tahapan eksplorasi dan bisnis produksi.

Berdasarkan dari gambaran kegiatan yang telah penulis jabarkan sebelumnya. Kegiatan Penelitian ini dilakukan mulai dari tahap Persiapan dan perencanaan, pengumpulan serta pengolahan data, analisis dan korelasi data, lalu pembuatan laporan akhir sebagai syarat sidang tugas akhir.

Pengumpulan Data

Tahapan pengumpulan data terbagi menjadi dua, yaitu pengambilan data langsung (primer) dan data tidak langsung (Sekunder). Pengambilan data langsung (primer) dilakukan dengan kegiatan pemetaan lapangan yang dilakukan kurang lebih selama 2 bulan di PT Antam Tbk – Unit Geomin untuk mendapatkan data deskripsi dan persebaran litologi, data elevasi dan kemiringan lereng (*slope*), data geomorfologi, data struktur, dan dokumentasi lapangan serta pencatatan koordinat.

Sedangkan pada pengambilan data tidak langsung (Sekunder) dilakukan dengan kegiatan studi pustaka pada literatur maupun hasil penelitian terdahulu kemudian dengan data kegiatan pengeboran eksplorasi oleh perusahaan terkait untuk mendapatkan data jenis dan kadar unsur, kedalaman profil laterit, serta data geokimia.

Pengolahan dan Analisis Data

Pengolahan data dilakukan secara sistematis dan terstruktur untuk mendukung analisis yang mendalam mengenai aspek-aspek geokimia, geomorfologi, dan geologi daerah penelitian. Untuk itu dilakukan beberapa langkah dalam pengolahan data yang dilakukan dari pengambilan data primer dan sekunder yaitu pengolahan data petrologi, geomorfologi, dan struktur hasil pemetaan lapangan, pengolahan data kontur dan DEM, pengolahan data studi regional serta literatur penelitian terdahulu, dan pengolahan data hasil kegiatan pengeboran.

Analisis data berdasarkan dari data petrologi, geomorfologi, dan struktur hasil pemetaan lapangan, lalu dilakukan pengelompokan profil laterit berdasarkan data pengeboran, pengujian dan analisis laboratorium terhadap sampel pengeboran dan pemetaan lapangan, analisis kuantitatif terhadap data unsur dan mineral, analisis data geokimia dan geologi, analisis kualitatif terhadap data geomorfologi, analisis kualitatif terhadap data geomorfologi, geologi, dan geokimia, serta Interpretasi dan Pembuatan Model Presentasi dan Publikasi.

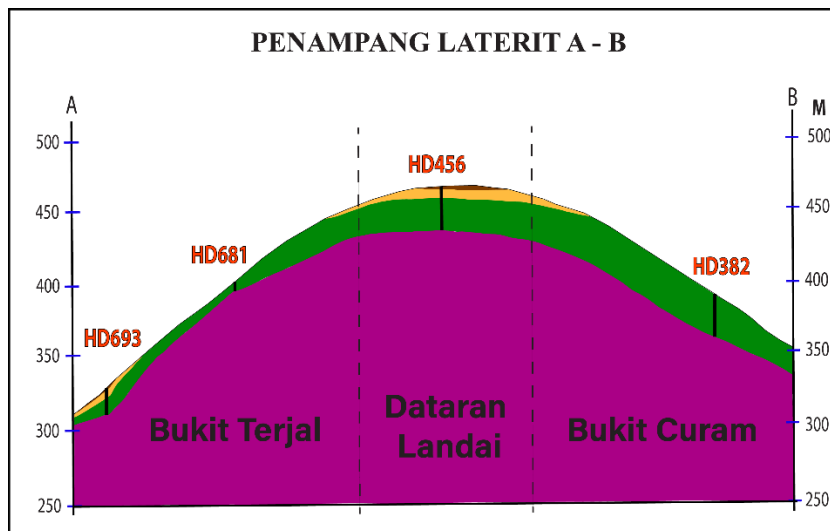
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Unsur pada Lokasi Lubang Bor

Pada umumnya, terdapat hubungan antara kemiringan lereng dengan zona laterisasinya yang disebabkan oleh perbedaan proses pelapukan yang tergantung pada karakteristik geomorfologi. Untuk membuktikan hal ini, digunakan analisis geokimia XRF dan analisis sayatan tipis petrografi. Analisis geokimia X-Ray Fluorescence (XRF) dilakukan pada sampel laterit hingga batuan induk dari lokasi pengeboran laterit.

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada lubang bor dibuat tabel persentase kadar unsur dan ketebalan zona laterit (Tabel IV.2), menunjukkan nilai dari unsur Nikel (Ni), Kobalt (Co), Besi Oksida (Fe_2O_3), Silikon Dioxide (SiO_2), Magnesium Oksida (MgO), dan Aluminium Oksida (Al_2O_3). Data yang disajikan ini berasal dari sampel pengeboran laterit dengan kode bor HD693, HD681, HD168, HD317, HD367, HD152, HD456, HD588, HD382, HD593.

Berdasarkan data bor dan analisis geokimianya dapat dilihat pada sayatan penampang A-A' (Gambar 39) memiliki beberapa zona laterit, yaitu zona top soil berwarna abu-abu, zona limonit berwarna coklat kekuningan, zona saprolit berwarna hijau muda dan zona bedrock berwarna ungu dan pembagian kemiringan lereng dari agak curam hingga terjal.



Gambar 2. Penampang Laterit A-A'
Sumber: Analisis Penulis (2024)

Distribusi Unsur pada Morfologi Bukit Curam

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada lubang bor yang termasuk kedalam morfologi bukit Curam pada 4 titik bor, didapat hasil persentase unsur Ni dan unsur lain.

Untuk ketiga lubang bor yang termasuk kedalam morfologi bukit Curam dengan litologi dominan yaitu dunit, pada bagian bedrock menunjukkan kaya akan SiO_2 dan MgO (SiO_2 lebih banyak), kemudian pada zona saprolit menunjukkan peningkatan pada Fe_2O_3 dan pengkayaan pada Ni. selanjutnya pada zona limonit terjadi peningkatan tinggi pada Fe_2O_3 dan Co terkhusus pada HD558 Co mengalami pengkayaan serta penurunan pada MgO , SiO_2 dan Ni. Pada zona *top soil*/tanah penutup hanya terdapat pada HD593 dengan peningkatan pada Al_2O_3 dan pengkayaan pada Fe_2O_3 serta penurunan lanjutan pada MgO , SiO_2 , Ni, dan Co.

Distribusi Unsur pada Morfologi Bukit Terjal

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada lubang bor yang termasuk kedalam morfologi bukit Terjal pada 4 titik bor, didapat hasil persentase unsur Ni dan unsur lain.

Untuk keempat lubang bor yang termasuk kedalam morfologi bukit terjal dengan litologi dominan yaitu lherzolit, pada bagian bedrock menunjukkan kaya akan SiO_2 dan MgO (SiO_2 lebih banyak), kemudian pada zona saprolit menunjukkan peningkatan pada Fe_2O_3 dan Ni khusus pada HD168 SiO_2 mengalami peningkatan. selanjutnya pada zona limonit terjadi peningkatan pada Fe_2O_3 , Ni dan Co pengecualian pada HD168 dimana Co mengalami penurunan. Pada zona *top soil*/tanah penutup terjadi peningkatan pada Al_2O_3 dan Fe_2O_3 serta penurunan lanjutan pada MgO , SiO_2 , Ni, dan Co, pengecualian pada HD HD168 Co mengalami peningkatan.

Distribusi Unsur pada Morfologi Dataran Landai

Berdasarkan hasil pengujian XRF pada lubang bor yang termasuk kedalam morfologi Dataran Landai pada 3 titik bor, didapat hasil persentase unsur Ni dan unsur lain.

