

Kontrol Kuantitatif Kemiringan Lereng Terhadap Ketebalan dan Pengkayaan Supergen Nikel Laterit: Studi Endapan Nikel Laterit di Halmahera Timur

Ricki Aldi Duri Saputro¹, Setia Pambudi^{2*}

¹ Mahasiswa Sarjana Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta

² Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta

Article Info

Article history:

Received Jun, 2026

Revised Jun, 2026

Accepted Jun, 2026

Kata Kunci:

Nikel Laterit, Kemiringan Lereng, Ketebalan Laterit, Pengkayaan Supergen, Analisis Regresi

Keywords:

Nickel Laterite, Slope Steepness, Laterite Thickness, Supergene Enrichment, Regression Analysis

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi geologi detail, sebaran spasial endapan laterit, serta korelasi kuantitatif kemiringan lereng terhadap profil nikel laterit di Site Wagemna, Kabupaten Halmahera Timur. Metode penelitian yang digunakan meliputi pemetaan geologi lapangan, analisis laboratorium, dan analisis statistik regresi linear memanfaatkan data pemboran serta pemodelan elevasi digital. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tatanan geologi daerah penelitian didominasi oleh batuan dasar ultramafik Kompleks Ofiolit yang dikontrol oleh struktur sesar naik (*right thrust slip fault*) dan kekar gerus berorientasi utara-selatan. Secara lateral, endapan nikel laterit mencakup 34% area dan terkonsentrasi pada punggung berlereng landai yang mendukung retensi material, sedangkan singkapan batuan dasar mendominasi lereng terjal akibat laju erosi mekanis yang tinggi. Analisis kuantitatif membuktikan kemiringan lereng memiliki korelasi linear negatif yang kuat terhadap kedalaman zona pengkayaan Ni ($R^2 = 0,8335$) dan total ketebalan profil ($R^2 = 0,8052$), di mana topografi datar-landai ($0^\circ-8^\circ$) mengoptimalkan infiltrasi untuk membentuk zona saprolit tebal (17-18,5 m). Selain itu, ditemukan dikotomi kontrol fisik yang unik dimana ketebalan zona limonit sangat dipengaruhi oleh kelerengan permukaan ($R^2 = 0,7981$), sementara ketebalan zona saprolit tidak berkorelasi linear dengan kelerengan ($R^2 = 0,0027$) melainkan dikontrol oleh karakteristik internal bawah permukaan seperti kerapatan kekar batuan dasar. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai panduan strategis dalam efisiensi eksplorasi nikel laterit berbasis pemodelan kelerengan di Pulau Halmahera.

ABSTRACT

This study aims to analyze the detailed geological conditions, spatial distribution of laterite deposits, and the quantitative correlation of slope steepness to the nickel laterite profile at Site Wagemna, East Halmahera Regency. The research methods involved field geological mapping, laboratory analysis, and linear regression statistical analysis utilizing drilling data and digital elevation modeling. The results show that the geological setting is dominated by ultramafic protoliths of the Ophiolite Complex, controlled by a right thrust slip fault and north-south trending shear fractures. Spatially, nickel laterite deposits cover 34% of the study area and are concentrated on gentle ridges that support material retention, whereas bedrock outcrops dominate steep slopes due to high mechanical erosion rates. Quantitative analysis proves that slope steepness has a strong negative linear correlation

with the depth of Ni enrichment ($R^2 = 0.8335$) and total profile thickness ($R^2 = 0.8052$), where flat-to-gentle topographies (0° – 8°) optimize infiltration to form a thick saprolite zone (17–18.5 m). Furthermore, a unique physical control dichotomy was found: limonite zone thickness is significantly affected by surface slope ($R^2 = 0.7981$), while saprolite zone thickness has no linear correlation with slope ($R^2 = 0.0027$) and is instead controlled by subsurface internal factors such as bedrock joint density. These findings can serve as a strategic guideline for more efficient nickel laterite exploration based on slope modeling in Halmahera Island.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Name: Ir. Setia Pambudi, S.T., M.Sc. RWTH

Institution: Jurusan Teknik Geologi, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta Jalan Padjajaran (Ring Road Utara) No. 104, Condongcatur, Depok, Sleman, Yogyakarta

Email: setia.pambudi@upnyk.ac.id

1. PENDAHULUAN

Transisi energi global menuju teknologi rendah karbon telah memicu peningkatan kebutuhan komoditas nikel secara signifikan sebagai komponen katoda utama dalam produksi baterai kendaraan listrik (*electric vehicle*) (Arsat & Munthe, 2024). Indonesia memegang posisi terdepan sebagai pemilik cadangan nikel laterit terbesar di dunia, dengan potensi nikel laterit yang terkonsentrasi di wilayah bagian timur dan dikontrol oleh lajur ofiolit, salah satunya di Kabupaten Halmahera Timur (Konopka dkk., 2022). Endapan nikel laterit di kawasan ini terbentuk melalui pelapukan kimiawi yang intensif pada batuan dasar ultramafik di bawah kondisi iklim tropis (Butt & Cluzel, 2013; Gleeson dkk., 2003; Golightly, 1981). Proses tersebut mengakibatkan pencucian unsur mobil dan menyisakan akumulasi residu berupa zona limonit di bagian atas, serta zona saprolit di bawahnya yang kaya akan mineral nikel-magnesium silikat sekunder akibat pengayaan supergen. Dalam pembentukan profil laterit ini, parameter morfometri berupa kemiringan lereng memegang peranan krusial dalam mengontrol laju pelapukan, efisiensi infiltrasi air tanah, serta intensitas erosi mekanis (Kenedy & Pambudi, 2026).

Meskipun hubungan topografi dan ketebalan laterit telah banyak dipelajari secara kualitatif, kajian kuantitatif detail mengenai pengaruh kemiringan lereng terhadap masing-masing sub-horizon (limonit dan saprolit) secara terpisah masih sangat terbatas. Model eksplorasi konvensional sering kali menyederhanakan bahwa peningkatan sudut lereng akan mengurangi ketebalan seluruh lapisan laterit secara seragam (Ilham dkk., 2021). Namun, studi empiris menunjukkan adanya dikotomi kontrol fisik dimana zona limonit di permukaan sangat sensitif terhadap erosi akibat kemiringan lereng, sedangkan perkembangan zona saprolit di bawah permukaan lebih dikontrol oleh sirkulasi air tanah dan struktur geologi sekunder (seperti kekar), sehingga sering kali bersifat independen terhadap kemiringan lereng permukaan. Di samping itu, sebagian besar penelitian terdahulu di Halmahera Timur masih berfokus pada skala regional atau analisis lateral umum tanpa mengaitkannya secara numerik menggunakan model regresi linear kuantitatif berskala lokal (Hasria

dkk., 2024). Ketiadaan model matematika lokal yang presisi ini berisiko menimbulkan kesalahan interpretasi dalam penentuan batas penambangan (*cut-off grade*) dan estimasi cadangan bijih.

Penelitian di Site Wagemna, Kabupaten Halmahera Timur, dirancang khusus untuk mengatasi kesenjangan tersebut karena area ini menampilkan variasi topografi yang sangat kontras. Dengan mengintegrasikan peta geomorfologi digital hasil data DEM dan data *assay* geokimia dari tujuh titik bor eksplorasi representatif, penelitian ini berhasil memetakan korelasi (koefisien determinasi, R^2) antara kemiringan lereng dengan ketebalan sub-horizon secara matematis. Studi ini memberikan kontribusi ilmiah baru berupa pembuktian adanya perbedaan kontrol topografi. Pendekatan kuantitatif presisi ini membedakan penelitian ini dari studi terdahulu seperti oleh Syafrizal dkk. (2009) maupun Hasria dkk. (2024) yang belum menyajikan hubungan linear kuantitatif spesifik atau menunjukkan inkonsistensi pengaruh kelereng antar-lokasi.

