

Kontrol Morfologi pada Profil Vertikal Endapan Nikel Laterit Pulau Kabaena bagian Selatan, Sulawesi Tenggara

Jana Cindy Salinding¹, Masri¹ , Hasria¹, Ujang Sugiarno²

¹Program Studi Teknik Geologi, Universitas Halu Oleo, Kendari, Sulawesi Tenggara, Indonesia

²PT. Arga Morini Indah, Kabaena, Sulawesi Tenggara, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received: April 24, 2025

Accepted: July 21, 2025

Published: July 28, 2025

Keywords:

nikel laterit
morfologi
perbukitan miring
kompleks ultramafik
kabaena

Corresponding author:

Masri

Email: masri@uho.ac.id

Read online:



Scan this QR code
with your smart
phone or mobile
device to read online.

Copyright © 2025 Authors



This work is
licensed under
a Creative Commons
Attribution-ShareAlike 4.0 International
License.

ABSTRAK

Pulau Kabaena bagian selatan di Sulawesi Tenggara merupakan bagian dari Lajur Ophiolit Sulawesi Timur yang kaya akan potensi endapan nikel laterit, namun kontrol morfologi terhadap ketebalan dan distribusi kadar nikel di wilayah ini masih belum dipahami dengan baik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kontrol variasi morfologi terhadap karakteristik endapan nikel laterit, khususnya terkait ketebalan laterit dan kadar nikel yang terkandung. Analisis dilakukan dengan menggunakan data morfometri dan morfografi berbasis model elevasi digital (DEM) serta data geokimia 78 titik pengeboran eksplorasi. Selain melalui sayatan penampang, distribusi ketebalan dan kadar nikel pada laterit berdasarkan variasi kemiringan lereng dan elevasi juga melalui analisis regresi linear. Profil nikel laterit dapat diklasifikasikan berdasarkan variasi kelas lereng (miring, agak curam, hingga curam), menunjukkan variasi profil dan zona pengayaan nikel yang berbeda. Hasil penelitian juga menunjukkan korelasi positif elevasi terhadap ketebalan laterit ($R=0.52$), sedangkan kadar nikel menunjukkan korelasi negatif cenderung menurun pada elevasi yang lebih tinggi ($R=-0.56$). Di sisi lain, kemiringan lereng menunjukkan korelasi lemah terhadap ketebalan laterit ($R=0.20$) dan kadar nikel ($R=0.14$). Hal ini mengindikasikan bahwa variasi kemiringan lereng tidak mempengaruhi secara signifikan baik ketebalan laterit maupun kadar nikel bila dibandingkan dengan kontrol elevasi. Pada morfologi miring, kadar nikel rata-rata relatif lebih tinggi dibandingkan pada morfologi curam dan agak curam, diikuti ketebalan laterit yang bervariasi. Karakteristik profil laterit yang cenderung berbeda pada elevasi dan kemiringan lereng yang sama menunjukkan distribusi nikel laterit juga dikontrol oleh faktor geologi lainnya.

ABSTRACT

The southern part of Kabaena Island in Southeast Sulawesi lies within the East Sulawesi Ophiolite Belt and hosts abundant potential for lateritic nickel deposits; yet morphological controls on the thickness and distribution of nickel grades remain poorly understood. This study analyses how variations in topography influence lateritic nickel deposits, focusing on laterite thickness and nickel grade, using morphometric and morphography data derived from a digital elevation model (DEM) and geochemical data from 78 exploration drill holes. Besides examining cross sections, we assessed the distribution of laterite thickness and nickel grade by slope angle and elevation through linear regression. Lateritic nickel profiles can be classified by slope classes (gentle, moderately steep, steep), each showing distinct profile forms and nickel enrichment zones. The results indicate a positive correlation between elevation and laterite thickness ($R=0.52$), whereas nickel grade shows a negative trend, decreasing at higher elevations ($R=-0.56$). In contrast, slope exhibits weak correlations with both laterite thickness ($R=0.20$) and nickel grade ($R=0.14$), suggesting slope variation does not significantly influence either parameter relative to elevation. On gentle slopes, average nickel grades are relatively higher than on steep and moderately steep slopes, with laterite thickness varying. The observation that laterite profiles differ at similar elevations and slopes implies that other geological factors also influence the distribution of lateritic nickel.

How to cite: Salinding, J.C., Masri, Hasria, dan Sugiarno, U. (2025). Kontrol morfologi pada profil vertikal endapan nikel laterit Pulau Kabaena bagian selatan, Sulawesi Tenggara. *OPHIOLITE: Jurnal Geologi Terapan*, 7(1), pp. 31-41. <https://doi.org/10.56099/ophi.v7i1.p31-42>

1 Pendahuluan

Indonesia dengan kondisi geologinya yang kompleks, menyimpan potensi sumber daya alam yang sangat besar, salah satunya adalah endapan nikel laterit yang berasal dari pelapukan batuan ultramafik (Ahmad, 2006). Salah satu Pulau dengan potensi endapan nikel laterit adalah Pulau Sulawesi, terutama di Lengan Timur dan Lengan Tenggara. Lengan Tenggara Sulawesi, mencakup Pulau Kabaena, Wawonii, dan Kolaka. Pulau-pulau tersebut merupakan bagian dari Kompleks Ultramafik. Simandjuntak dkk. (1993) menyebutkan Kompleks Ultramafik Lengan Tenggara Sulawesi terdiri dari: peridotit, dunit, werlit, harzburgit, dan serpentinit. Kondisi geologi ini mengindikasikan potensi besar pembentukan endapan nikel laterit yang dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan industri.

Daerah penelitian terletak di Selatan Pulau Kabaena. Secara administrasi berada di Desa Wulu, Kecamatan Talaga Raya, Kabupaten Buton Tengah. Pulau Kabaena merupakan bagian dari lajur Ofiolit Sulawesi Timur, berupa Kompleks Ultramafik yang tersusun atas harzburgit, dunit, werlit, lertzolit, serpentinit, gabro, basalt, dolerit, diorit, mafik meta, dan amfibolit yang diperkirakan berumur Kapur (Simandjuntak dkk., 1993). Batuan ultramafik di daerah penelitian terdiri atas peridotit terserpentinisasi (harzburgit dan lertzolit terserpentinisasi) dan serpentinit. Perbedaan karakteristik batuan tersebut menghasilkan pengayaan kadar nikel yang berbeda. Dirman (2023) menyimpulkan terdapat kontrol morfologi terhadap karakteristik profil nikel laterit, sayangnya, analisisnya tidak dilakukan lebih mendalam, sedangkan Hasria dkk. (2021b) lebih berfokus pada sebaran lateral nikel laterit terhadap kemiringan lereng.

Kontrol morfologi sangat penting pada pembentukan endapan nikel laterit. Perbedaan morfologi dapat mempengaruhi intensitas pelapukan batuan dasar serta distribusi nikel pada profil nikel laterit (Cathelineau dkk., 2024). Ahmad (2006) menjelaskan bahwa kelas lereng yang lebih curam akan menghasilkan akumulasi nikel laterit yang lebih tinggi pada lapisan atas. Hal ini bersesuaian dengan peneliti terdahulu seperti Erwin dkk. (2023) menjelaskan bahwa semakin besar persen lereng (terjal) maka tebal laterit yang terbentuk semakin tipis, sebaliknya, jika semakin kecil persen lereng (landai) maka ketebalan laterit semakin besar. Selain itu, kontrol rekahan baik dengan densitas rendah maupun tinggi menyebabkan kadar nikel meningkat seiring tebalnya endapan nikel laterit yang terbentuk, karena di sepanjang rekahan juga terbentuk mineral pembawa nikel seperti garnierit (Syafrizal dkk., 2009). Pada variasi morfologi, kadar nikel tertinggi

terakumulasi paling tinggi pada zona saprolit, sedangkan besi terakumulasi pada zona limonit (Hasria dkk., 2024a). Dalam kegiatan eksplorasi pada morfologi terjal akan menghadapi kendala teknis, seperti aksesibilitas yang sulit dan potensi kehilangan laterit akibat tingginya proses erosi. Hal ini tentunya akan mempengaruhi *recovery* estimasi sumberdaya. Oleh karena itu, studi kontrol morfologi pada profil nikel laterit sangat penting dilakukan.