Untuk ketiga lubang bor yang termasuk kedalam morfologi dataran landai dengan litologi yaitu dunit dan lherzolit, pada bagian bedrock menunjukkan kaya akan SiO_2 dan MgO (SiO_2 lebih banyak), kemudian pada zona saprolit menunjukkan peningkatan pada Fe_2O_3 , SiO_2 , Co serta pengkayaan pada Ni pengecualian pada HD152 Co mengalami penurunan, selanjutnya pada zona limonit terjadi peningkatan tinggi pada Fe_2O_3 , Al_2O_3 dan Co serta penurunan pada MgO , SiO_2 , dan Ni terkhusus pada HD456 Ni mengalami peningkatan lalu pada HD152 SiO_2 masih mengalami peningkatan. Pada zona *top soil*/tanah penutup terjadi peningkatan pada Al_2O_3 dan Fe_2O_3 serta penurunan pada MgO , SiO_2 , Ni, dan Co.

Karakteristik Endapan Nikel Laterit

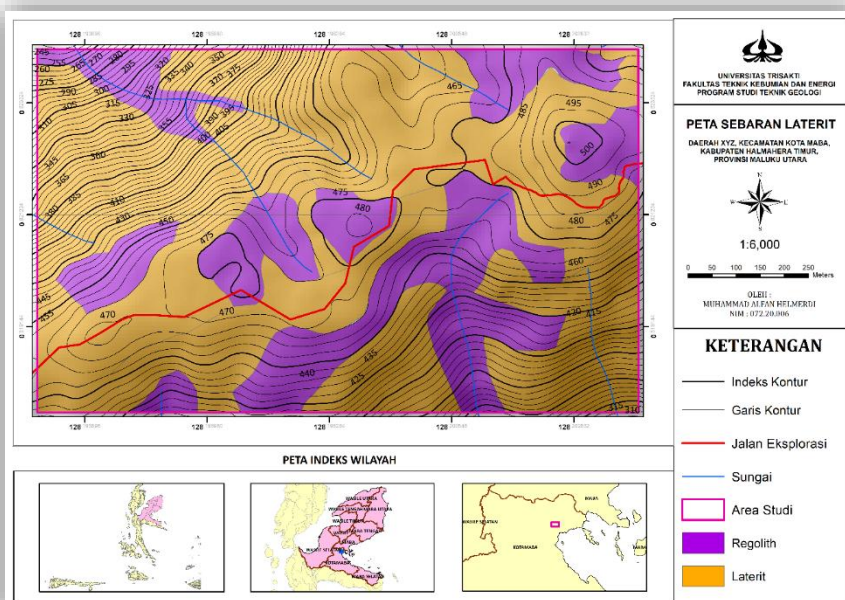
Bahas sampai bagan *Tipe Endapan laterit*

Sebaran Endapan Laterit

Widdowson (2009) Menjelaskan bahwa laterit adalah hasil pelapukan yang kaya akan zat besi, unsur oksida umumnya yang terjadi secara insitu disebabkan oleh kondisi iklim dan lapukan profil laterit mencakup daerah yang luas dengan kedalaman 1-20 meter.

Kondisi morfologi sangat mempengaruhi sirkulasi air beserta unsur lainnya. Daerah yang landai, air akan bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk masuk lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Pada daerah terjal, air akan mengalir di permukaan dan terjadi erosi yang intensif. Akumulasi endapan umumnya terdapat pada daerah yang landai sampai kemiringan sedang. Ketebalan endapan nikel laterit bervariasi yang juga dipengaruhi oleh kondisi morfologi pada setiap daerah (Kusuma.,dkk. 2019).

Kegiatan pengambilan data lapangan pada penelitian tugas akhir ini dilakukan dengan Pemetaan geologi dan pengamatan laterit di daerah penelitian yang berguna untuk pembuatan peta sebaran laterit pada (Gambar 33).



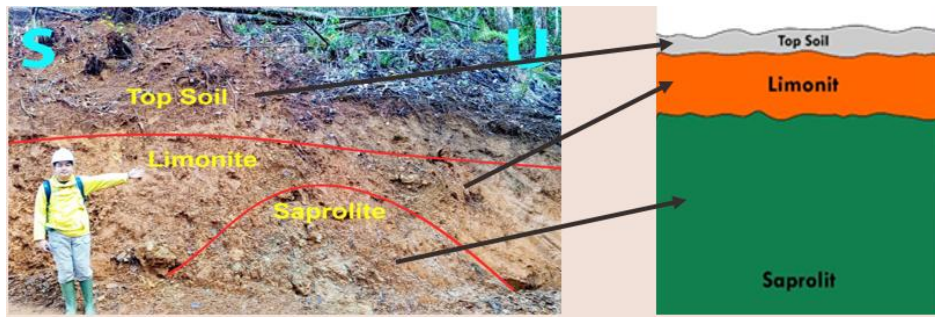
Gambar 3. Peta sebaran Laterit daerah penelitian

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Warna ungu pada peta mengartikan batuan fresh yang belum mengalami laterisasi, lalu warna coklat pada peta merupakan endapan laterit dengan berbagai tingkat kedalaman. Endapan laterit memiliki persentase hampir 70% pada daerah penelitian sedangkan bedrock atau batuan fresh menempati 20% dari total daerah penelitian.

Profil Endapan Nikel Laterit

Karakteristik profil endapan nikel laterit ditentukan berdasarkan hasil kajian pustaka, penelitian lapangan, dan data sekunder untuk mengetahui karakteristik profil endapan nikel laterit pada daerah penelitian. Secara umum profil endapan nikel laterit di daerah penelitian seperti pada (Gambar 4.2). Pada gambar di bawah merupakan salah satu lokasi pengamatan untuk batuan fresh/bedrock pada daerah penelitian,



Gambar 4. Profil Laterit daerah penelitian

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Zona Top Soil

Lapisan tanah penutup (Top Soil) Lapisan tanah penutup pada daerah penelitian (Gambar 4.3) memiliki karakteristik berwarna merah kecoklatan sampai coklat gelap, berbutir halus ($<1\text{mm}$), memiliki kekerasan yang lunak dan mengandung material humus organik serta fragmen material lepas dan material oksida besi berupa nodul besi yang terkandung dalam mineral goethite (2-20%), hematite (5-10%), serta manganese oxide (2-10%) lalu ketebalan lapisan ini berkisar 50-150 cm. Hasil analisa XRF pada zona top soil menunjukkan bahwa komposisi dominan terdiri dari Fe_2O_3 dan Al_2O_3 .

Zona Limonit

Zona Limonit pada daerah penelitian umumnya menunjukkan warna coklat kekuningan sampai kemerahan, berbutir halus-sedang (1-5mm), tingkat kekerasan yang lunak, ketebalan lapisan ini berkisar 3-12 meter, pada lapisan ini umumnya mengandung mineral goethite, hematite, talc, serpentin, manganese oxide, dan juga terdapat silika yang mengisi rekahan. Hasil analisa XRF pada zona limonit ini menunjukkan bahwa komposisi dominan terdiri dari Fe_2O_3 dan Al_2O_3 serta terdapat pengkayaan pada Co. Zona ini terbagi menjadi dua lapisan yaitu red limonit dan yellow limonit (Gambar 4.4)

a. Red Limonit

Red Limonit berwarna coklat gelap sampai kemerahan, berbutir halus sampai dengan halus-sedang (1-5 mm), tingkat kekerasan lunak, ketebalan berkisar 1-3 meter, umumnya mengandung hematit yang dominan sehingga menimbulkan warna kemerahan, lalu juga terdapat talc, manganese oxide, serta sedikit goetit dan silika.

b. Yellow Limonit

Yellow Limonit berwarna coklat gelap sampai kekuningan, berbutir halus-sedang (1-5 mm), tingkat kekerasan lunak-sedang, ketebalan berkisar 2-10 meter, umumnya mengandung goetit yang dominan sehingga menimbulkan warna kekuningan, lalu juga terdapat talc, manganese oxide, serta sedikit hematit, serpentin dan silika yang mengisi celah.