Berdasarkan latar belakang dan kesenjangan tersebut, penelitian ini dilaksanakan dengan tiga tujuan utama. Pertama, menganalisis kondisi geologi dan geomorfologi detail di Site Wagemna, yang mencakup pembagian satuan bentuk lahan, tatanan stratigrafi batuan ultramafik, serta mengidentifikasi pola struktur geologi kekar dan sesar lokal. Kedua, memetakan sebaran spasial endapan nikel laterit dan singkapan batuan dasar di seluruh wilayah penelitian guna memahami bagaimana konfigurasi bentang alam mengontrol pelapukan secara lateral. Ketiga, menganalisis secara kuantitatif korelasi linear antara parameter kemiringan lereng dengan ketebalan masing-masing horizon laterit (zona limonit dan saprolit) serta kedalaman zona pengkayaan unsur logam utama (Ni, Fe, MgO).

Geologi Daerah Penelitian

1) Fisiografi Regional Pulau Halmahera

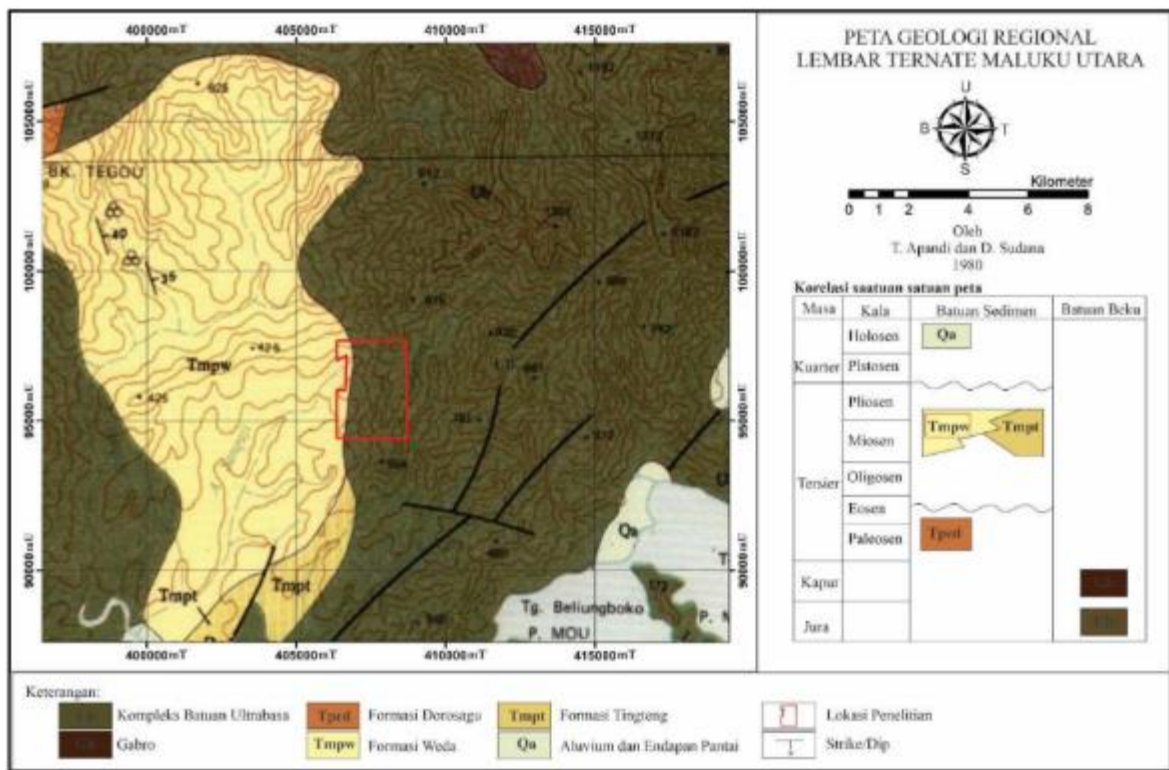
Secara fisiografis, Pulau Halmahera terbagi menjadi tiga mandala fisiografi utama, yaitu Mandala Fisiografi Halmahera Timur, Mandala Fisiografi Halmahera Barat, dan Mandala Busur Kepulauan Gunung Api Kuarter (Apandi & Sudana, 1980; Supriatna, 1980; Yasin, 1980). Secara regional, daerah penelitian yang terletak di Site Wagemna, Kecamatan Maba, Kabupaten Halmahera Timur termasuk sepenuhnya ke dalam Mandala Fisiografi Halmahera Timur. Mandala fisiografi ini meliputi wilayah lengan timur laut, lengan tenggara, serta beberapa pulau kecil di bagian timur Pulau Halmahera. Mandala Fisiografi Halmahera Timur didominasi oleh bentang alam pegunungan berlereng curam hingga terjal dengan pola torehan lembah sungai yang dalam. Titik elevasi tertinggi pada mandala ini diwakili oleh Bukit Saolat yang memiliki ketinggian mencapai 1.508 meter di atas permukaan laut (mdpl). Sebaliknya, daerah dataran di mandala ini berkembang secara sangat terbatas dan umumnya hanya terkonsentrasi pada daerah muara sungai besar seperti muara Sungai Sangaji serta area dataran di sekitar pesisir pantai. Selain morfologi pegunungan terjal, kawasan ini setempat menunjukkan bentang alam karst yang khas pada daerah yang disusun oleh batuan karbonat. Karakteristik morfologi pegunungan berlereng curam hingga terjal di lengan timur merupakan cerminan langsung dari singkapan batuan dasar keras (*basement*) yang dominan disusun oleh Kompleks Ofiolit dengan litologi batuan ultrabasa. Sementara itu, daerah dengan lereng yang lebih landai serta bentang alam karst mencerminkan keberadaan sebaran batuan karbonat (batugamping) dan batuan sedimen berumur Tersier hingga Kuarter.

2) Stratigrafi Regional Mandala Halmahera Timur

Stratigrafi regional di Mandala Halmahera Timur menunjukkan tatanan yang khas, disusun oleh batuan beku ultrabasa-basa dari Kompleks Ofiolit berumur Mesozoikum yang bertindak sebagai batuan dasar, kemudian ditindih secara tidak selaras oleh rangkaian batuan sedimen klastik dan karbonat berumur Tersier hingga Kuartar (Gambar 1). Berdasarkan peta geologi Lembar Ternate (Apandi & Sudana, 1980), tatanan stratigrafi regional dari umur tertua hingga termuda adalah sebagai berikut :