Berbeda dengan penelitian terdahulu (Hasria dkk., 2024a, Erwin dkk., 2023, Hasria dkk., 2021b), penelitian ini berfokus pada penentuan kontrol morfologi secara kuantitatif berdasarkan nilai korelasi parameter morfologi (elevasi dan kemiringan lereng) terhadap kualitas endapan nikel laterit (kadar nikel rata-rata dan ketebalan laterit) menggunakan regresi linear. Penampang sayatan juga digunakan sebagai validasi analisis kontrol dengan dua skenario: penampang yang memotong data pengeboran pada kelas morfologi yang sama sebagai kontrol dan penampang memotong titik bor pada berbagai variasi elevasi dan kelas lereng.

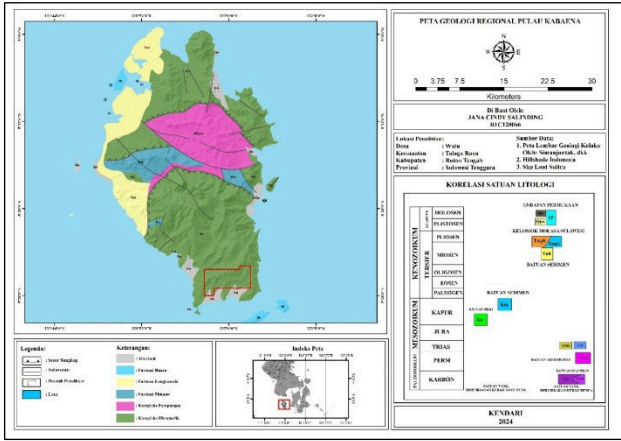
2 Geologi daerah penelitian

Batuan tertua yang ditemukan di Pulau Kabaena terdiri dari batuan Pra-Tersier berumur Kapur, meliputi Kompleks Ultramafik, Formasi Matano, serta Kompleks Pompango yang terbentuk sejak zaman Kapur hingga Paleosen. Selain itu, terdapat pula batuan Tersier berumur Miosen dari Formasi Langkowala, dan batuan termuda berupa Aluvium yang berumur Kuartar (Simandjuntak dkk., 1993). Secara regional, urutan stratigrafi dari yang tertua hingga termuda mencakup Kompleks Ultramafik (Ku), Formasi Matano (Km), Kompleks Pompango (MTpm), Formasi Langkowala (Tml), Formasi Buara (Ql), serta Aluvium (Qa).

Kompleks ultramafik di Pulau Kabaena merupakan bagian dari Lajur Ofiolit Sulawesi Timur (Kadariusman dkk., 2004). Batuan penyusunnya meliputi harzburgit, dunit, werlit, websterit, serpentinit, dan piroksinit. Batuan mafik terdiri atas gabro, basalt, dolerit, mikrogabro, dan amfibolit. Sedimen pelagik di wilayah ini terdiri atas batugamping laut dalam dan rijang radiolaria. Umur Kompleks Ultramafik diperkirakan berasal dari periode Kapur (Surono dan Hartono, 2013). Secara umum, kompleks ultramafik di daerah penelitian telah mengalami proses serpentinisasi. Di bagian utara Pulau Kabaena, ditemukan batuan peridotit dan dunit yang telah terserpentinisasi, serta satuan serpentinit (Hasria dkk., 2021a).

Kompleks Ultramafik pada daerah penelitian terdiri atas satuan lertzolit terserpentinisasi, serpentinit, harzburgit dan dunit. Satuan lertzolit terserpentinisasi dan serpentinit dijumpai pada

morfologi pedataran yang terletak pada ujung selatan Pulau Kabaena (**Gambar 1**). Hasil deskripsi mikroskopis menunjukan hadirnya vein serpentin (lizardit) dengan relief rendah yang tidak teratur sehingga kenampakan mineral utama sudah mengalami perubahan yang signifikan ([Hasria dkk., 2024b](#)). Pada morfologi perbukitan dengan lereng curam hingga terjal dijumpai satuan harzburgit terserpentinisasi dan serpentinit. Hasil analisis petrografi pada sampel menunjukan bahwa batuan tersebut telah mengalami serpentinisasi yang tinggi. Dunit dijumpai pada area puncak perbukitan dengan morfologi landai ([Dirman, 2023](#)).



Gambar 1 Peta geologi dan kolom stratigrafi regional Pulau Kabaena ([Simandjuntak dkk., 1993](#))

3 Metode Penelitian

Penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahap utama yaitu tahap pengumpulan data, tahap pengolahan, dan tahap analisis data. Penelitian ini menggunakan data primer dan data sekunder. Data primer berupa data litologi, deskripsi profil laterit, dan deskripsi morfologi. Data sekunder merupakan data 78 titik bor eksplorasi yang merepresentasikan variasi morfologi berupa data *collar*, *assay*, *survey*, dan deskripsi *core box*. Data *assay* sampel pengeboran terdiri dari kandungan nikel (Ni), besi (Fe), kobalt (Co), alumina (Al_2O_3), magnesium oksida (MgO), dan silika (SiO_2).

Analisis parameter morfologi terdiri dari variasi elevasi (morfografi) dan kelas kemiringan lereng (morfometri). Penentuan morfometri dan morfografi didasari pada data Digital Elevation Model (DEM) dengan perangkat lunak ArcGIS 10.8 menggunakan klasifikasi [van Zuidam \(1986\)](#). Analisis petrografi menggunakan sayatan tipis sampel batuan dasar. Pemerian batuan mengacu pada klasifikasi [Streckeisen \(1976\)](#), dilanjutkan pada identifikasi tekstur, struktur, serta komposisi mineral, termasuk keberadaan urat dan mineral alterasi grup serpentin.

Profil endapan nikel laterit diklasifikasikan berdasarkan variasi morfologi. Analisis profil mencakup pembuatan grafik *downhole* untuk menganalisis sebaran kadar terhadap fungsi kedalaman, diikuti penentuan *trend* pengayaan melalui diagram boxplot, dilanjutkan dengan distribusi spasial melalui pembuatan sayatan penampang pada kelas morfologi yang sama menggunakan piranti lunak leapfrog 5.1.

Kontrol morfologi terhadap kualitas endapan nikel laterit dilakukan dengan dua pendekatan. Pendekatan pertama menggunakan sayatan penampang terorientasi mempertimbangkan variasi elevasi dan kemiringan lereng, dihubungkan dengan kadar nikel dan ketebalan laterit. Pendekatan kedua, menggunakan analisis regresi linear untuk menentukan korelasi parameter morfologi (elevasi dan kemiringan lereng) terhadap kualitas endapan nikel laterit (rerata kadar nikel dan tebal laterit). Kontrol morfologi dinyatakan dalam nilai koefisien korelasi (R). Korelasi dinyatakan dalam fungsi positif dan negatif. Nilai koefisien korelasi yang mendekati ± 1 menunjukkan korelasi sangat kuat, dan sebaliknya mendekati 0 menunjukkan korelasi yang sangat lemah (**Tabel 1**).

Tabel 1 Koefisien korelasi (R) dan maknanya pada analisis korelasi ([Davis, 2003](#))

Korelasi positif		Korelasi negatif	
R	Keterangan	R	Keterangan
0-0,19	Sangat Lemah	0-(-0,19)	Sangat Lemah
0,2-0,39	Lemah	(-0,2)-(-0,39)	Lemah
0,4-0,59	Sedang	(-0,4)-(-0,59)	Sedang
0,6-0,79	Kuat	(-0,6)-(-0,79)	Kuat
0,8-1	Sangat Kuat	(-0,8)-(-1)	Sangat Kuat

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Morfologi daerah penelitian

Satuan bentang alam pada daerah penelitian didominasi perbukitan yang tersebar dari bagian utara hingga selatan serta dari timur ke barat dengan total luas wilayah mencapai 15,86 Ha atau sekitar 67,55% dari keseluruhan area penelitian. Berdasarkan pendekatan morfologi, satuan ini memiliki elevasi berkisar antara 35-164 mdpl dengan karakteristik topografi berupa puncak yang tumpul dan lembah berbentuk "V" hingga "U". Lereng yang curam hingga sangat curam banyak dijumpai di wilayah ini, yang secara langsung dapat diamati di lapangan. Morfologi perbukitan tersusun oleh bongkah silika dan tanah laterit, setempat ditemukan singkapan serpentinit sebagai batuan dasar.