Zona Saprolit

Zona Saprolit daerah penelitian (Gambar 4.5) berwarna kuning gelap kehijauan sampai coklat kehijauan, berbutir sedang-kasar ($>2\text{ mm}$), memiliki kekerasan sedang-keras, pada zona ini masih terlihat fragmen batuan asal. Semakin ke arah bawah terlihat adanya gradasi ukuran butir yang menjadi lebih kasar, dengan perselingan bongkah. Semakin ke arah bawah rekahan yang dijumpai semakin intensif dan adanya gerusan pada fragmen dan bongkah. Ketebalan zona ini 10-20 meter, umumnya mengandung mineral serpentin, talc, chrysoprase, garnierit serta sedikit hematite, geotit, manganese, dan silika yang mengisi rekahan, lalu ketebalan lapisan ini berkisar 4-25 meter (Fritsch et al., 2016; Villanova-de-Benavent et al., 2014; Fu et al., 2018).

Kehadiran mineral silikat pada zona ini dipengaruhi oleh batuan asal yang telah mengalami pelapukan dari hidrotermal yang juga turut membawa Ni dalam mineral silikat lalu terendapkan pada zona saprolit. Hasil analisa XRF pada zona saprolit ini menunjukkan bahwa komposisi

dominan terdiri dari SiO_2 yang tinggi serta terdapat pengkayaan pada Ni.

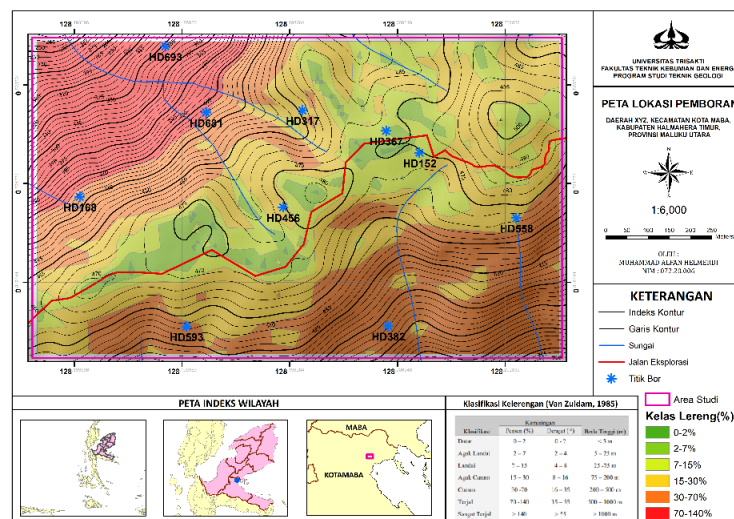
Batuan Induk

Batuan induk atau batuan dasar (Bedrock) pada daerah penelitian (Gambar 4.6) bisa tampak dalam bentuk bongkah-bongkah besar yang saling berdekatan maupun satu tubuh lapisan batuan yang sangat besar dimana merupakan bagian paling bawah pada profil nikel laterit dan merupakan sumber dari endapan nikel laterit berupa batuan dunit dan lherzolit yang bersifat *massive*, dan ada pula yang telah mengalami serpentinisasi dengan kondisi banyak dijumpai rekahan yang biasanya terisi oleh silika, ketebalan zona ini lebih dari 3 m.

Komposisi mineral batuan induk berupa olivin, klinopiroksen, ortopiroksen, dan serpentin. Hasil analisa XRF pada zona batuan dasar (bedrock) ini menunjukkan bahwa zona yang seluruh terbentuk dari batuan ultramafik mengandung dominan SiO_2 dan MgO , dimana pada wilayah yang tersusun dari litologi dunit mengandung lebih banyak Ni ($<0.025\%$) dan lebih sedikit Co ($<0.0045\%$) dibandingkan yang tersusun oleh lherzolit

Korelasi antara kemiringan Lereng dengan ketebalan endapan laterit

Pada umumnya, terdapat hubungan antara kemiringan lereng dengan zona laterisasinya yang disebabkan oleh perbedaan proses pelapukan yang tergantung pada karakteristik geomorfologi. Untuk membuktikan hal ini, ketebalan rata-rata dari zona laterit akan dihitung pada setiap karakteristik kemiringan lereng, Data yang dimiliki dapat dikombinasikan untuk memperoleh data kelerengan dan data ketebalan zona saprolit, limonit, dan *top soil*. Tabel 4.1 menyajikan kombinasi data ketebalan lapisan laterisasi serta kelas kelereng.

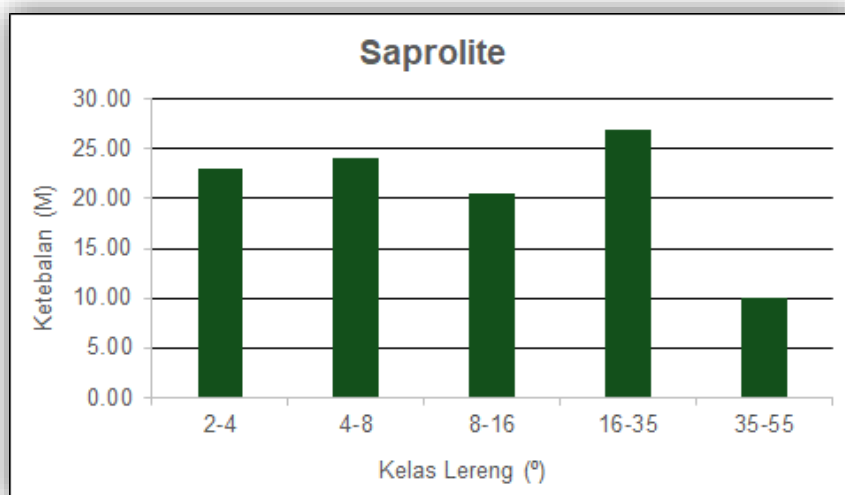


Hole ID	Ketebalan (M)				Kelas Lereng (°)
	Bedrock	Saprolite	Limonite	Top Soil	
HD382	3	26.00	*	*	16-35
HD558	3	20.50	10.50	*	8-16
HD593	3	19.40	2.60	2.00	16-35
HD168	3	27.00	1.00	1.00	16-35
HD317	3	15.00	12.00	1.00	8-16
HD682	3	6.00	*	*	35-55
HD693	3	10.00	3.00	1.00	35-55
HD152	3	19.45	5.00	*	4-8
HD367	3	23.00	3.65	1.35	2-4
HD456	3	24.00	4.00	1.00	4-8

Sumber: Data diolah dari PT Antam Tbk (2023) dan hasil analisis laboratorium

Zona Saprolit

Pada zona saprolit menggunakan data ketebalan dari 10 titik bor yang dibedakan berdasarkan tipe kelas lereng, dimana data ketebalan zona saprolit ini merupakan data rentang dari ketebalan terpendek sampai yang paling panjang pada semua titik bor yang terdapat zona saprolit pada daerah penelitian. Hasil korelasi ketebalan rata-rata zona saprolit pada setiap tipe kemiringan lereng dapat dilihat pada Gambar 4.2.



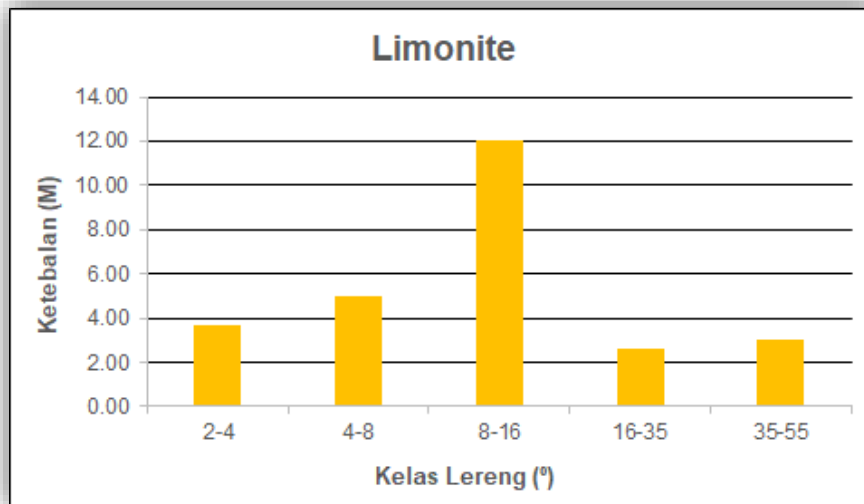
Gambar 6. Korelasi ketebalan rata-rata zona saprolit dengan tipe kemiringan lereng

Sumber: Analisis Penulis (2024)

Dari diagram batang pada gambar di atas terlihat pada kelas lereng $2^0 - 4^0$ dan $4^0 - 8^0$ yang merupakan tipe lereng landai memiliki ketebalan saprolit yang cukup tinggi, namun pada tipe lereng curam mengalami sedikit penurunan pada kelas lereng $8^0 - 16^0$ lalu pada kelas lereng $16^0 - 35^0$ dan memiliki ketebalan yang paling tinggi, yang kemudian pada kelas lereng $35^0 - 55^0$ dan yang merupakan tipe lereng terjal memiliki ketebalan yang paling rendah.