- a. **Kompleks Batuan Ultrabasa (Ub):** Satuan ini merupakan batuan penyusun tertua berumur Jura yang bertindak sebagai batuan dasar (*basement*) regional Mandala Halmahera Timur. Kompleks ini terdiri atas serpentinit, peridotit (harzburgit dan lherzolit), serta dunit. Secara megaskopis, batuan dalam kompleks ini umumnya berwarna hitam hingga hijau kehijauan, bersifat getas, intensif terbreksikan akibat deformasi tektonik, serta sering mengandung mineral ubahan berupa asbes dan garnierit. Kompleks batuan ultramafik ini merupakan batuan dasar (*protolith*) yang kaya akan mineral olivin dan piroksen, yang melatarbelakangi perkembangan endapan nikel laterit sekunder di kawasan ini.
- b. **Satuan Gabro (Gb):** Terdiri atas gabro piroksen, gabro hornblende, dan gabro olivin yang tersingkap mengintrusi Kompleks Ultrabasa.
- c. **Formasi Dodaga (Kd):** Berumur Kapur, tersusun atas perselingan serpih dengan batugamping cokelat muda serta sisipan rijang. Formasi ini menindih Kompleks Ultrabasa secara tidak selaras.
- d. **Formasi Dorosagu (Tped):** Berumur Paleosen hingga Eosen, terdiri atas batupasir berselingan dengan serpih merah dan batugamping. Batupasir formasi ini kompak, berbutir halus-kasar, sebagian gampingan, dan setempat mengandung fragmen rombakan batuan ultrabasa. Formasi ini menindih Kompleks Ultrabasa secara tidak selaras.
- e. **Formasi Bacan (Tomb):** Terbentuk setelah mengalami rumpang pengendapan (*hiatus*) dari Eosen Akhir hingga Oligosen Awal. Formasi ini berumur Oligosen hingga Miosen Bawah, tersusun oleh batuan gunung api berupa lava, breksi, dan tufa dengan sisipan konglomerat serta batupasir.
- f. **Formasi Weda (Tmpw):** Berumur Miosen Tengah hingga Awal Pliosen, diendapkan secara luas di dalam cekungan sedimentasi regional. Formasi ini terdiri atas batupasir berselingan dengan napal, tufa, konglomerat, dan batugamping yang kaya akan kandungan foraminifera plankton penunjuk umur seperti *Sphaonoidinellopsis subdehiscens* Blow dan *Globorotalia acostaensis* Blow. Konglomerat Formasi Weda yang berada di dekat Kompleks Ultrabasa mengandung material rombakan batuan ultrabasa yang melimpah. Secara regional, Formasi Weda menindih Kompleks Ultrabasa secara tidak selaras (*nonconformity*), menandakan adanya aktivitas tektonik pengangkatan dan erosi intensif sebelum kala Miosen Tengah.
- g. **Formasi Tingteng (Tmpt):** Berumur Miosen Akhir hingga Awal Pliosen, tersusun oleh batugamping hablur dan batugamping pasiran dengan sisipan napal dan batupasir tipis.
- h. **Aluvial dan Endapan Pantai (Qa):** Merupakan endapan permukaan termuda berumur Holosen yang menutupi satuan batuan di bawahnya secara tidak selaras. Terdiri atas

material lepas berupa lempung, lanau, pasir, kerikil, kerakal, dan bongkah-bongkah batuan ultramafik yang terakumulasi di sepanjang alur-alur sungai besar dan dataran pantai rendah.



Gambar 1. Peta Geologi Regional Daerah Penelitian (modifikasi dari Apandi dan Sudana, 1980)

3) Tatanan Tektonik dan Struktur Geologi Regional

Tatanan tektonik regional Pulau Halmahera sangat kompleks dan dinamis karena terletak pada zona konvergensi aktif yang melibatkan interaksi dari empat lempeng tektonik utama, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik (Lempeng Laut Filipina), Lempeng Indo-Australia, dan fragmen Lempeng Mindanao Timur. Di bagian selatannya, interaksi tektonik dikontrol oleh Sistem Sesar Sorong, suatu zona sesar mendatar mengiri regional yang memanjang dari Papua hingga Sulawesi.

Evolusi tektonik di wilayah Halmahera dimulai sejak kala Jura hingga Kapur Awal, ditandai oleh pembentukan Kompleks Ofiolit Halmahera Timur dalam tatanan busur intra-samudra (intra-oceanic arc). Pada akhir Oligosen, terjadi peristiwa tumbukan (collision) antara busur kepulauan yang merupakan bagian dari Lempeng Filipina dengan margin utara Lempeng Australia di utara Papua Nugini. Peristiwa ini menghentikan subduksi ke arah utara dan menginisiasi Sistem Sesar Sorong, yang menggerakkan fragmen mikro-lempeng Halmahera ke arah barat. Dinamika ini memicu proses obduksi, pengangkatan, dan erosi yang sangat intensif pada Kompleks Ofiolit batuan dasar.

Selanjutnya, pada periode Miosen, pergerakan lateral Halmahera ke arah barat memicu terbentuknya sistem subduksi ganda (double subduction) di kawasan Laut Maluku. Lempeng Laut Maluku menunjam ke arah barat di bawah Busur Sangihe pada awal Miosen, dan secara simultan menunjam ke arah timur di bawah Busur Halmahera pada pertengahan Miosen. Subduksi ganda ini menghasilkan konfigurasi sistem busur ganda (double arc system), di mana lengan barat Halmahera

didominasi oleh aktivitas vulkanisme Tersier-Kwartir aktif, sedangkan lengan timur Halmahera berkembang sebagai busur non-vulkanik yang didominasi oleh pengangkatan Kompleks Ofiolit basemen secara progresif.

Pada kala Pliosen, kolisi antarbusur yang menutup sepenuhnya Lempeng Laut Maluku memicu pembentukan sesar-sesar anjak (*thrust faults*) berarah barat. Secara struktural, lengan timur laut Halmahera dikontrol kuat oleh pola sesar naik regional, sesar mendatar, serta kekar berpasangan (*shear joints*) berorientasi barat laut–tenggara dan timur laut–barat daya. Keberadaan struktur geologi ini sangat krusial dalam mengontrol sirkulasi air tanah, membentuk media permeabilitas sekunder, memperdalam front pelapukan batuan dasar, serta mengontrol pola akumulasi dan pengayaan supergen nikel laterit secara lokal.

2. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif yang menggabungkan pemetaan geologi lapangan, analisis petrografi laboratorium, dan pemodelan statistik untuk mengevaluasi hubungan antara kemiringan lereng dan karakteristik fisik-geokimia endapan nikel laterit. Persiapan meliputi kajian pustaka tentang fisiografi, stratigrafi Mandala Halmahera Timur, dan genesa pelapukan ultramafik, serta pengolahan DEM untuk peta topografi, pola sungai, dan geomorfologi awal sebagai dasar perencanaan lintasan pemetaan. Pada lapangan dilakukan observasi di 135 lokasi dalam kavling 2 km × 3 km untuk mendeskripsikan litologi dan profil laterit (warna, tekstur, struktur, komposisi primer, dan derajat serpentinisasi), pengukuran kemiringan lereng dengan klinometer, serta pengukuran orientasi struktur menggunakan kompas geologi. Sembilan sampel batuan representatif diambil untuk analisis sayatan tipis ($\pm 30 \mu\text{m}$) di laboratorium untuk menentukan distribusi mineral di daerah penelitian.