Daerah penelitian dikategorikan sebagai perbukitan rendah dengan variasi bentuk lahan yang lebih tinggi dan terjal dibandingkan dataran rendah. Analisis morfometri menunjukkan tiga kelas



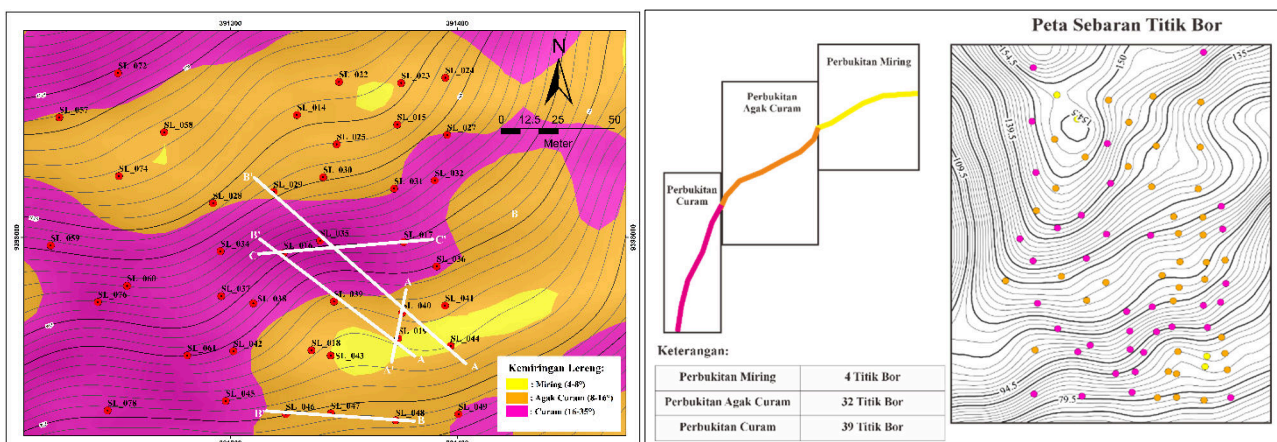
kemiringan lereng. Sebagian besar wilayah didominasi oleh lereng agak curam (8° – 16°) yang berpotensi mengalami erosi tinggi. Di bagian selatan hingga utara ditemukan lereng miring (4° – 8°) dengan stabilitas relatif lebih baik. Sementara itu, di bagian barat terdapat lereng curam (16° – 35°), menunjukkan kondisi topografi yang sebagian besar miring hingga curam (**Gambar 2**).

4.2 Karakteristik profil nikel laterit

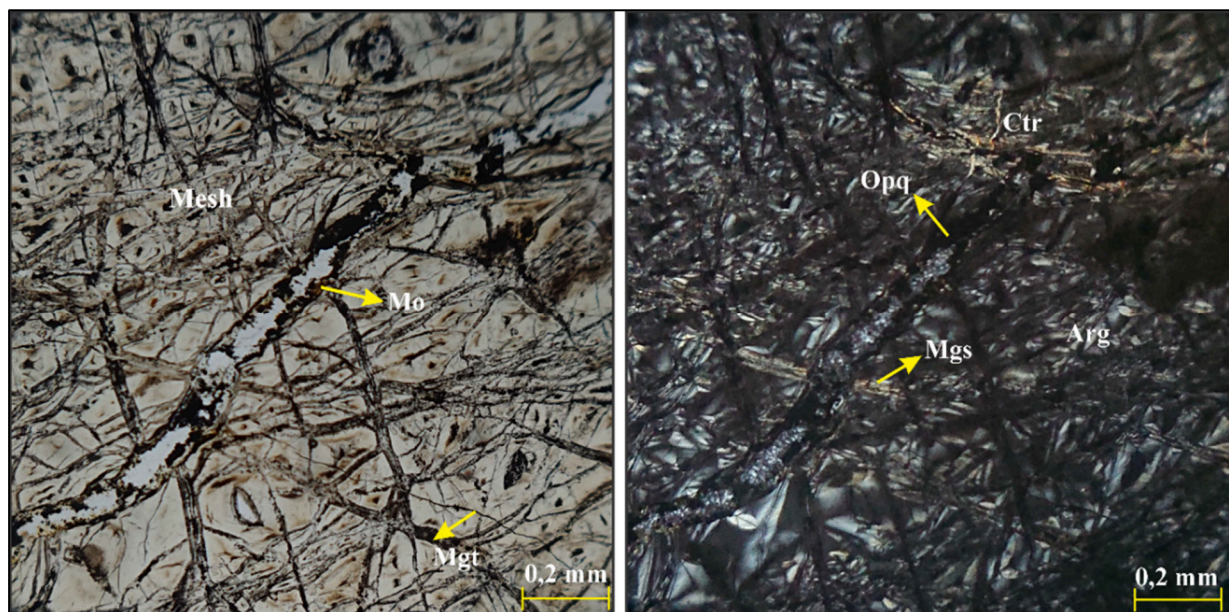
4.2.1 Karakteristik batuan dasar

Batuan ultramafik di daerah penelitian tersebar seluas 22,83 Ha, membentang dari barat ke timur pada morfologi perbukitan. Singkapan batuan dominan ditemukan di lokasi bukaan tambang,

dengan kondisi lapuk dan setempat menampakkan batuan segar dengan rekahan intens. Peridotit terserpentinisasi berwarna lapuk kecoklatan dan segar abu-abu kehijauan, bertekstur holokristalin, bentuk kristal euhedral hingga subhedral. Hubungan antar mineral bersifat equigranular, menandakan pertumbuhan kristal yang relatif seragam. Komposisi mineral didominasi oleh serpentin hasil alterasi dari mineral primer, dengan kehadiran olivin dan piroksen sebagai mineral primer. Mineral sekunder seperti gutit dan mineral lempung terbentuk akibat pelapukan dan alterasi hidrotermal. Singkapan peridotit ini selalu berasosiasi dengan zona pada profil nikel laterit, di mana singkapan batuan berada di bagian paling bawah setelah zona saprolit.



Gambar 2 Peta morfometri dan peta sebaran titik bor berdasarkan kelas lereng. Peta topografi menunjukkan puncak perbukitan dijumpai pada bagian utara



Gambar 3 Fotomikrograf serpentin sebagai batuan dasar yang ditunjukkan oleh kelimpahan serpentin (lizardit, antigorite, dan krisotil) diikuti mineral sekunder lainnya (magnesit dan magnetit). Serpentin hadir menggantikan mineral utama membentuk tekstur *mesh* dan *hourglass*