Zona Limonit

Pada zona limonit menggunakan data ketebalan dari 10 titik bor yang dibedakan berdasarkan tipe kelas lereng, dimana data ketebalan zona limonit ini merupakan data rentang dari ketebalan terpendek sampai yang paling panjang pada semua titik bor yang terdapat zona limonit pada daerah penelitian. Hasil korelasi ketebalan rata-rata zona limonit pada setiap tipe kemiringan lereng dapat dilihat pada Gambar 4.2.

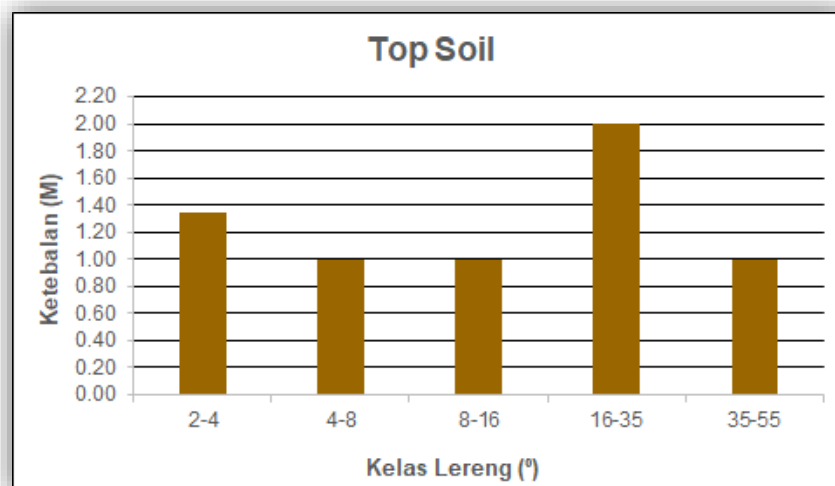


Gambar 7. Korelasi ketebalan rata-rata zona limonit dengan tipe kemiringan lereng
Sumber: Analisis Penulis (2024)

Dari diagram batang pada gambar di atas terlihat pada kelas lereng $2^0 - 4^0$ dan $4^0 - 8^0$ yang merupakan tipe lereng landai memiliki ketebalan limonit yang rendah, namun pada tipe lereng curam mengalami peningkatan yang signifikan pada kelas lereng $8^0 - 16^0$ lalu pada kelas lereng $16^0 - 35^0$ memiliki ketebalan yang jauh lebih rendah, yang kemudian pada kelas lereng $35^0 - 55^0$ yang merupakan tipe lereng terjal memiliki ketebalan yang tidak begitu jauh berbeda .

Zona Top Soil

Pada zona *top soil* menggunakan data ketebalan dari 10 titik bor yang dibedakan berdasarkan tipe kelas lereng, dimana data ketebalan zona *top soil* ini merupakan data rentang dari ketebalan terpendek sampai yang paling panjang pada semua titik bor yang terdapat zona *top soil* pada daerah penelitian. Hasil korelasi ketebalan rata-rata zona *top soil* pada setiap tipe kemiringan lereng dapat dilihat pada Gambar 4.2.



Gambar 8. Korelasi ketebalan rata-rata zona top soil dengan tipe kemiringan lereng
Sumber: Analisis Penulis (2024)

Dari diagram batang pada gambar di atas terlihat tipe lereng landai yaitu pada kelas lereng

$2^0 - 4^0$ memiliki ketebalan *top soil* yang cukup tinggi namun pada kelas $4^0 - 8^0$ ketebalan *top soil* menjadi lebih rendah, pada tipe lereng curam yaitu di kelas lereng $8^0 - 16^0$ memiliki ketebalan yang hampir serupa namun pada kelas lereng $16^0 - 35^0$ memiliki ketebalan yang paling tinggi, yang kemudian pada kelas lereng $35^0 - 55^0$ yang merupakan tipe lereng terjal memiliki ketebalan yang hampir serupa dengan kelas lereng lainnya.

Dari hasil korelasi ini, terlihat pada daerah penelitian didapati pada tipe lereng landai memiliki ketebalan endapan laterit yang cukup tebal, namun pada tipe lereng curam mengalami penebalan pada endapan laterit hingga pada tipe lereng curam terjal endapan laterit menjadi lebih tipis.

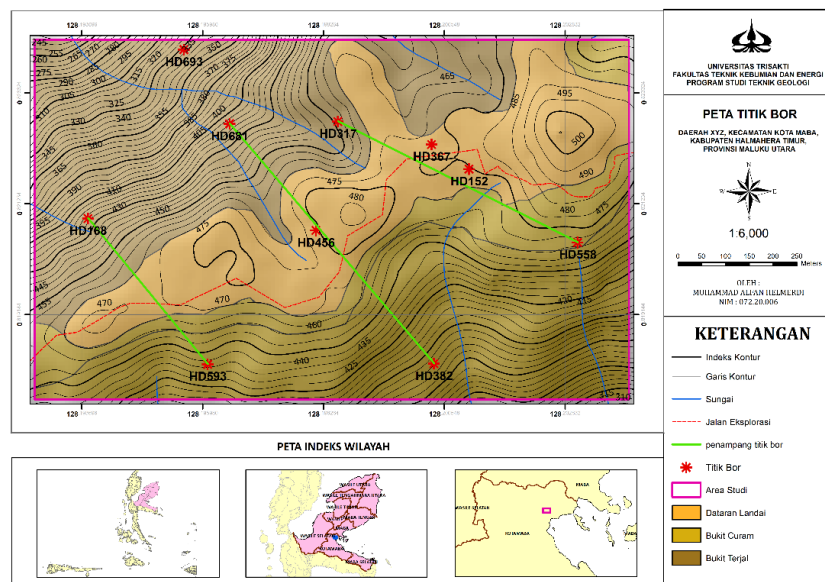
Hal ini menandakan bahwa endapan laterit pada daerah penelitian umumnya berkembang cukup baik pada kelerengan yang landai dan sangat baik pada kelerengan curam karena aspek dalam laterisasi seperti sirkulasi air berjalan perlahan sehingga membuat kesempatan lebih tinggi bagi proses alterasi hidrotermal maupun pelapukan mineral, lalu mengalami penipisan pada kelerengan yang terjal karena sirkulasi air yang berjalan lebih cepat dan intensif sehingga proses alterasi hidrotermal maupun pelapukan mineral yang memiliki peran dalam laterisasi menjadi kurang berkembang.