Data geokimia berasal dari tujuh lubang bor eksplorasi (SDA A1, B2, C3, D4, E5, F6, dan F7) dengan ketebalan interval laterit bervariasi antara 8 hingga 24 m; seluruh lubang menembus batuan dasar. Data assay tiap 1 m mencakup Ni, Fe, dan MgO serta log pemboran deskriptif yang digunakan untuk mengidentifikasi horizon limonit, saprolit, dan batuan dasar berdasarkan ambang teoretis (limonit: Fe $\geq 30\%$ & MgO $< 3\%$; saprolit: Fe $< 30\%$ & MgO $> 3\%$ dengan akumulasi Ni; bedrock: Fe $\leq 5\%$, Ni $\leq 0,4\%$, MgO $> 30\%$). Untuk menguji pengaruh kemiringan lereng (X, derajat) terhadap ketebalan sub-horizon, total ketebalan laterit, dan kedalaman puncak pengayaan Ni (Y, meter) digunakan regresi linier sederhana $Y = a + bX$ dengan evaluasi kekuatan hubungan melalui koefisien determinasi (R^2). Hasil diproses dan diintegrasikan secara spasial untuk menghasilkan peta tematik, profil vertikal, dan interpretasi numerik genesa serta distribusi laterit nikel.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

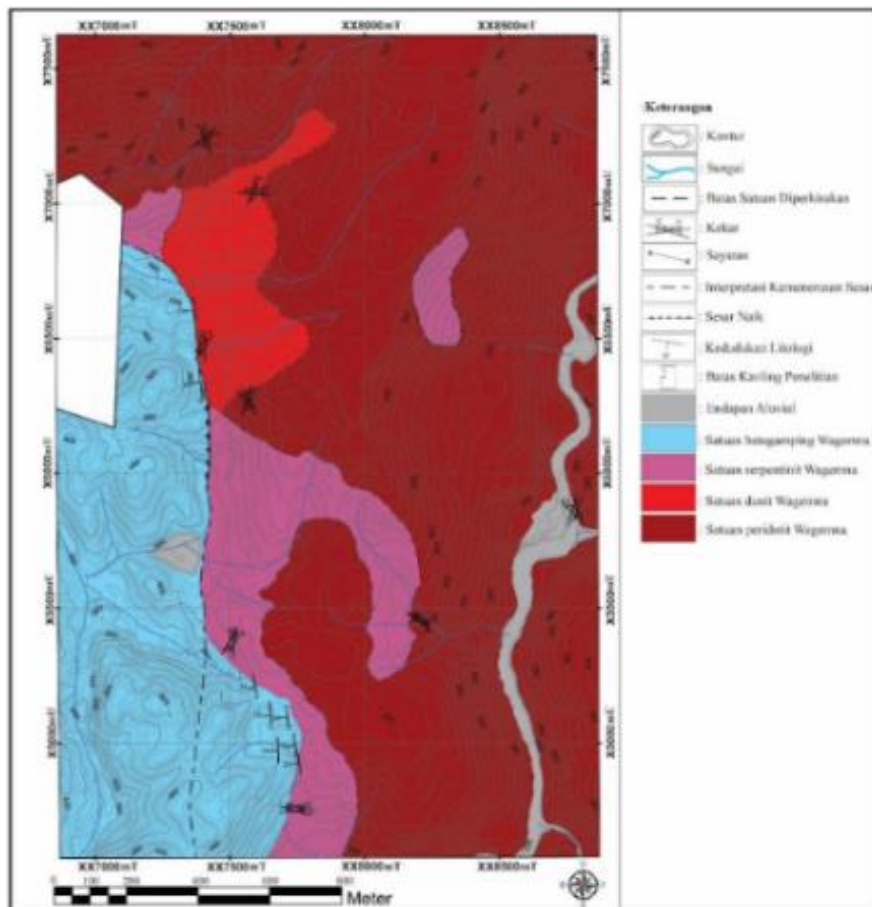
3.1 Batuan Dasar di Daerah Penelitian

Stratigrafi lokal di Site Wagemna (Gambar 2) dikelompokkan menjadi lima satuan batuan tidak resmi berdasarkan Sandi Stratigrafi Indonesia (IAGI, 2023):

- a. Satuan Peridotit Wagemna: Satuan batuan dasar yang paling dominan, mencakup 59% dari total luas daerah penelitian. Secara mikroskopis, satuan ini terdiri atas hazburgit (komposisi mineral: olivin 42%, ortopiroksen 54%, krisotil 4%) dan lherzolit (olivin 53%, ortopiroksen 33%, klinopiroksen 12%, krisotil 2%). Batuan beku ultrabasa ini umumnya

mengalami serpentinisasi derajat rendah dan dibandingkan dengan Kompleks Ofiolit Halmahera Timur yang berumur Jura.

- b. Satuan Dunit Wagemna: Mencakup 6% area penelitian. Umumnya telah mengalami pelapukan kuat di dekat permukaan sehingga singkapan segarnya jarang dijumpai. Hasil sayatan tipis menunjukkan tekstur mesh dengan komposisi olivin 82%, lizardit 17%, dan mineral opak 1% (dunit terserpentinisasi rendah). Hubungan stratigrafi dengan peridotit adalah gradasional.
- c. Satuan Serpentin Wagemna: Tersebar meluas sekitar 10% di bagian selatan. Terbentuk akibat ubahan hidrotermal akhir dari mineral olivin dan piroksen pada dunit dan peridotit. Secara mikroskopis, serpentin dicirikan oleh struktur masif dengan tekstur *veinlet*, disusun oleh lizardit (91%), krisotil (4%), dan opak (5%).
- d. Satuan Batugamping Wagemna: Mencakup 22% area di bagian barat. Terdiri atas dua litologi utama: batugamping terumbu (*bafflestone*) serta batupasir (*lithic arenite*). Satuan ini merupakan bagian dari Formasi Weda berumur Miosen Tengah – Pliosen Awal. Secara stratigrafi, batugamping menindih Kompleks Ultrabasa (peridotit, dunit, serpentin) secara tidak selaras (*nonconformity*), merepresentasikan rumpang sedimentasi yang panjang (hiatus) pasca-obduksi ofiolit.
- e. Endapan Aluvial: Mencakup 3% area di sepanjang dataran sungai sebelah timur. Terdiri atas pasir klastik, kerikil, kerakal, dan bongkah batuan ultramafik berumur Holosen.

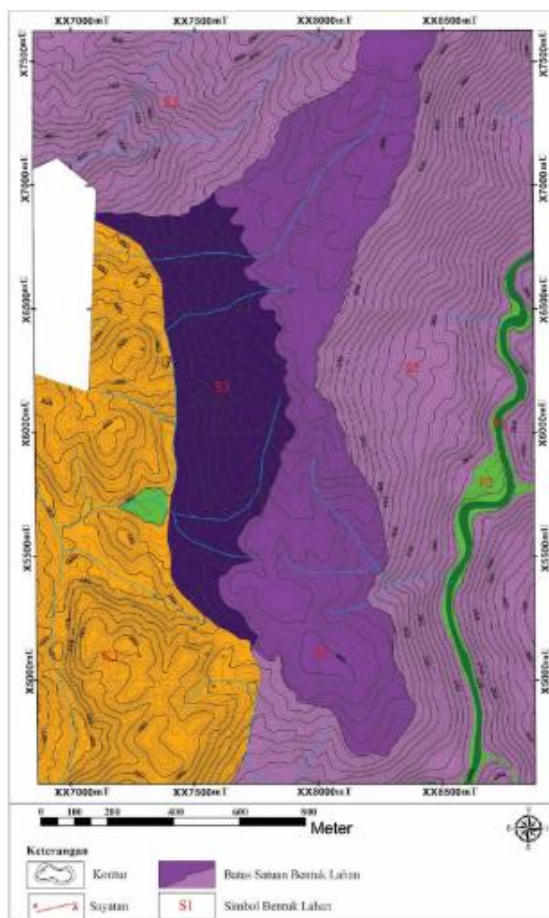


Gambar 2. Peta Geologi Daerah Penelitian

3.2 Geomorfologi

Geomorfologi daerah penelitian (Gambar 3) terbagi menjadi tiga bentuk asal utama berdasarkan morfografi, morfometri, dan morfogenesis (van Zuidam, 1985). Pertama, bentuk asal struktural meliputi punggung struktural berlereng landai (S1) yang berada di bagian tengah (mencakup sekitar 20% area dengan elevasi 355–735 mdpl) dengan lereng dari datar hingga agak curam. Zona ini menunjukkan sirkulasi air tanah yang baik sehingga mengalami pelapukan kimiawi ultramafik intensif dan pembentukan profil laterit tebal. Kedua, lereng struktural curam (S3) di bagian barat (mencakup sekitar 20% area dengan elevasi 380–600 mdpl dengan kemiringan 16°–55°) menampilkan pola drainase *rectangular* yang dikontrol oleh sistem kekar dan sesar lokal. Ketiga, lereng struktural terjal (S2) di lengan timur (meliputi sekitar 30% area dengan elevasi 215–730 mdpl) ditandai kemiringan sangat tajam dan pola aliran paralel. Proses erosi mekanik dominan sehingga akumulasi laterit terhambat.