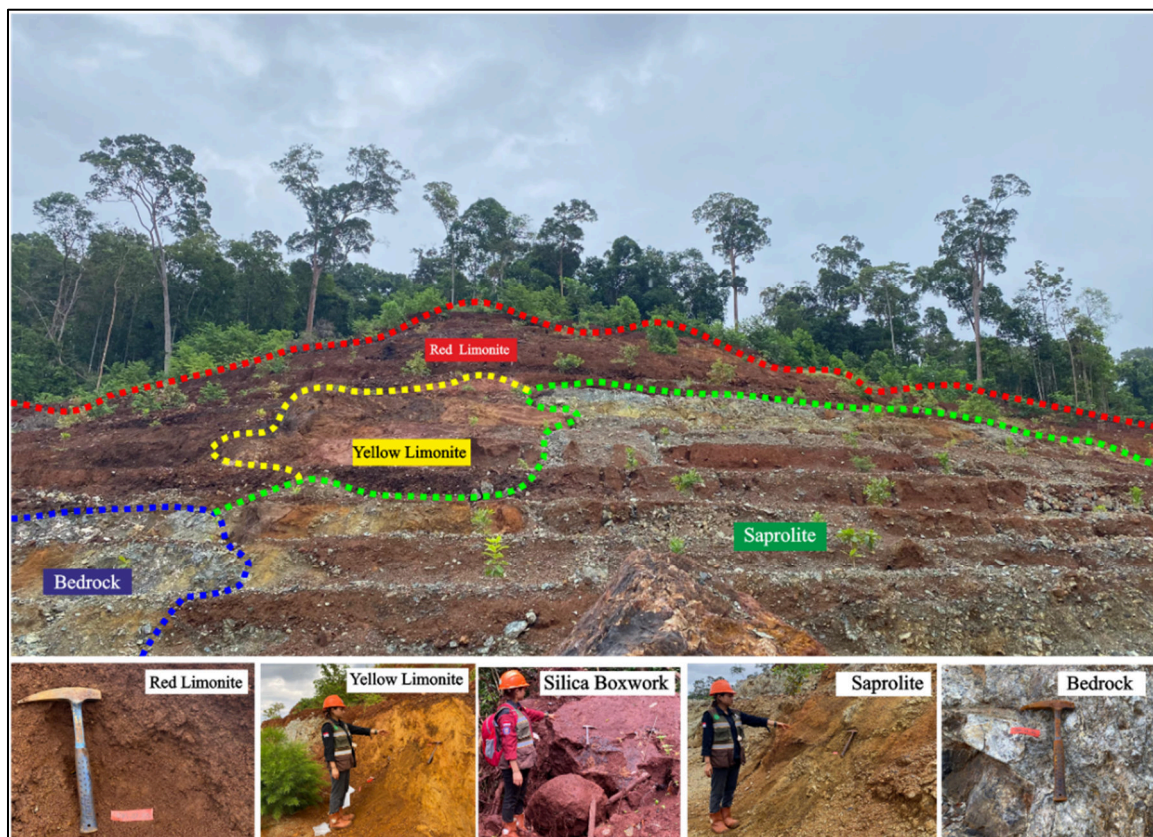
Berdasarkan analisis petrografi, batuan dasar berupa serpentin, dengan dominasi mineral serpentin yang hadir dalam tekstur *mesh* dan *hourglass* dengan warna absorpsi hijau pucat hingga tidak berwarna. Batuan dasar tersusun atas lizardit, antigorit, dan krisotil, dengan mineral tambahan berupa magnetit, klorit, opak, mineral oksida, dan magnesit (**Gambar 3**). Lizardit berukuran 0,2–0,4 mm membentuk tekstur *mesh*; antigorit berukuran $\pm 0,2$ mm dengan pleokroisme monokroik membentuk tekstur *hourglass*; sedangkan krisotil berukuran 0,2 mm hadir sebagai urat dengan struktur *kinked band* akibat deformasi teregang (Iseppi dkk., 2018). Klorit hadir dengan interferensi tinggi (putih hingga ungu) dengan tekstur berserat halus, magnesit mengisi urat dalam tekstur berbutir hasil karbonasi temperatur rendah, dan magnetit granular mengisi urat selama proses serpentinisasi. Mineral oksida menggantikan olivin dan piroksen akibat pelapukan dan oksidasi, sementara mineral opak berwarna hitam tanpa pleokroisme maupun kembaran.

4.2.2 Profil umum nikel laterit daerah penelitian

Zona limonit terletak di bagian atas profil dan terbagi menjadi dua subzona, yakni limonit merah dan limonit kuning. Limonit merah berwarna coklat

kemerahan karena didominasi hematit, sedangkan limonit kuning cenderung kuning kecoklatan dengan dominasi gutit. Zona ini umumnya lebih tebal di bagian atas dan menipis ke bawah sebelum beralih menjadi zona saprolit. Zona saprolit yang berada di bawahnya berwarna kuning kehijauan, terbentuk dari pelapukan batuan induk, dan mengandung olivin dan serpentin; ketebalannya bervariasi bergantung pada morfologi. Lebih dalam lagi terdapat zona batuan dasar yang belum mengalami pelapukan signifikan.

Selain zona utama ini, dalam beberapa profil dijumpai struktur silika boxwork. Silika tersebut berasal dari proses pedogenik (laterisasi) serpentin kaya silika yang mengisi rekahan batuan dasar dan terakumulasi. Saat laterisasi, sebagian silika tidak ikut terlindi dan terakumulasi residual pada lapisan limonit (Helvacı dkk., 2018). Perbedaan warna dan kandungan mineral antara limonit merah yang kaya besi dengan warna lebih gelap dan limonit kuning yang lebih cerah dengan dominasi gutit menunjukkan variasi intensitas oksidasi dan pelapukan (**Gambar 4**). Penjelasan berikutnya berfokus pada karakteristik profil nikel laterit pada setiap variasi kemiringan lereng. Karakteristik mencakup distribusi senyawa terhadap fungsi kedalaman, sebaran kadar, dan distribusinya melalui penampang vertikal geologi.



Gambar 4 Profil umum nikel laterit daerah penelitian yang tersusun atas limonit merah, limonit kuning, saprolit, dan batuan dasar. Silika boxwork kerap dijumpai pada lapisan limonit

4.2.3 Profil laterit pada perbukitan miring

Pada morfologi perbukitan miring, profil nikel laterit tersegmentasi menjadi empat zona profil vertikal: limonit, transisi, saprolit, dan batuan dasar (**Gambar 5**). Zona limonit di lapisan atas dengan ketebalan hingga 3 meter; berwarna coklat kemerahan hingga kuning kecoklatan. Tingginya kandungan oksida besi (Fe 30–45%) dan aluminium (Al_2O_3 sekitar 20%) berasal dari akumulasi mineral hematit dan goetit, sedangkan SiO_2 dan MgO rendah, menunjukkan laterisasi intensif. Zona transisi dengan ketebalan 4 meter, menandai peralihan dari limonit ke saprolit; kandungan Fe dan Al_2O_3 mulai menurun, sedangkan SiO_2 dan MgO meningkat, menandakan pembentukan mineral silikat. Saprolit muncul di bawahnya, berwarna kuning kehijauan, tersusun dari serpentin yang kaya Mg dan Si, di bagian ini pelapukan kurang intens sehingga mineral primer masih bertahan. Di dasar profil terdapat serpentin yang belum banyak terlapukkan, mempertahankan tekstur batuan induk.

Variasi kimia utama dan minor mengikuti zonasi vertikal. Di zona limonit, Fe rata-rata 30,6% dan Al_2O_3 23,9% dominan, sedangkan SiO_2 (34,7%) dan MgO ($\pm 1,5\%$) relatif rendah; nikel (Ni) 0,3–0,5% bersama kobalt (Co 0,1–0,2%) teradsorpsi pada gutit/hematit. Zona transisi menunjukkan penurunan Fe–Al dan kenaikan SiO_2 –MgO; Ni dan Co turun sedikit akibat pencucian, sementara MnO naik hingga 2,8%. Di saprolit, SiO_2 40–50% dan MgO 15–33% meningkat tajam; Ni mencapai puncak konsentrasi 0,5–2,3% sebagai mineral sekunder, sedangkan Cr_2O_3 dan Fe menurun. Batuan dasar mempertahankan komposisi awal tanpa alterasi signifikan dengan $\text{SiO}_2 > 50\%$ dan MgO $> 35\%$, serta Fe, Al_2O_3 , Ni, Co, Cr_2O_3 dan MnO yang jauh lebih rendah.

4.2.4 Profil laterit pada perbukitan agak curam

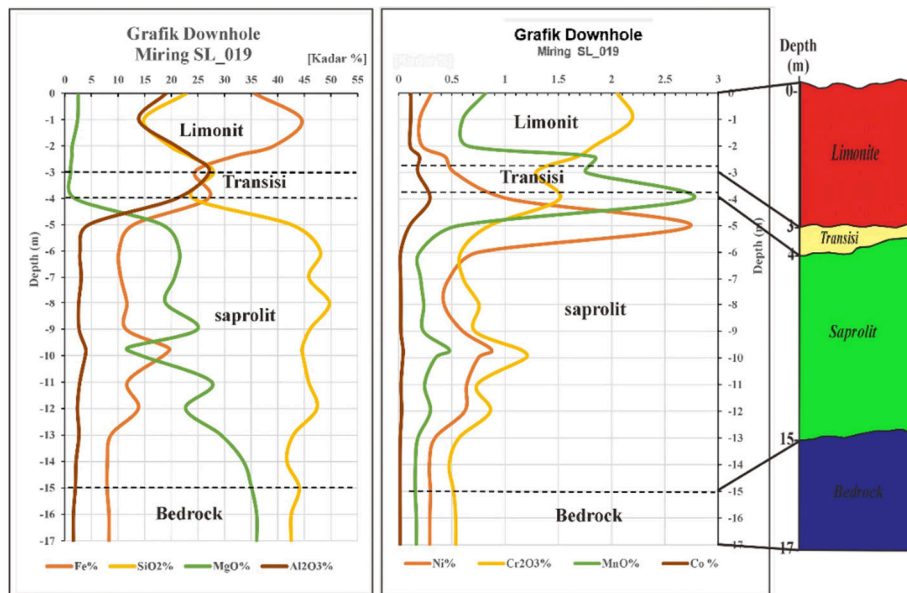
Profil vertikal nikel laterit pada morfologi agak curam dibagi menjadi tiga zona utama—limonit, saprolit, dan batuan dasar. Zona limonit, memiliki komposisi Fe dan Al_2O_3 relatif rendah (masing-masing 10–20% dan 5–8%), tetapi SiO_2 tinggi (50–74%) karena akumulasi silika boxwork. Keberadaan silika boxwork ini menandakan laterisasi intensif yang meninggalkan residu silika di permukaan. Di bawahnya, zona saprolit hingga kedalaman ± 10 meter, disusun mineral serpentin serta gutit, dan menunjukkan pengayaan nikel (sekitar 0,4–1,2%), bersama dengan peningkatan SiO_2 dan penurunan Fe. Fluktuasi Cr_2O_3 dan MnO di zona ini mencerminkan variasi kondisi redoks selama pelapukan. Zona paling bawah adalah batuan dasar ultramafik yang belum banyak melapuk; di zona ini, kandungan Ni dan Cr_2O_3 turun drastis sementara SiO_2 dominan, menunjukkan batas laterisasi (**Gambar 6**).