Tipe Endapan Nikel Laterit Daerah Penelitian

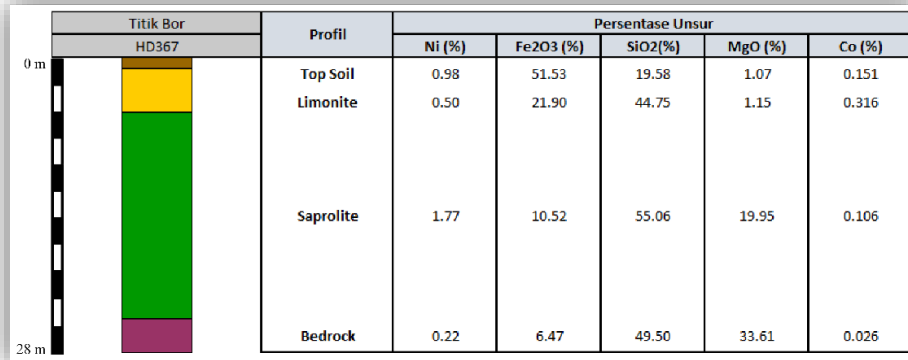
Penentuan tipe endapan nikel laterit daerah penelitian ditentukan berdasarkan hasil kajian pustaka, penelitian lapangan dan analisis XRF, dalam penelitian ini dilakukan analisis XRF pada zona profil endapan nikel laterit yaitu top soil, limonit, saprolit dan batuan induk.

Pada penentuan tipe endapan laterit pada penelitian ini merujuk pada pembagian tipe deposit laterit dari (Brand, dkk,1998). Berdasarkan hasil pengamatan lapangan menunjukkan profil endapan laterit didominasi oleh lapisan saprolit yang lebih tebal dari lapisan limonit yang lebih tipis dan kehadiran lapisan top soil yang tidak merata.

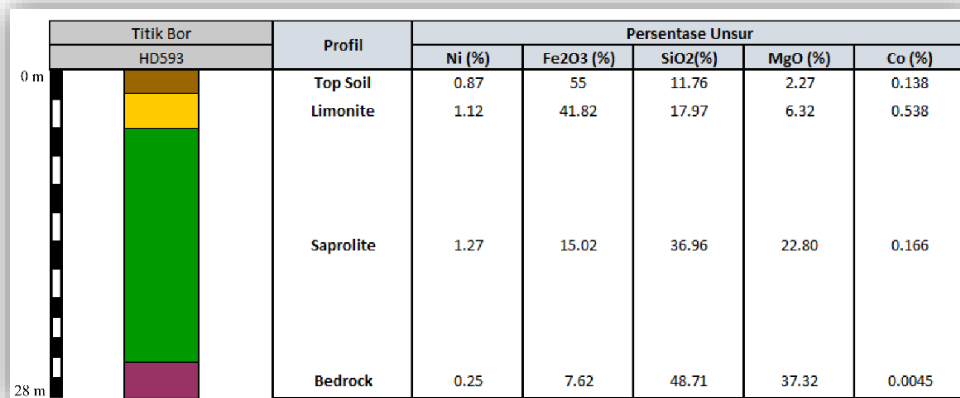
Berikut gambaran profil endapan nikel laterit daerah penelitian yang mewakili tiap morfologi yang nampak pada daerah penelitian pada titik bor hasil analisis XRF berdasarkan komposisi kimianya (Gambar 9, 10, dan 11).



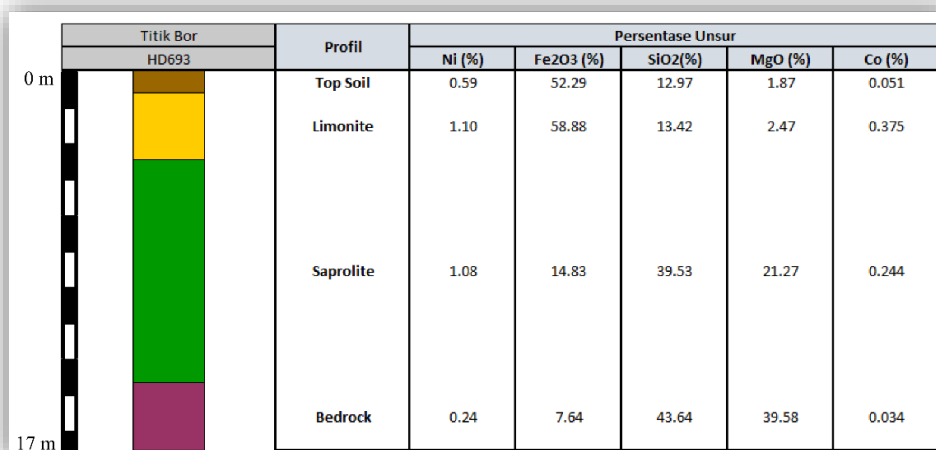
Gambar 9. Peta Penampang Sebaran Nikel Laterit Berdasarkan Titik Bor
Sumber: Analisis Penulis (2024)



Gambar 10. Profil endapan laterit dari titik bor HD367 (tidak terskalakan)
Sumber: Analisis Penulis (2024)

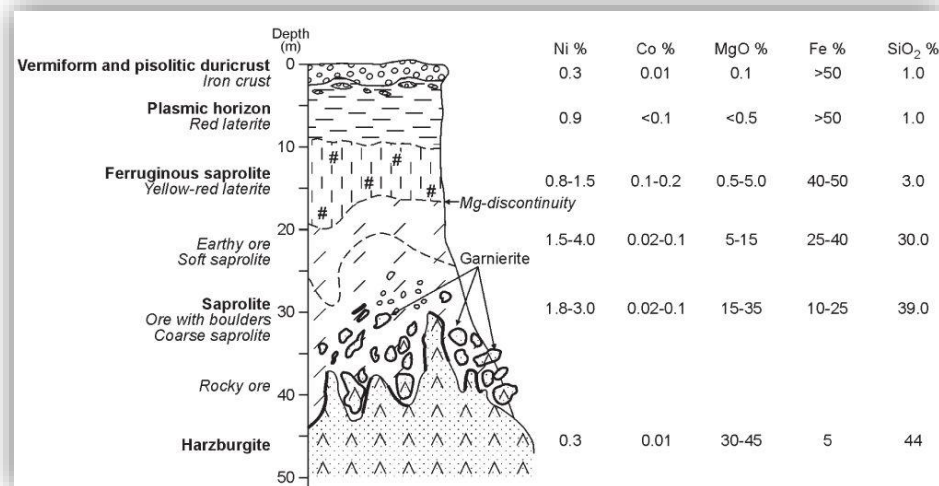


Gambar 11. Profil endapan laterit dari titik bor HD593 (tidak terskalakan)
Sumber: Analisis Penulis (2024)



Gambar 12. Profil endapan laterit dari titik bor HD693 (tidak terskalakan)
Sumber: Analisis Penulis (2024)

Berdasarkan hasil analisis XRF serta korelasi ketersediaan unsur-unsur dominan serta pengamatan lapangan maka tipe endapan nikel laterit daerah penelitian adalah tipe deposit hidrosilikat (hydrous silicate) deposit ini dikenal juga dengan nama endapan saprolit karna kenampakan profil endapan nikel laterit didominasi oleh lapisan saprolit yang tebal dan lebih tipis pada lapisan limonit, dengan mineral dominan yang telah mengalami alterasi seperti garnierite dan serpentin.



Gambar 13. Tipe deposit Hydrous silicate (Troly, dkk,1979)

Analisis Geokimia Laterisasi Endapan Nikel Laterit

Bahas data sekunder (XRF & collar) sampai bagan *indeks tingkat laterisasi*

Tingkat Pelapukan Endapan Laterit Daerah Penelitian

Profil geokimia endapan laterit daerah penelitian merupakan gambaran dari suatu kondisi bahwa perilaku atau kecenderungan pola kelimpahan unsur ke arah bawah permukaan yang dipengaruhi oleh proses pelapukan kimiawi.

Perilaku tersebut dipengaruhi oleh mobilitas unsur-unsur pada profil endapan laterit nikel yang diketahui dari tingkat unsur tertentu yang mengalami perpindahan akibat aliran airtanah maupun alterasi hidrotermal. Perilaku yang terjadi selama proses pelapukan dan lateritisasi berlangsung meliputi ; pelindian (leaching) terutama pada MgO dan SiO₂, proses pemerikayaan (supergen) terutama pada unsur Ni dan Co, serta residual unsur yang terutama dialami oleh Fe, dan Al.

Buat tabel korelasi unsur non-mobile vs unsur mobile serta korelasi terhadap karakteristik tiap zona laterit, korelasi unsur pada tiap zona laterit agar sesuai dengan pembahasan pelapukan laterisasi (tingkat pelapukan dan jenisnya dilihat dari komposisi unsur tiap zona laterit).