Bentuk asal karst (perbukitan karst berlereng curam, K1/K2) menempati bagian barat sekitar 20% area (elevasi 380–500 mdpl) dan berkembang melalui pelarutan batuan gamping Formasi Weda, menghasilkan perbukitan karst rendah berlereng curam. Bentuk asal fluvial mencakup dataran aluvial (F2) di tepi sungai (meliputi sekitar 10% area dengan elevasi 200–260 mdpl) yang didominasi sedimen lepas dari pasir kasar hingga bongkah yang sering berupa material ultramafik dan tubuh sungai aktif (F1) yang merepresentasikan sekitar 5% area zona aliran dan sedimentasi terkini.



Gambar 3. Peta geomorfologi daerah penelitian. Punggung struktural berlereng landai (S1), Lereng struktural terjal (S2), Lereng struktural curam (S3), Perbukitan karst berlereng curam (K1), Tubuh Sungai (F1), dataran fluvial (F2)

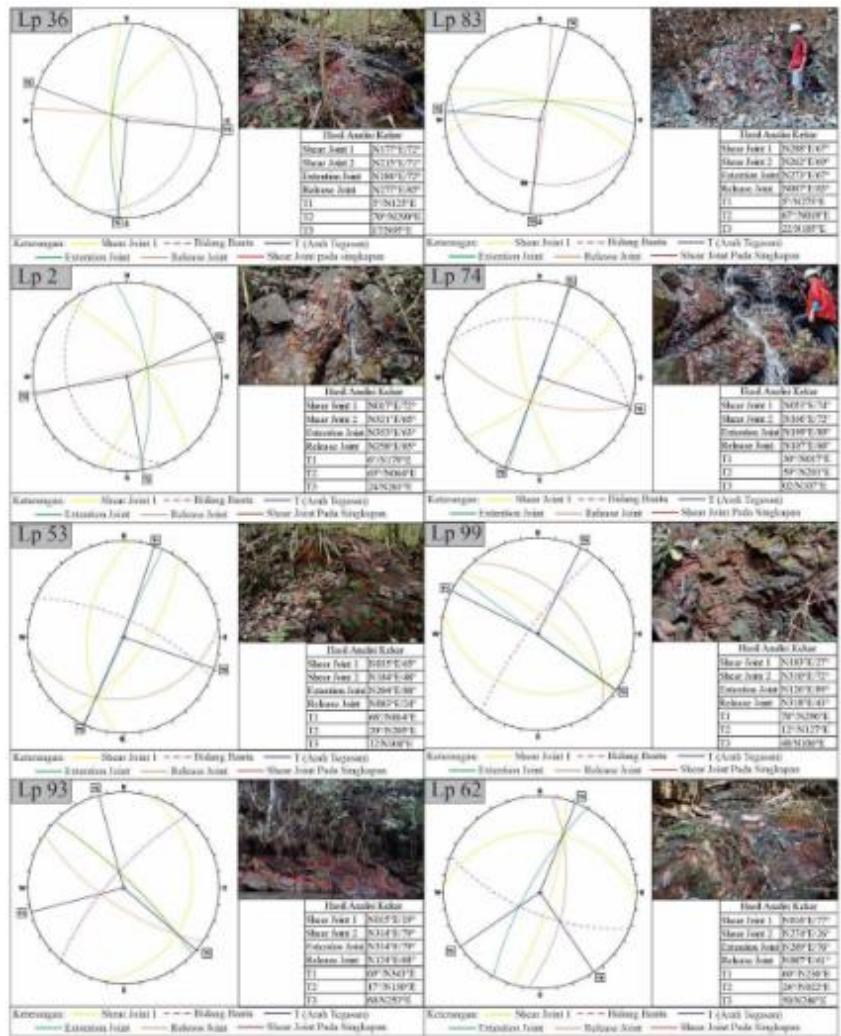
3.3 Struktur

Deformasi tektonik lokal di Site Wagemna dikendalikan oleh tegasan kompresional regional yang kuat dengan orientasi dominan utara–selatan dan barat–timur. Struktur yang teridentifikasi terutama berupa kekar gerus berpasangan dan sesar naik. Kekar gerus berkembang sangat intensif pada batuan dasar ultramafik. Analisis stereografis pada delapan lokasi kunci (LP-62, LP-83, LP-2, LP-74, LP-52, LP-99, LP-34, LP-93) menunjukkan variasi orientasi tegasan utama. Di LP-62 (dunit) tegasan utama (σ_1) mengarah N185°E dengan kekar gerus berpasangan N177°E/72° dan N215°E/71°, di LP-83 (serpentinit) σ_1 mengarah N275°E dengan kekar berpasangan N288°E/67° dan N262°E/69° (Gambar 4). Kerapatan kekar ini meningkatkan permeabilitas sekunder, mempercepat pelapukan kimiawi vertikal batuan ultramafik, dan memfasilitasi transportasi serta pengendapan nikel sekunder.

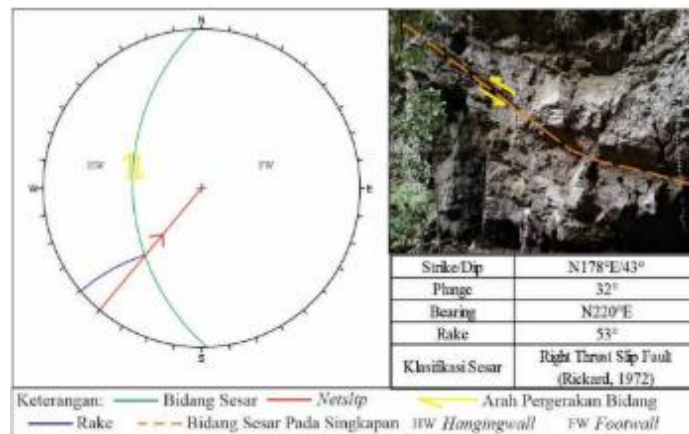
Sesar naik yang jelas di LP-42 memisahkan blok batugamping pada *hanging wall* dari serpentinit pada *footwall* (Gambar 5). Bidang sesar berorientasi N178°E/43° dengan *rake* 53° dan *plunge* 32° ke N220°E. Menurut klasifikasi Rickard (1972) sesar ini termasuk *right thrust slip fault* (sesar naik dengan komponen mendatar menganan). Kombinasi pola kekar dan sesar ini menjelaskan kontrol struktural signifikan terhadap sirkulasi fluida, zonasi pelapukan, dan distribusi laterit nikel di Site Wagemna.