Variasi senyawa mayor dan minor juga terlihat pada zona laterit. Pada limonit, lateritisasi lanjut menghasilkan dominasi Fe (rata-rata 33,2% dengan rentang 20–50%), Al_2O_3 sekitar 9–10%, dan SiO_2 rata-rata 29,6% (hingga 50%), sedangkan MgO rendah ($\pm 1,24\%$) menunjukkan Mg terlepas selama proses pelindian. Kadar nikel rata-rata 0,134% dan Co $\pm 0,058\%$, menandakan unsur-unsur ini teradsorpsi pada oksida besi. Memasuki saprolit, Ni mengalami pengayaan menjadi 0,2–1,5% (rata-rata 0,838%), MgO meningkat hingga 2–25% (rata-rata 11,4%), dan SiO_2 rata-rata 33,6%, mencerminkan dominasi mineral serpentin dan silikat. Fe menurun ($\pm 26,5\%$) dan Al_2O_3 turun menjadi $\pm 7,9\%$, mengindikasikan remobilisasi unsur dari limonit ke saprolit. Pada batuan dasar, unsur-unsur kembali mencerminkan komposisi serpentin; SiO_2 rata-rata 35,7% dengan rentang 15–55%, MgO tinggi (17,3%), Ni berkisar 0,788% terikat dalam mineral serpentin, dan Fe serta Al_2O_3 lebih rendah (21,2% dan 5,05%).

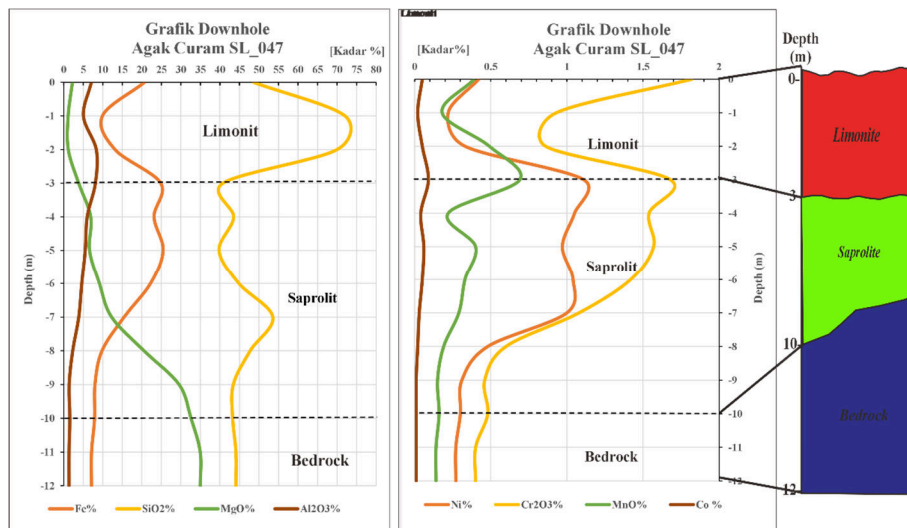
4.2.5 Profil laterit pada perbukitan curam

Pada morfologi curam, profil laterit tersusun atas tiga zona: limonit, saprolit, dan batuan dasar, dengan ketebalan lebih besar dibanding profil laterit pada perbukitan miring atau agak curam. Zona limonit terbentuk hingga kedalaman 8 meter, menunjukkan proses lateritisasi yang lebih intens; kandungan besi di lapisan ini sangat tinggi (45–55%), sedangkan SiO_2 dan MgO rendah, berlawanan dengan zona limonit di morfologi miring dan agak curam yang lebih tipis dan cenderung kaya silika. Kromium (Cr_2O_3) mencapai akumulasi tertinggi (1,5–3,1%) di limonit (**Gambar 7**), menunjukkan pengayaan yang tidak ditemukan pada morfologi lain. Zona saprolit berkembang antara 8–20 meter memiliki kandungan MgO 20–35% dan SiO_2 35–45%, nilai ini lebih tinggi dibanding saprolit di perbukitan miring/agak curam; nikel (0,5–2%) dan MnO meningkat pada bagian atas saprolit lalu menurun dengan bertambahnya kedalaman. Di bawah kedalaman sekitar 20 meter terdapat batuan dasar ultramafik yang belum terlapukkan dengan signifikan, yang menandai batas bawah laterisasi.

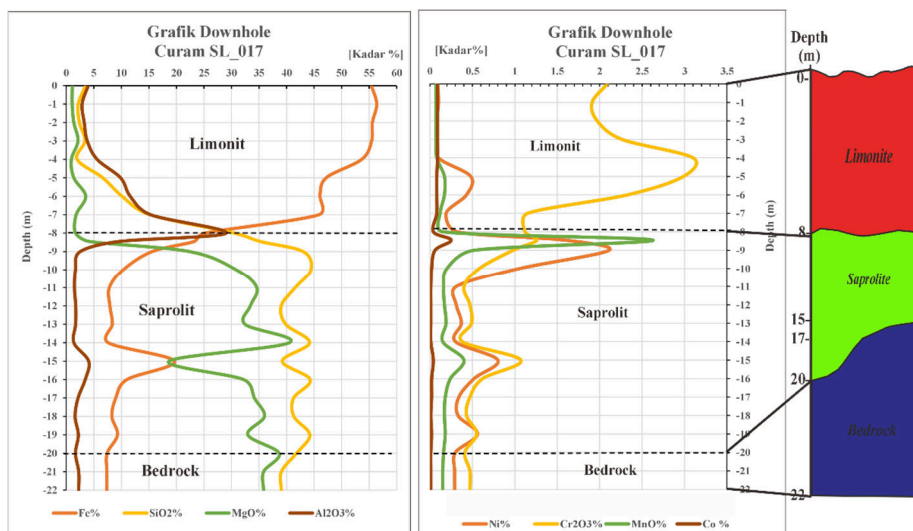
Di zona limonit perbukitan curam, Fe merupakan unsur dominan dengan rata-rata 24,6% (kisaran 10–50%), sementara Ni rata-rata hanya 0,262%, lebih rendah dibanding zona limonit pada morfologi miring dan agak curam. Di zona saprolit, Ni terakumulasi lebih besar (rata-rata 1,07% dengan puncak 2%), melebihi saprolit di kedua morfologi lain (**Gambar 8**). Perbedaan utama dibanding morfologi miring atau agak curam adalah kedalaman zona laterit yang lebih besar, kandungan Fe yang awalnya lebih tinggi namun menurun tajam ke bawah, pengayaan Ni yang lebih besar di saprolit, serta pengayaan Cr_2O_3 di limonit.