Pada diagram perbandingan diatas menunjukkan bahwa senyawa MgO dan SiO₂ yang semula pada zona bedrock dan saprolit cukup melimpah mengalami leach out kemudian bergerak dan mengendap kearah bawah seiring perpindahan menuju zona limonit dan top soil. Unsur Fe dan Al mengalami pengkayaan karena perubahan volume dan komposisi dari mineral asal menjadi oksida besi (Fe) dan mineral lempung (Al).

Apa yang telah terjadi pada unsur-unsur mobile seperti MgO dan SiO₂ yang mengalami leach out dengan unsur non-mobile seperti Al₂O₃+Fe₂O₃ yang mengalami peningkatan pada zona laterit yang lebih dangkal turut dipengaruhi oleh proses pelapukan serta arus hidrotermal yang menyebabkan terjadinya alterasi maupun ubahan pada mineral primer yang telah terbentuk sebelumnya pada batuan induk seperti Olivin dan piroksen.

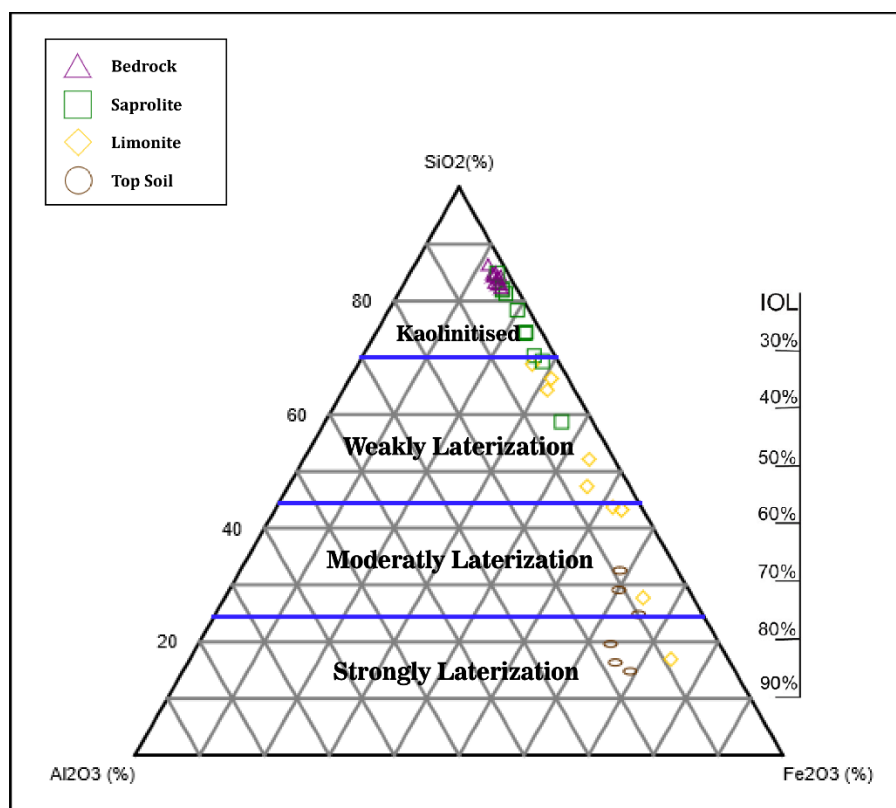
Derajat Laterisasi Endapan Laterit Daerah Penelitian

Menurut (Evans, 1993) terbentuk dari produk sisa pelapukan kimia batuan di permukaan bumi, di mana berbagai mineral primer mengalami ketidakstabilan karena adanya air, kemudian larut atau pecah dan membentuk mineral baru yang lebih stabil. Proses untuk menghasilkan endapan laterit (lateritisasi) merupakan pelapukan kimia yang terjadi pada iklim yang lembab dalam jangka waktu lama dan dengan kondisi tektonik yang relatif stabil untuk membentuk profil yang cukup tebal dengan karakteristik tertentu.

menurut Ahmad (2008) terdapat beberapa faktor yang berperan dalam proses lateriasasi seperti batuan asal, struktur, iklim, reaksi kimia, waktu, dan topografi. Pada penelitian ini akan berfokus pada faktor batuan asal serta perubahan kandungan kimiawi yang berlangsung pada daerah penelitian yang beriklim tropis dengan morfologi berbukit.

Dimana dengan menggunakan diagram laterisasi Babechuk, dkk, 2014 yang berfokus pada pelindihan SiO_2 dan pengkayaan Al dan Fe serta dengan panduan nilai IOL (Index of Lateritization) sebagai data empiris kuantitatif.

Buat tabel analisis laterisasi ternary plot dan korelasi datanya (data dari 10 titik bor)



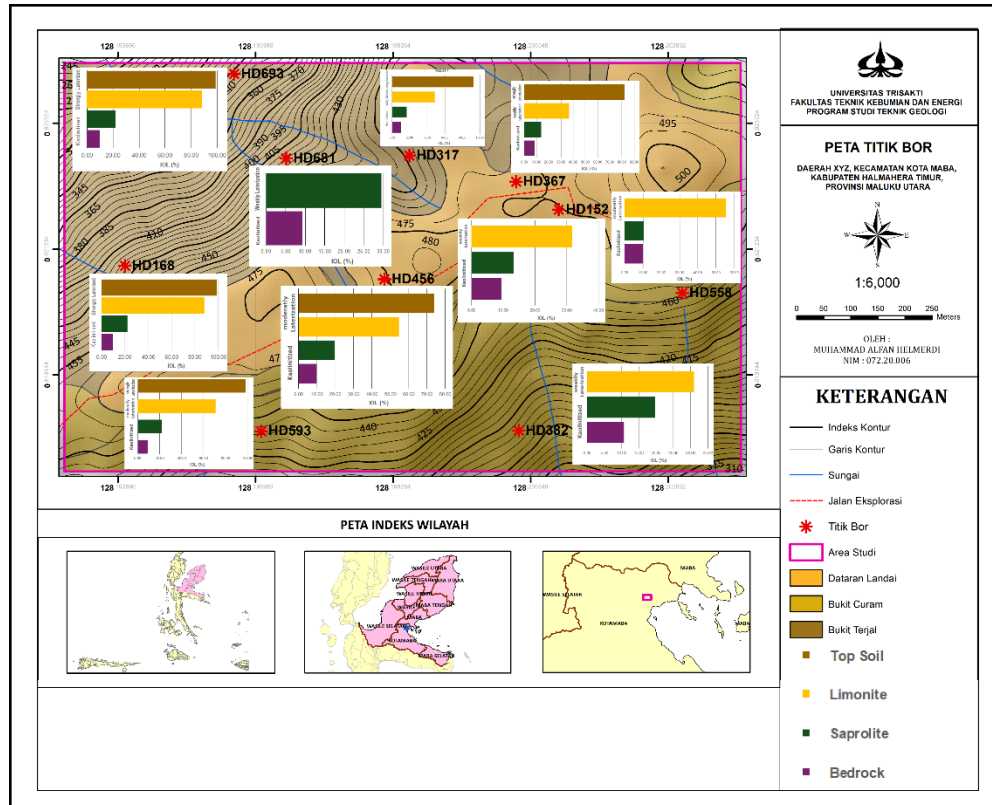
Gambar 14. Plot ternary derajat laterisasi.(Modifikasi Schelmann.,1981)

Pada diagram segitiga laterisasi diatas menunjukkan pada zona bedrock masih memiliki nilai IOL yang sangat rendah yang mencirikan kondisi kaolinitised atau berlimpahnya mineral ultramafik yang terdiri dari silika dan Al, kemudian pada zona saprolit mulai mengalami peningkatan pada nilai IOL yang mencirikan kondisi weak laterization meskipun dengan intensitas yang masih rendah dimana mulai terjadi pelindihan/penguraian pada SiO_2 serta proses laterisasi.

pada zona limonit nilai IOL meningkat cukup signifikan yang menunjukkan kondisi moderatly laterization dimana pelindihan SiO_2 berjalan cukup tinggi namun disini juga terjadi peningkatan signifikan pada Al dan Fe sebagai hasil proses laterisasi yang terus

berkembang.