3.4 Kemiringan Lereng

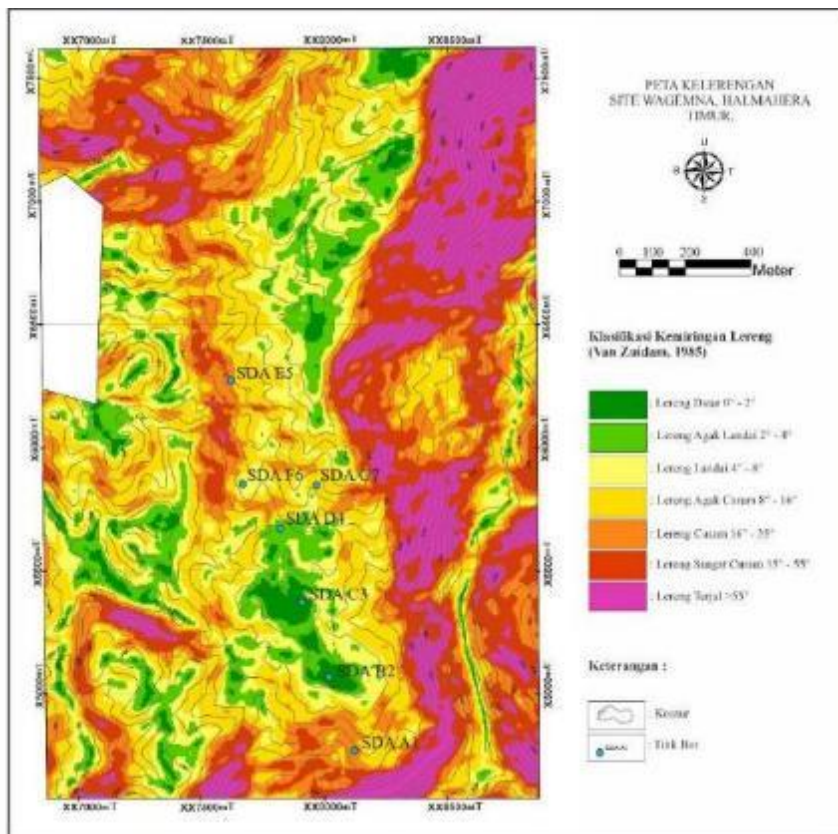
Peta kemiringan lereng disusun menurut klasifikasi van Zuidam (1985) yang membagi lereng menjadi tujuh kelas (Gambar 6); semua kelas tersebut terwakili di area penelitian. Tujuh lubang bor dipilih untuk merepresentasikan variasi vertikal litologi dan potensi pengayaan mineral pada tiap zona kelerengan. Titik SDA A1 dan E5 terletak pada lereng curam (16°–35°), SDA B2 dan C3 pada zona datar (0°–2°) yang kondusif bagi akumulasi dan pelapukan lanjut, SDA D4 pada lereng agak landai (2°–4°), F6 pada zona landai (4°–8°), dan G7 pada lereng agak curam (8°–16°) yang merepresentasikan zona transisi antara proses erosi dan akumulasi.



Gambar 4. Analisis Stereografis dan Kenampakan Struktur Geologi Kekar



Gambar 5. Struktur Sesar pada LP-42

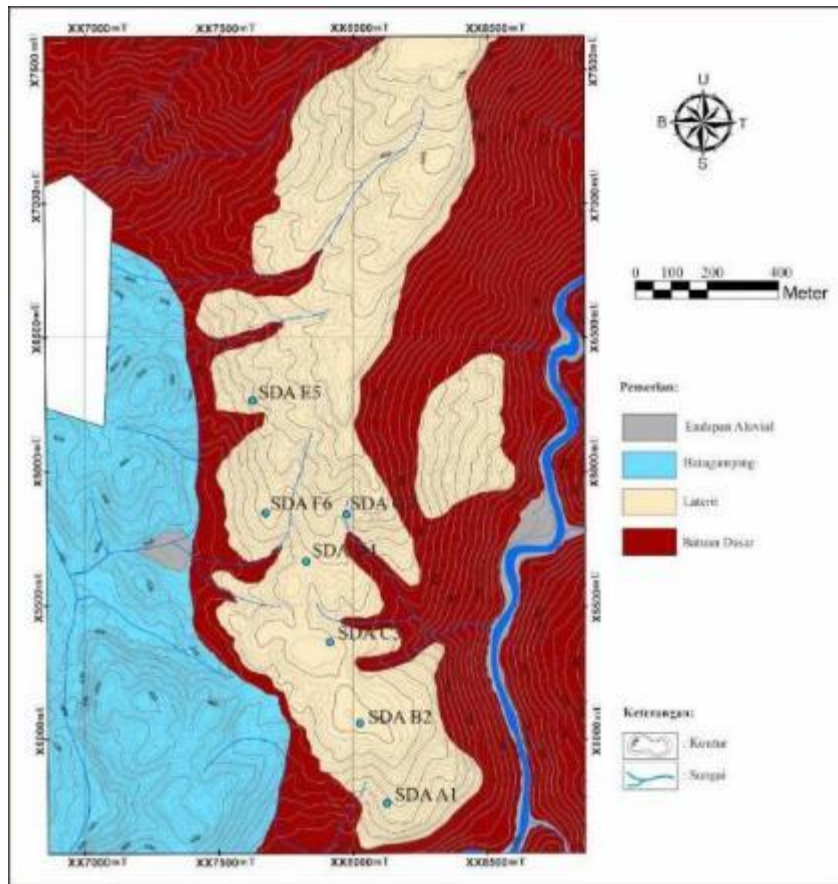


Gambar 6. Peta Kemiringan Lereng

3.5 Pola Persebaran Laterit dan Karakteristik Geokimia Vertikal

Peta sebaran laterit di Site Wagemna menunjukkan penutupan laterit pada sekitar 34% area penelitian, dengan sebaran dominan mengikuti morfologi punggung landai di bagian tengah (Gambar 7). Profil geokimia vertikal diinterpretasikan dari *assay* tujuh lubang bor eksplorasi (SDA A1, B2, C3, D4, E5, F6, G7) yang mewakili variasi kemiringan lereng dan menunjukkan tiga horizon utama.

Zona limonit menempati bagian atas profil, berwarna coklat kekuningan hingga coklat kemerahan secara megaskopis akibat akumulasi oksida-hidroksida besi sekunder (goethit, hematit). Secara kimiawi zona ini dicirikan oleh residu Fe tinggi ($\geq 30\%$) dan MgO sangat rendah ($< 3\%$) akibat pelindian intensif. Di SDA D4, zona limonit berkembang tebal ($\pm 1-16$ m) dengan Fe 30-45% dan Ni hingga $\approx 1,1\%$ (nikel terutama terikat secara adsorpsi pada struktur goethit). Zona saprolit berada di bawah limonit, berbutir sedang-kasar dengan fragmen batuan dasar tersisa, menunjukkan penurunan Fe ($< 30\%$) dan kenaikan MgO ($> 3\%$). Pengayaan supergen Ni mencapai puncak pada saprolit atas (contoh: Ni $\approx 1,5\%$ pada 18,5-19 m di SDA D4), yang diasosiasikan dengan presipitasi mineral nikel-magnesium silikat (garnierit). Batuan dasar (*bedrock*) terdiri dari ultramafik segar (peridotit/dunit) di unit terendah, dengan karakteristik kimia Fe $\leq 5\%$, Ni $\leq 0,4\%$, dan MgO $> 30\%$.