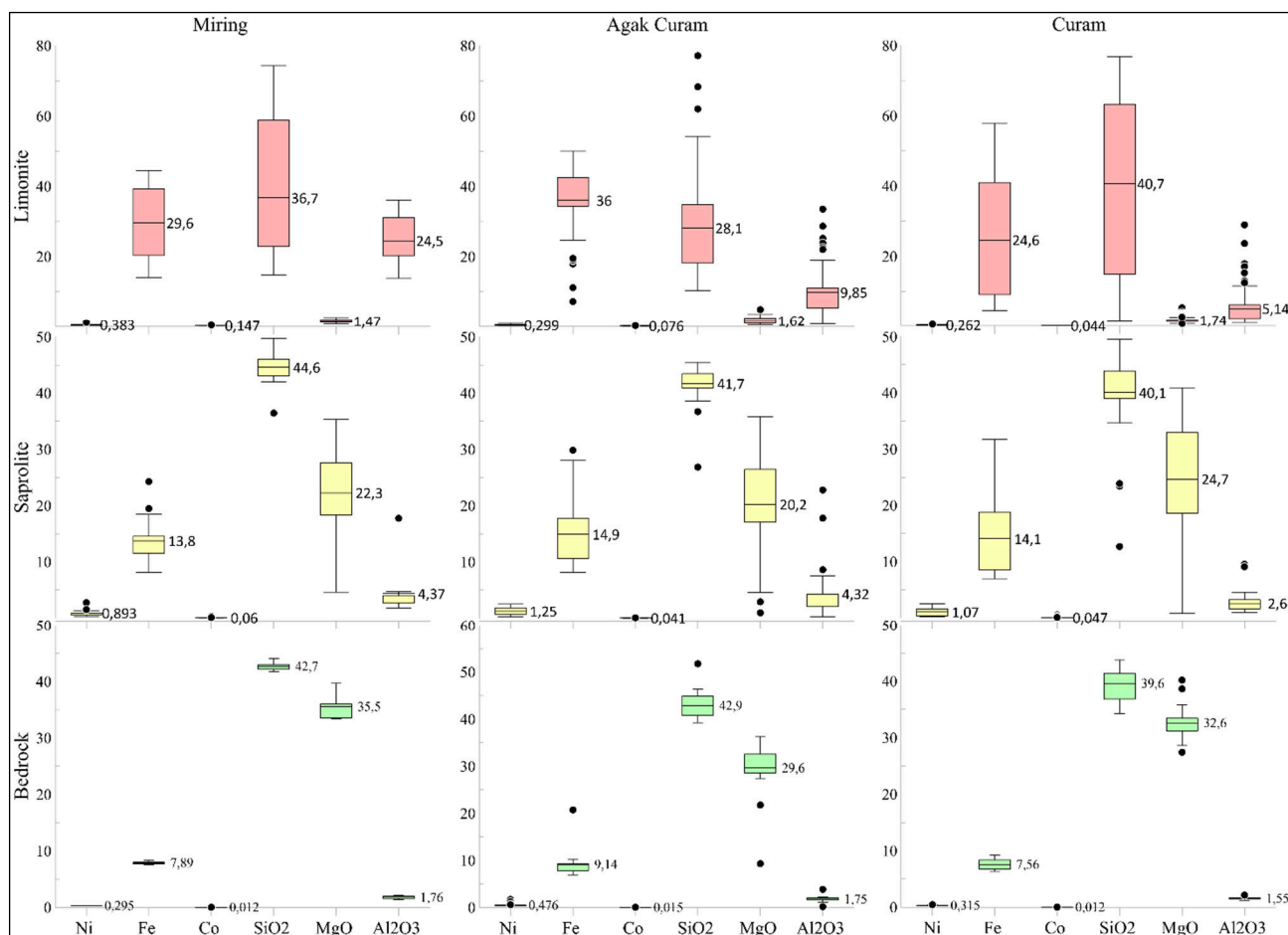
Gambar 5 Profil grafik *downhole* senyawa mayor dan minor pada profil laterit morfologi miring



Gambar 6 Profil grafik *downhole* senyawa mayor dan minor pada profil laterit morfologi agak curam



Gambar 7 Profil grafik *downhole* senyawa mayor dan minor pada profil laterit morfologi curam



Gambar 8 Sebaran data senyawa endapan nikel laterit pada berbagai variasi kemiringan lereng

4.3 Kontrol morfologi terhadap endapan nikel laterit

4.3.1 Korelasi profil nikel laterit pada morfologi yang sama

Pada analisis ini, penampang profil laterit didasari pada titik bor dengan kelas kemiringan lereng sama dengan selisih elevasi sekecil mungkin. Pada penampang A-A' (lereng landai 4-8°), limonit menunjukkan ketebalan konstan 3 meter, sedangkan saprolit bervariasi antara 6-11 meter. Di penampang B-B' (lereng agak curam 8-16°), limonit juga memiliki ketebalan tetap 3 meter kecuali pada titik bor SL_046 (elevasi lebih tinggi) di mana limonit lebih tebal dari saprolit; sementara saprolit berkisar 9-10 meter. Pada penampang C-C' (lereng curam 16-35°), limonit menebal menjadi 8 meter secara konsisten, dan saprolit mencapai ketebalan tertinggi (15-20 meter).

Pada penampang tersebut, kemiringan lereng turut menjadi faktor pengontrol: lereng landai (A-A') menghasilkan saprolit lebih tebal (6-11 m) dan limonit tipis (3 m), sementara lereng curam (C-C') menyebabkan peningkatan ketebalan limonit (8 m) dan saprolit (15-20 m). Elevasi berperan secara lokal, seperti pada B-B' di titik SL_046 (elevasi lebih tinggi) di mana limonit lebih tebal dibanding saprolit.

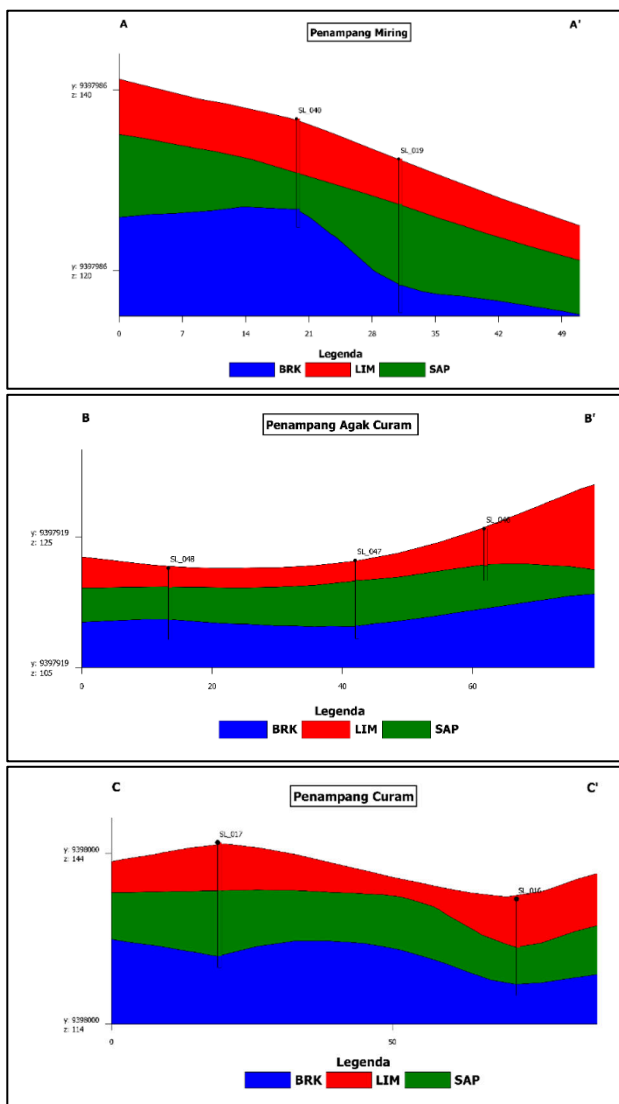
Namun, secara keseluruhan, elevasi (120-145 mdpl) tidak menunjukkan pola pengaruh linier terhadap ketebalan laterit pada ketiga penampang (**Gambar 9**). Distribusi tebal laterit yang tidak homogen pada ketiga penampang dengan morfologi sama menunjukkan kontrol geologi lain yang turut berperan terhadap proses laterisasi dan pembentukan nikel laterit pada daerah penelitian.