Pada zona top soil masih terjadi peningkatan nilai IOL namun tidak signifikan sampai pada kondisi strongly laterization dimana pelindihan sisa SiO_2 sudah tidak begitu tinggi serta mulai terjadi pengkayaan pada Fe sebagai produk residual dari proses laterisasi yang mulai melambat.



Gambar 15. Peta morfologi overlay profil laterit dengan tingkat laterisasinya
Sumber: Analisis Penulis (2024)

Pada peta diatas yang menunjukkan profil laterit beserta tingkat laterisasinya berdasarkan nilai persentasi IOL (Index of Lateritization) pada tiap zona laterit. Dimana dapat diamati bahwa pada morfologi bukit terjal memiliki tingkat laterisasi nya cenderung sangat kuat (kecuali titik bor 681, namun tingkat laterisasi pada zona saprolit termasuk paling tinggi) terutama di zona top soil dan sebagian limonit, dibandingkan morfologi bukit curam dan dataran landai.

Namun pada morfologi bukit curam laterisasinya masih lebih berkembang daripada morfologi dataran landai terutama pada zona limonit (karena banyak titik bor pada kedua morfologi tersebut yang tidak didapati zona top soil).

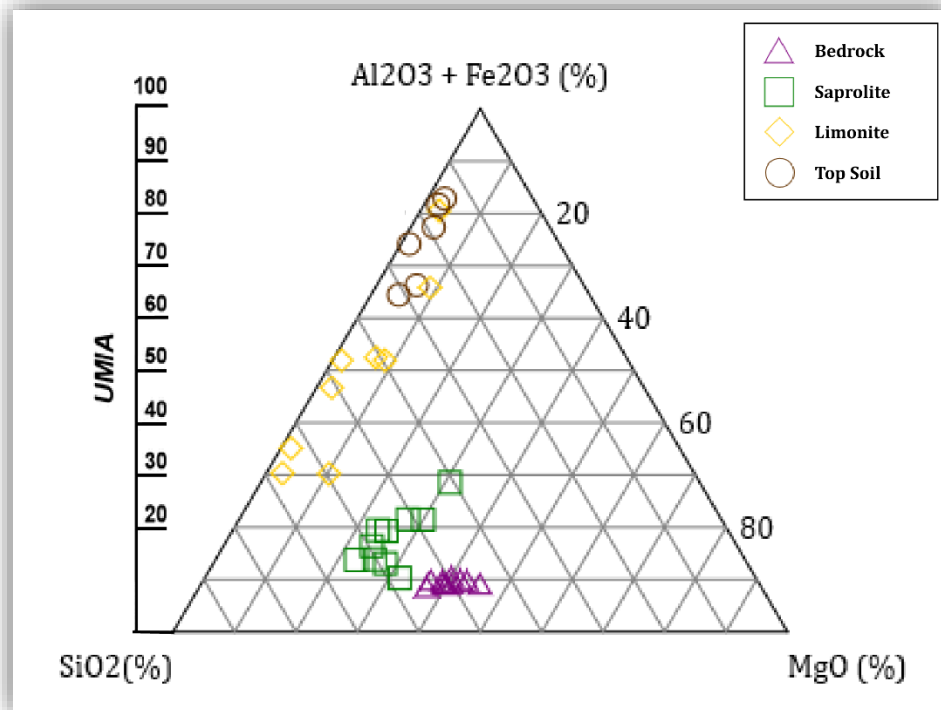
Indeks Tingkat Alterasi Ultramafic Daerah Penelitian

Pada daerah penelitian termasuk kedalam formasi ophiolit yang tersusun oleh batuan induk berupa batuan ultramafik yaitu peridotit (Iherzolite) dan dunit, dimana Secara umum batuan mafik memiliki lebih banyak Fe daripada Al, mengarah pada pembentukan laterit sedangkan granit, syenitic dan batuan argillaceous yang memiliki lebih banyak Al daripada Fe, mengarah pada pembentukan bauksit (Huang et al., 2024; Yudisatrio et al., 2022; Fu et al., 2018). Selain itu menurut app pada batuan ultramafik dominan terkandung Mg, SiO_2 , Al, Fe, Ca, dan Na, namun karena terjadi proses pelapukan dan alterasi hidrotermal yang mengakibatkan komposisi unsur-unsur tersebut berubah yang menyesuaikan juga dengan perombakan serta pembentukan mineral ubahan.

Pada penelitian ini mengingat batuan induk pada daerah penelitian terdiri dari batuan

ultramafik peridotit (lherzolit) dan dunit, maka untuk analisis alterasi akan berfokus pada komposisi SiO_2 , Al, Fe, dan Mg pada tiap-tiap zona laterit untuk mengetahui karakteristik proses laterisasi dan alterasi pada batuan induk ultramafik daerah penelitian dilihat dari perubahan komposisi menuju berlimpah akan Fe dan Al yang berkaitan dengan nilai UMIA (ultramafic index of alteration).

Buat tabel analisis UMIA ternary plot dan korelasi datanya



Gambar 16. Ploting Indeks alterasi ultramafik (Modifikasi Aiglsperger et al, 2016)

Pada diagram segitiga diatas menunjukkan pada zona bedrock nilai UMIA cenderung berada dibawah 10%, pada zona saprolit nilai UMIA meningkat sedikit ke 30% dengan kecendrungan SiO_2 lebih cepat leaching daripada MgO , pada zona limonit terjadi peningkatan nilai UMIA yang tidak merata dan drastis pada tiap titik bor sampai 80% dengan kecendrungan SiO_2 sudah lebih banyak leaching daripada MgO , pada zona top soil peningkatan nilai UMIA lebih stabil dengan kecendrungan kaya akan oksida besi (Fe) dan lempung (Al).

Dari hasil diagram ini juga dapat menunjukan bahwa melihat batuan induk daerah penelitian yang dominan dari batuan ultramafik dengan perpindahan besar pada MgO dan SiO_2 yang juga selaras dengan tipe endapan laterit tipe hidrosilikat (hydrous silicate) yang dicirikan dengan perpindahan silika yang tinggi pada proses laterisasi sehingga menciptakan zona laterit yang kaya akan mineral ubahan silika seperti serpentin, garnierit, chrysotile, dan talc.

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dan pengamatan yang telah dilakukan pada lokasi penelitian serta hasil dari analisis laboratorium. Adapun kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini didapatkan, yaitu: Morfologi daerah penelitian didominasi oleh lembah perbukitan dengan kemiringan lereng dominan termasuk Curam-terjal, lalu terdapat dua aliran sungai yaitu sub-rektangular dan sub-paralel dengan stadia daerah muda-dewasa, kemudian untuk struktur geologi yang berkembang terdiri dari kekar-kekar berpasangan pada daerah penelitian yang memiliki arah tegasan utama relatif Barat Laut – Tenggara, serta terdapat tiga Satuan Geomorfologi yaitu Satuan Geomorfologi Bukit Terjal, Satuan Geomorfologi Bukit Curam,

Satuan Geomorfologi Dataran Landai. Daerah penelitian termasuk kedalam Formasi Kompleks Batuan Ultrabasa, terbagi atas 2 satuan yaitu satuan Dunit dan Lherzolit berdasarkan klasifikasi batuan beku ultramafic yaitu Streckeisen, (1975) dimana mineral penyusun batuan didominasi oleh mineral serpentin, klinopiroksin, ortopiroksin, olivin, dan opac. Karakteristik endapan nikel laterit pada daerah penelitian secara umum terdapat empat zona laterit yaitu, zona bedrock yang didominasi batuan ultramafik dunit dan lherzolit yang berlimpah mineral olivin, klinopiroksin dan ortopiroksin, zona saprolit dengan ketebalan 6-27m yang dominan mineral serpentin, chrysoprase, garnierit dan silika yang mengisi rekahan, zona limonit dengan ketebalan 3-12m yang dominan mineral talc, manganese oxide, goetit, hematit dan silika, dan zona top soil dengan ketebalan 50-120cm yang dominan mineral goethite, hematite, dan manganese oxide. Berdasarkan hasil analisis XRF yang dikorelasikan dengan persebaran ketebalan profil laterit maka tipe endapan nikel laterit daerah penelitian adalah tipe deposit hidrosilikat (hydrous silicate) deposit ini dikenal juga dengan nama endapan saprolit karna kenampakan profil endapan nikel laterit didominasi oleh lapisan saprolit yang tebal dan lebih tipis pada lapisan limonit, dengan mineral dominan yang telah mengalami alterasi seperti garnierit dan serpentin.