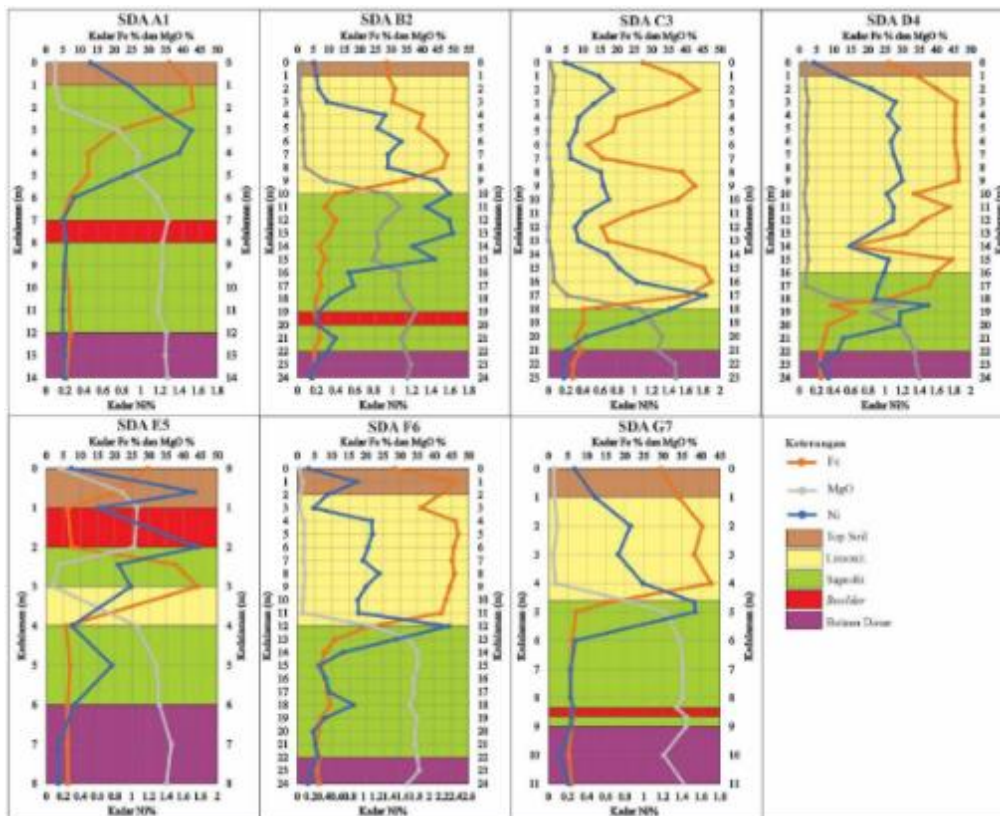
Gambar 7. Peta sebaran laterit

3.6 Profil Geokimia Nikel Laterit

Profil geokimia vertikal pada endapan nikel laterit di Site Wagemna (Gambar 8) memperlihatkan pola konsisten antara Ni, Fe, dan MgO yang mencerminkan evolusi pelapukan dari permukaan ke batuan dasar. Secara umum, zona limonit ditandai oleh puncak Fe dan MgO yang rendah, sedangkan saprolit menunjukkan penurunan Fe disertai kenaikan MgO dan puncak pengayaan Ni, lokasi puncak ini umumnya berada pada saprolit bagian atas atau zona transisi limonit–saprolit. Perbandingan antar-lubang bor menunjukkan variasi ketebalan horizon dan tinggi puncak Ni yang dikontrol oleh morfologi lokal dan kemiringan lereng: lubang pada lereng landai (mis. SDA D4) menampilkan profil limonit sangat tebal dan akumulasi Ni yang terangkat ke kedalaman lebih dangkal, sedangkan lubang pada lereng curam cenderung memperlihatkan horizon limonit tipis dan pengayaan Ni yang lebih sempit vertikalnya.

Analisis lebih lanjut terhadap Gambar 8 mengungkap beberapa poin penting: (1) korelasi terbalik Ni–Fe pada hampir semua profil mengindikasikan mekanisme mobilisasi Ni selama pelindian besi dan nikel terdorong ke bawah dan mengendap pada zona reduktif atau sebagai silikat di saprolit; (2) profil MgO yang meningkat ke bawah menandakan peralihan menuju material ultramafik yang kurang terlapukkan, sehingga puncak Ni yang berasosiasi dengan MgO moderat–tinggi mendukung interpretasi pengayaan silikat (garnierit) pada saprolit; dan (3) adanya titik dengan karakter oksida (mis. SDA C3) di mana Ni relatif lebih tinggi pada horizon limonit dibandingkan saprolit yang mengindikasikan peran signifikan adsorpsi Ni pada mineral oksida besi (goethit/hematit) pada kondisi pelapukan tertentu atau pada fase awal pelapukan (Aquino dkk., 2022).

Dari pengamatan spasial profil pada Gambar 8 dapat diambil implikasi genetik dan eksplorasi: lubang bor pada zona berlereng landai atau punggung cenderung menjadi target prioritas untuk potensi penambangan karena profil limonit tebal dan zona saprolit atas yang kaya Ni lebih berkembang dan mudah diakses. Sebaliknya, pada lereng terjal pengayaan Ni lebih tersebar dan tipis sehingga memerlukan densitas sampling lebih tinggi untuk mengevaluasi kontinuitas. Selain itu, perbedaan tipe pengayaan (silikat vs oksida) antar-titik menuntut pendekatan pemrosesan berbeda untuk sampel SDA C3 sebaiknya menguji rute hidrometalurgi yang sensitif terhadap Ni yang terikat pada oksida dibandingkan rute umum untuk garnierit di sampel saprolit.



Gambar 8. Profil geokimia distribusi kadar Fe, MgO, dan Ni

3.7 Hubungan Zona Pengkayaan Unsur Ni dengan Kemiringan Lereng

Analisis spasial dan kuantitatif terhadap data pengeboran menunjukkan adanya korelasi yang sangat erat antara morfologi lereng dengan ketebalan zona pengkayaan nikel (Ni) laterit. Berdasarkan grafik korelasi linear yang dihasilkan, hubungan antara kedalaman zona pengkayaan dan sudut kemiringan lereng (*slope*) menunjukkan tren negatif yang kuat dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0.8335$ (Gambar 9). Secara kontrol geologi dan geomorfologi, angka ini mencerminkan bahwa morfologi lereng yang datar hingga landai menyediakan kondisi lingkungan yang ideal bagi akumulasi nikel. Pada area ini, air permukaan bergerak lambat sehingga meningkatkan kapasitas infiltrasi air ke dalam tanah. Infiltrasi air yang tinggi memicu proses pelapukan kimiawi yang intensif serta pelindian (*leaching*) unsur-unsur mobil, yang kemudian memobilisasi dan mengonsentrasikan unsur Ni ke zona saprolit di kedalaman yang lebih besar.

Jika ditinjau lebih rinci berdasarkan data pada Tabel 1, mekanisme ideal pada lereng datar hingga landai ini terbukti secara nyata pada titik bor SDA D4 dan SDA C3. Pada klasifikasi lereng

datar dengan sudut kemiringan yang sangat rendah (0–2°), zona pengkayaan Ni mencapai ketebalan maksimumnya, yaitu berkisar antara 17 meter hingga 18,5 meter. Hal ini membuktikan bahwa stabilitas permukaan pada lereng datar memberikan waktu yang cukup bagi air untuk melindi batuan dasar secara vertikal. Fenomena menarik juga terlihat pada titik SDA F6 yang diklasifikasikan sebagai lereng landai (4–8°). Meskipun kedalamannya berada di angka 12 meter, titik ini mencatatkan kadar Ni tertinggi sebesar 2,3%. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa pada lereng landai, terjadi keseimbangan dinamis yang optimal antara infiltrasi air vertikal dan aliran air tanah lateral yang membawa pengkayaan sekunder Ni secara masif.