4.3.2 Korelasi profil nikel laterit pada variasi morfologi

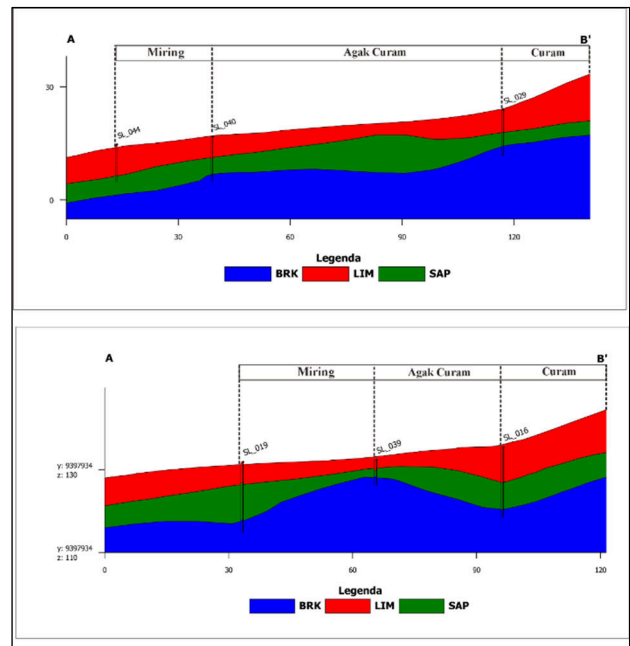
Variasi tebal laterit pada penampang A-B dan A'-B' menunjukkan kontrol morfologi lereng terhadap tebal laterit. Pada penampang A-B yang membentang barat-laut-tenggara, melintasi lereng miring hingga curam, ketebalan lapisan limonit cenderung seragam dengan sedikit peningkatan ke arah barat-laut pada elevasi lebih tinggi. Ketebalan saprolit relatif stabil namun menebal pada lereng agak curam di sekitar titik SL_040; fenomena ini terkait dengan kedalaman batuan dasar yang lebih dangkal, sehingga hanya menghasilkan laterisasi tipis. Kedalaman batuan dasar di penampang ini bertambah secara bertahap pada arah tenggara yang menghasilkan saprolit lebih tebal. Sebaliknya, penampang kedua memperlihatkan variasi yang lebih besar. Di sekitar titik SL_039, lapisan

limonit menipis tajam diikuti ketebalan saprolit, Ketebalan batuan dasar yang fluktuatif menyebabkan ketebalan saprolit tidak seragam (**Gambar 10**).

Kedua penampang menunjukkan ketebalan laterit; limonit dan saprolit berkembang cukup baik pada lereng miring, diakibatkan oleh laterisasi berkembang lebih baik pada morfologi landai (Erwin dkk., 2023, Hasria dkk., 2021b), meskipun pada lereng curam dengan elevasi tinggi juga dijumpai perkembangan profil dan tebal laterit yang cukup signifikan, khususnya limonit. Choi dan Kim (2023) menjelaskan bahwa beberapa daerah di lengan Tenggara Sulawesi, seperti Morombo dan Morowali memiliki sebaran kadar dan tebal laterit signifikan pada elevasi tinggi dan relief kasar yang berasosiasi dengan rekahan dan urat garnierit.



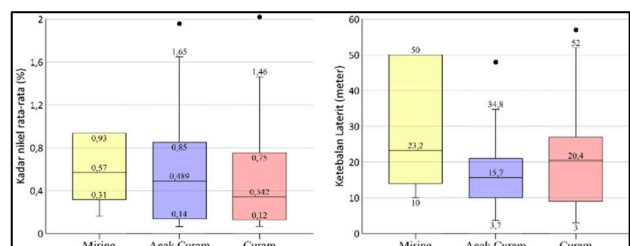
Gambar 9 Berbagai penampang melintang profil nikel laterit pada titik bor dengan morfologi yang sama (A-A' pada lereng miring; B-B' pada lereng agak curam; C-C' pada lereng curam)



Gambar 10 Kedua penampang melintang profil nikel laterit berarah tenggara-baratlaut yang memotong berbagai variasi morfologi

4.3.3 Kontrol morfologi berdasarkan analisis korelasi regresi linear

Kontrol morfologi terhadap kualitas nikel laterit juga dilakukan melalui pendekatan kuantitatif. Berdasarkan grafik boxplot (**Gambar 11**), terlihat bahwa kadar nikel rata-rata pada morfometri lereng miring lebih besar ($Ni=0,57$) dibandingkan dengan lereng agak curam ($Ni=0,489$) dan lereng curam ($Ni=0,342$). Kadar nikel di lereng miring memiliki varians data relatif rendah, sementara pada morfometri agak curam dan curam, fluktuasi kadar nikel hadir dengan varians lebih signifikan. Meskipun ketebalan laterit pada lereng miring lebih besar, distribusi data ketebalannya sangat bervariasi. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun akumulasi laterit lebih besar di lereng miring, ketebalan lapisan tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi faktor lain yang lebih kompleks. Di sisi lain, morfometri agak curam dan curam memiliki ketebalan laterit yang lebih bervariasi dengan nilai yang lebih rendah dibandingkan morfometri miring.

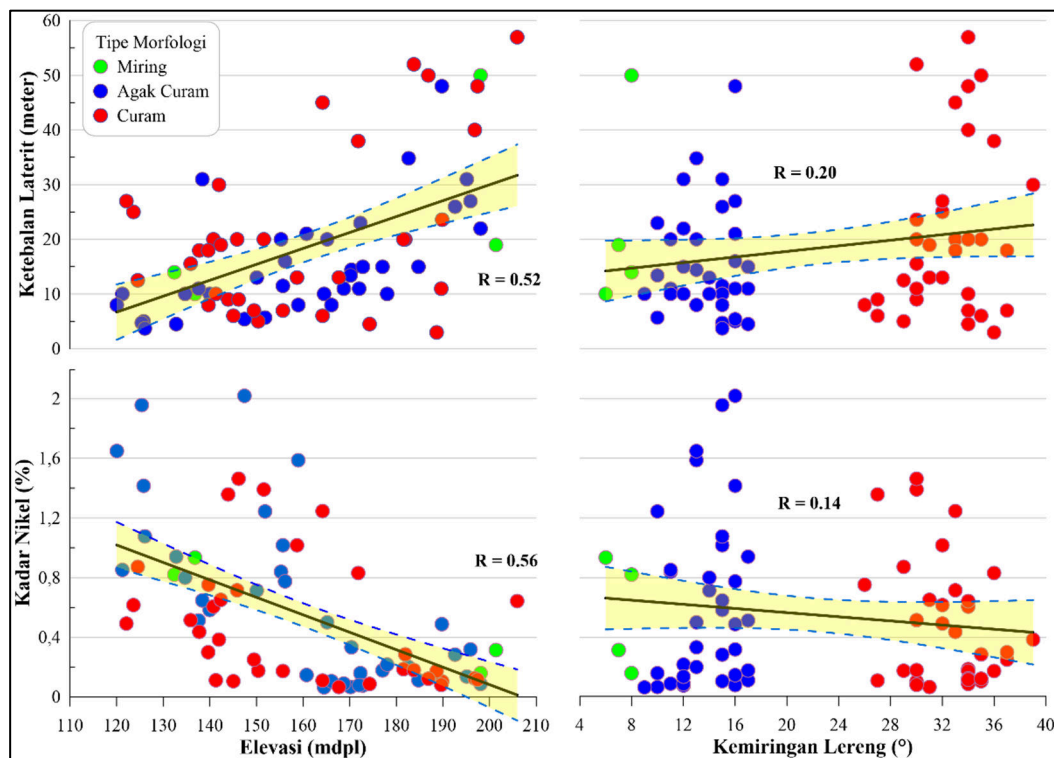


Gambar 11 Boxplot perbandingan kadar nikel rata-rata dan ketebalan laterit pada berbagai tipe morfometri

Analisis statistik korelasi dengan regresi linear dilakukan pada 76 titik bor yang tersebar pada perbukitan rendah hingga perbukitan dengan variasi kemiringan lereng. Hasil analisis menunjukkan bahwa elevasi memegang pengaruh yang lebih dominan terhadap ketebalan laterit dan kadar nikel dibandingkan dengan kemiringan lereng. Korelasi positif antara elevasi dan ketebalan laterit ($R = 0,52$) menunjukkan bahwa 52% perubahan ketebalan laterit dapat dikorelasikan melalui perubahan elevasi. Seiring dengan peningkatan elevasi, ketebalan lapisan laterit juga cenderung meningkat. Sebaliknya, korelasi negatif antara elevasi dan kadar nikel ($R = 0,56$) menunjukkan bahwa 56% data perubahan kadar nikel diikuti dengan peningkatan elevasi (**Gambar 12**). Kadar nikel cenderung menurun dengan meningkatnya elevasi, sehingga disimpulkan bahwa

akumulasi laterit tebal dijumpai pada elevasi tinggi, sedangkan kadar nikel rata-rata tertinggi dijumpai pada elevasi rendah. Di sisi lain korelasi lemah ditunjukkan oleh kontrol morfometri terhadap tebal laterit ($R=0,20$) dan kadar nikel rata-rata ($R=0,14$). Hal ini menunjukkan bahwa elevasi berperan lebih signifikan dalam mengendalikan proses pelapukan dan akumulasi material laterit, daripada faktor kemiringan lereng.