Hubungan kelerengan/morfologi terhadap sebaran nikel laterit yaitu pada semakin curam lereng maka semakin tebal zona saprolitnya dibandingkan pada kelerengan lebih landai serta semakin terjal lereng maka endapan laterit menjadi semakin tipis, Kandungan unsur Ni mengalami pengkayaan di zona saprolite lalu unsur lalu unsur Co mengalami pengkayaan di zona limonit sedangkan unsur Fe mengalami pengkayaan di zona top soil. Hubungan kelerengan/morfologi terhadap tingkat pelapukan endapan nikel laterit yaitu semakin curam hingga terjal lereng maka proses laterisasi semakin berkembang dibandingkan pada kelerengan yang semakin landai, berdasarkan proses perpindahan unsur Mobile ($MgO+SiO_2$) dengan Non-Mobile ($Al_2O_3+Fe_2O$) pada endapan laterit zona bedrock dan saprolit mengalami pelapukan yang kurang berkembang dibandingkan zona limonit yang berkembang pelapukannya kemudian pada zona top soil yang pelapukan nya melambat karena hanya menyisakan material residual seperti Fe dan Al, hal ini menunjukan pada area yang dengan kelerengan landai-curam yang dapat lebih berkembang proses pelapukan serta tingkat laterisasi yang jauh lebih tinggi akan menghasilkan endapan laterit yang lebih tebal dan berkembang pada tiap zona laterisasinya, serta menjadi lebih berlimpah pada unsur logam ekonomis seperti Ni, Co, dan Fe.

DAFTAR PUSTAKA

- Assegaf, A. (2017). Karakter hidrogeologi zonasi akifer (0–20 m) berdasarkan geologi, hidrokimia-isotop dalam airtanah Jakarta Utara. Universitas Padjajaran.
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, 9(2), 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Freyssinet, P., Butt, C. R. M., Morris, R. C., & Piantone, P. (2005). Ore-forming processes related to lateritic weathering. In J. W. Hedenquist, J. F. H. Thomson, R. J. Goldfarb, & J. P. Richards (Eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume* (pp. 681–722). Economic Geology Publishing Company.
- Fritsch, E., Juillot, F., Dublet, G., Fonteneau, L., Fandeur, D., Martin, E., Caner, L., Auzende, A. L., Grauby, O., & Beaufort, D. (2016). An alternative model for the formation of hydrous Mg/Ni layer silicates (“deweylite”/“garnierite”) in faulted peridotites of New Caledonia: I. Texture and mineralogy. *European Journal of Mineralogy*, 28(2), 295–311. <https://doi.org/10.1127/ejm/2015/0027-2503>
- Fu, W., Dong, G., Yang, L., Wen, B., & Bagas, L. (2018). Garnierite mineralization from a serpentinite-derived lateritic regolith, Sulawesi Island, Indonesia: Mineralogy, geochemistry and link to hydrologic flow regime. *Journal of Geochemical Exploration*, 188, 240–259. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.01.029>
- Hartami, P. N., Maulana, Y., Purwiyono, T. T., Tuheteru, E. J., Kusumo, D. H., Putra, D., & Burhannudinnur, M. (2023). An analysis of blasthole condition towards toxic fumes generation from blasting activities in surface mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1175(1), 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1175/1/012003>
- Hills, E. S. (2024). *Elements of structural geology* (1st ed.). Taylor & Francis.
- Huang, J., Liang, X., Yin, R., Xiao, C., Wang, H., Liu, X., Chen, X., & Tan, W. (2024). Nickel enrichment during lateritization of ophiolitic ultramafic rocks: A case study from the Kelurahan Pondidrha laterite profile in Sulawesi, Indonesia. *Ore Geology Reviews*, 170, 106170. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.106170>
- Inagaki, K., & Sadohara, S. (2018). Slope management planning for the mitigation of landslide disaster in urban areas. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 5(1), 183–190. <https://doi.org/10.3130/jaabe.5.183>
- Li, Z., Xu, J., Dong, G., Fu, W., Zhang, Z., & Shan, W. (2019). Weathering of ophiolite remnant and formation of Ni laterite in a strong uplifted tectonic region (Yuanjiang, Southwest China). *Minerals*, 9(1), 51. <https://doi.org/10.3390/min9010051>
- Marsh, E. E., & Anderson, E. D. (2011). Ni–Co laterite deposits (U.S. Geological Survey Open-File Report 2011–1259). U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov/of/2011/1259/>
- Maurizot, P., Sevin, B., Lesimple, S., Bailly, L., Iseppi, M., & Robineau, B. (2019). Mineral resources and prospectivity of the ultramafic rocks of New Caledonia. In N. Arculus, C. Ballhaus, J. A. Mavrogenes, J. A. Pearce, & H. Shimizu (Eds.), *A new vision of New Caledonia as a cornerstone of Gondwana* (pp. 247–277). Geological Society of London.

<https://doi.org/10.1144/SP478.5>

- Pertiwi, I. I., & Marniati. (2024, April 24). Waspada aktivitas tektonik di Laut Banda Utara, perairan timur Sultra. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Diambil 10 Desember 2024.
- Prakoso, S., & Burhannudinnur, M. (2020). Effects of pore complexity on saturated P-wave velocity and its impact in estimating critical porosity. *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, 27(1), 335–343. <https://doi.org/10.1080/25765299.2020.1824394>
- Quast, K., Addai-Mensah, J., Skinner, W., Zanin, M., & Gridley, S. (2015). A review of the processing of nickel laterite ores: Part 1 – Mineralogy and pre-processing. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 36(3), 135–155. <https://doi.org/10.1080/08827508.2014.889355>
- Tong, X., Song, S., He, J., Rao, F., & Huang, K. (2015). Beneficiation of nickel in a low grade nickel laterite ore. *Minerals Engineering*, 85, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2015.10.018>
- Triany, N., Dwi Nuryana, S., Adhitama, R., Guntoro, A., Yudisatrio, M. H., & Daned, R. H. (2021). Karakteristik DAS Cisadane berdasarkan parameter morfometri di daerah Rumpin–Ciseeng, Kabupaten Bogor Barat. *PETRO: Jurnal Ilmiah Teknik Perminyakan*, 10(3), 125–137.
- Trotet, F., Launay, S., Lenihan, D., Cassard, D., Labriki, M., & Sevin, B. (2015). Altération et enrichissement en nickel dans les profils latéritiques de Nouvelle-Calédonie. *Géologie de la France*, 2015(1), 17–22.
- Van der Ent, A., Baker, A. J. M., Reeves, R. D., Pollard, A. J., & Schat, H. (2013). Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction. *Plant and Soil*, 362(1–2), 319–334. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1287-3>
- Villanova-de-Benavent, C., Proenza, J. A., Galí, S., García-Casco, A., Tauler, E., Lewis, J. F., & Longo, F. (2014). Garnierites and garnierites: Textures, mineralogy and geochemistry of garnierites in the Falcondo Ni-laterite deposit, Dominican Republic. *Ore Geology Reviews*, 58, 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2013.10.008>
- Yudisatrio, M. H., Saepuloh, A., Sunarto, Ohno, S., Kamal, M., & Murakami, M. (2022). Mineralogical and geochemical characteristics of weathering profiles at Weda Bay nickel laterite deposit, Halmahera, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1071(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1071/1/012002>