Meskipun pada penampang profil nikel laterit pada berbagai variasi dijumpai pola laterisasi yang berkembang dengan baik pada morfologi miring, namun analisis statistik menunjukkan elevasi memiliki korelasi yang lebih tinggi. Ini menunjukkan pentingnya pendekatan kedua metode ini pada studi kontrol morfologi terhadap kualitas endapan nikel laterit.



Gambar 12 Korelasi elevasi dan kemiringan lereng terhadap ketebalan laterit dan kadar nikel menggunakan kurva regresi linear

5 Kesimpulan

Karakteristik tipe zona profil laterit pada setiap variasi lereng menunjukkan perbedaan yang signifikan, baik dari segi ketebalan maupun karakteristik geokimia senyawa mayor dan minor. Pada morfologi perbukitan miring, zona limonit umumnya lebih tipis, sementara zona saprolit lebih tebal, dengan kandungan nikel yang lebih tinggi di zona saprolit. Sebaliknya, pada perbukitan curam, zona limonit lebih tebal, sementara saprolit cenderung lebih tipis, dengan kadar nikel yang lebih rendah. Karakteristik geokimia pada setiap zona juga

berbeda, di mana zona limonit pada lereng curam mengandung besi (Fe) yang lebih tinggi, sedangkan zona saprolit pada lereng miring lebih kaya akan nikel (Ni). Di zona transisi, terdapat peningkatan kandungan SiO_2 dan MgO yang menunjukkan proses laterisasi yang lebih intens.

Analisis dengan penampang melintang, boxplot, dan korelasi regresi linear menunjukkan hasil yang terintegrasi dalam memahami pengaruh morfologi terhadap kualitas endapan nikel laterit. Analisis penampang menunjukkan variasi ketebalan laterit yang konsisten antara morfologi lereng miring, agak

curam, dan curam, dengan zona limonit yang lebih tebal pada lereng curam dan saprolit lebih tebal pada lereng miring. Grafik boxplot mengungkapkan bahwa kadar nikel rata-rata lebih tinggi pada morfologi lereng miring dibandingkan dengan lereng curam dan agak curam. Sementara itu, hasil korelasi pada regresi linear menunjukkan bahwa elevasi memiliki korelasi yang lebih kuat terhadap ketebalan laterit dan kadar nikel, dengan korelasi positif untuk ketebalan laterit dan negatif untuk kadar nikel pada elevasi yang lebih

tinggi, dibandingkan dengan kemiringan lereng. Analisis statistik menunjukkan korelasi elevasi yang signifikan terhadap kualitas endapan nikel laterit. Diperlukan analisis kontrol faktor geologi lainnya yang dapat menjadi justifikasi hasil penelitian ini. Beberapa rekomendasi diperlukan, seperti analisis kontrol struktur geologi; dapat berupa identifikasi struktur geologi pada batuan dasar maupun interpretasi melalui teknik penginderaan jauh.

Referensi

- Ahmad, W. 2006. *Fundamentals of Chemistry, Mineralogy, Weathering Processes and Laterite Formation*. ITSL INCO, Ltd, Training Manual.
- Cathelineau, M., Teitler, Y., Grimaud, J.-L., Favier, S., Golfier, F., Ramanaidou, E., Grangeon, S., Kerreuveur, Y., Jeanpert, J., Étienne, S., Muñoz, M. & Ulrich, M. 2024. Peridotite Weathering and Ni Redistribution in New Caledonian Laterite Profiles: Influence of Climate, Hydrology, and Structure. *Minerals*, 14(11), pp. 1082. <https://doi.org/10.3390/min14111082>
- Choi, Y. & Kim, B. 2023. Characteristics and Controlling Factors on Nickel Laterite Deposits in Sulawesi, Indonesia. *Economic and Environmental Geology*, 56(3), pp. 343-363. <https://doi.org/10.9719/eeg.2023.56.3.343>
- Davis, J. C. 2003. *Statistics and Data Analysis in Geology* (3 ed.). New York, John Wiley & Sons.
- Dirman, R. 2023. Analisis Karakteristik Batuan Dasar Pembentuk Nikel Laterit Pada Blok X dan Blok Y, PT Arga Morini Indotama, Site Kabaena, Sulawesi Tenggara, Skripsi, Universitas Halu Oleo.
- Erwin, R., Hasria, Okto, A., Bahdad, Arisona & Hamimu, L. 2023. Kandungan dan Ketebalan Endapan Nikel Laterit Di Kecamatan Langgikima, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Geomine*, 11(1), pp. 22-41. <https://doi.org/https://doi.org/10.33536/jg.v11i1.1069>
- Hasria, Masri, Asfar, S., Arisona, Okto, A., Restele, L. O., Ngkoimani, L. O. & Yustika, R. 2021a. Characteristics of Chromite Deposits at North Kabaena District, Bombana Regency, Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 6(2), pp. 94-98. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2021.6.2.6424>
- Hasria, H., Asfar, S., Ngkoimani, L. O., Okto, A., Jaya, R. I. M. C. & Sepdiansar, R. 2021b. Pengaruh Geomorfologi Terhadap Pola Distribusi Unsur Nikel Dan Besi Pada Endapan Nikel Laterit Di Kabupaten Buton Tengah-Sulawesi Tenggara. *Jurnal GEOSAPTA*, 7(2). <https://doi.org/10.20527/jg.v7i2.10716>
- Hasria, H., Resmin, M., Okto, A., Masri, M., Arisona, A., Al Firman, A. F., Harisma, H., Jaya, R. I. M. C., Septiana, S., Sawaludin, S. & Salihin, L. O. M. I. 2024a. Pengaruh Kemiringan Lereng Terhadap Ketebalan Endapan Nikel Laterit Daerah Tobimeita, Kecamatan Langgikima, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 6(3), pp. 174-185. <https://doi.org/10.14710/jgt.6.3.2023.174-185>
- Hasria, H., Ruliansyah, M., Awadh, S., Masri, M., Azzaman, M., Okto, A. & Sawaludin, S. 2024b. Identification of Lateritic Nickel Deposits Potential in the Kokoe Area, Kabaena Island, Central Buton Regency, Southeast Sulawesi Province, Indonesia. *Iraqi Geological Journal*, 57(1A), pp. 179-193. <https://doi.org/10.46717/igj.57.1a.15ms-2024-1-26>
- Helvacı, C., Oyman, T., Gündoğan, İ., Sözbilir, H., Parlak, O., Kadir, S. & Güven, N. 2018. Mineralogy and genesis of the Ni-Co lateritic regolith deposit of the Çaldağ area (Manisa, western Anatolia), Turkey. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(3), pp. 252-271. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0184>
- Iseppi, M., Sevin, B., Cluzel, D., Maurizot, P. & Bayon, B. L. 2018. Supergene Nickel Ore Deposits Controlled by Gravity-Driven Faulting and Slope Failure, Peridotite Nappe, New Caledonia. *Economic Geology*, 113(2), pp. 531-544. <https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4561>
- Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C. D. & Ishikawa, A. 2004. Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite, Indonesia. *Tectonophysics*, 392(1-4), pp. 55-83. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.04.008>
- Simandjuntak, T. O., Surono & Sukido 1993. *Peta Geologi Lembar Kolaka, Sulawesi*. Bandung, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.

- Streckeisen, A. 1976. To each plutonic rock its proper name. *Earth-Science Reviews*, 12(1), pp. 1-33.
[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(76\)90052-0](https://doi.org/10.1016/0012-8252(76)90052-0)
- Surono & Hartono, U. 2013. *Geologi Sulawesi* (1 ed.). Jakarta, LIPI Press.
- Syafrizal, Heriawan, M. N., Notosiswoyo, S., Anggayana, K. & Samosir, J. F. 2009. Hubungan Kemiringan Lereng dan Morfologi dalam Distribusi Ketebalan Horizon Laterit pada Endapan Nikel Laterit: Studi Kasus Endapan Nikel Laterit di Pulau Gee dan Pulau Pakal. *Jurnal Teknologi Mineral*, 16(3), pp. 149-160.
- van Zuidam, R. A. 1986. *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Netherland, Publisher The Hague.