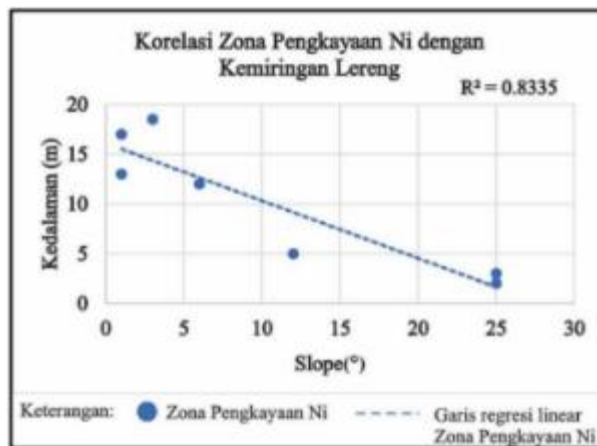
Tabel 1. Zona pengkayaan Ni

ID Sumur Bor	Zona Pengkayaan Ni > 1% (m)	Kadar Ni Tertinggi (%)	Slope (°)	Klasifikasi Lereng
SDA A1	3	1,53	16-35	Curam
SDA B2	13	1,63	0-2	Datar
SDA C3	17	1,83	0-2	Datar
SDA D4	18,5	1,5	2-4	Agak Landai
SDA E5	2	1,77	16-35	Curam
SDA F6	12	2,3	4-8	Landai
SDA G7	5	1,54	8-16	Agak Curam

Sebaliknya, kondisi yang bertolak belakang terjadi pada topografi dengan lereng yang agak curam hingga curam. Pada wilayah dengan sudut lereng yang tinggi, aliran air permukaan (*surface runoff*) menjadi jauh lebih dominan daripada infiltrasi air ke dalam tanah. Kondisi ini tidak hanya membatasi intensitas pelapukan kimiawi di bawah permukaan, tetapi juga mempercepat laju erosi mekanis yang mengikis lapisan atas tanah sebelum pelapukan matang dapat terbentuk. Akibatnya, zona pengkayaan Ni yang dihasilkan di area lereng curam menjadi sangat dangkal dan tipis.

Dampak dari dominasi aliran permukaan pada lereng terjal ini terlihat sangat jelas pada titik bor SDA E5 dan SDA A1. Pada wilayah dengan klasifikasi lereng curam (kemiringan 16–35°), ketebalan zona pengkayaan Ni merosot secara drastis hingga menyisakan 2 meter dan 3 meter saja. Pola penurunan ini juga didukung oleh data dari titik bor SDA G7 yang berada pada lereng agak curam (8–16°), di mana kedalaman zona pengkayaan berada pada angka moderat cenderung dangkal, yaitu sejauh 5 meter dengan kadar Ni 1,54%. Rangkaian data ini secara konsisten menunjukkan bahwa setiap peningkatan sudut lereng akan diikuti oleh reduksi yang signifikan pada ketebalan zona laterit yang terbentuk.

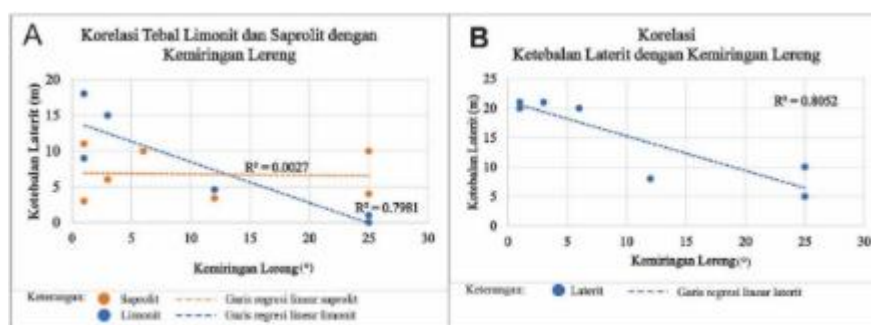
Secara statistik, nilai $R^2 = 0.8335$ pada grafik regresi linear menegaskan bahwa sebesar 83,35% variasi dari ketebalan atau kedalaman zona pengkayaan Ni dikontrol secara langsung oleh faktor sudut kemiringan lereng. Sementara itu, sisa variabilitas sebesar 16,65% ditentukan oleh faktor-faktor geologi eksternal lainnya yang tidak terekam di dalam grafik. Faktor pengontrol tambahan tersebut meliputi jenis batuan asal (*protolith*) ultramafik, densitas kekar atau struktur geologi yang bertindak sebagai jalur masuknya fluida, kondisi kerapatan vegetasi, serta fluktuasi muka air tanah lokal yang memengaruhi proses presipitasi nikel.



Gambar 9. Grafik korelasi zona pengkayaan Ni dengan kemiringan lereng

3.8 Hubungan Ketebalan Laterit dengan Kemiringan Lereng

Analisis korelasi yang disajikan pada Gambar 10 A menunjukkan adanya perbedaan dinamika yang kontras antara respons ketebalan zona limonit dan zona saprolit terhadap faktor kemiringan lereng. Untuk zona limonit, terlihat jelas adanya tren hubungan negatif linier yang signifikan. Peningkatan sudut kemiringan lereng diikuti dengan penurunan ketebalan zona limonit secara drastis, sebuah pola yang dikonfirmasi oleh nilai koefisien determinasi (R^2) yang tergolong tinggi, mencapai 0,7981. Secara mekanis, fenomena ini berakar pada kontrol morfologi terhadap laju pelapukan dan erosi. Topografi dengan lereng yang landai memberikan ruang dan waktu bagi air permukaan untuk berinfiltrasi ke dalam tanah secara maksimal, sehingga memicu proses pelapukan kimiawi yang intensif dan memungkinkan material besi (Fe) terakumulasi membentuk lapisan limonit yang tebal. Sebaliknya, pada morfologi lereng yang curam, kondisi tersebut tidak tercapai karena dominasi limpasan permukaan (*surface runoff*) serta laju erosi mekanis yang tinggi, yang pada gilirannya menghambat proses akumulasi material limonit di permukaan.



Gambar 10. Grafik korelasi tebal limonit dan saprolit dengan (A) kemiringan lereng dan (B) ketebalan laterit dengan kemiringan lereng

Hasil yang sangat berbeda terlihat pada analisis zona saprolit pada Gambar 10 A yang sama, di mana nilai korelasi statistik menunjukkan angka R^2 yang sangat rendah, yaitu hanya 0,0027. Angka ini secara tegas mengindikasikan bahwa tidak terdapat hubungan linier yang bermakna antara ketebalan zona saprolit dengan variasi sudut kemiringan lereng. Anomali ini memberikan indikasi kuat bahwa faktor eksternal berupa morfologi permukaan (kemiringan lereng) bukan merupakan faktor kontrol utama dalam pembentukan zona saprolit. Ketebalan lapisan saprolit di

area studi tampaknya jauh lebih dipengaruhi oleh variabel-variabel internal yang bekerja di bawah permukaan, seperti karakteristik litologi (jenis batuan asal), pengaruh struktur geologi regional, serta kondisi densitas kekar atau rekahan pada batuan dasar yang menentukan jalur infiltrasi fluida pelapuk.

Meskipun zona saprolit menunjukkan perilaku yang berbeda, secara umum, jika total ketebalan profil laterit ditinjau secara menyeluruh seperti yang ditampilkan pada Gambar 10 B, pola korelasi kembali menunjukkan tren negatif linier yang kuat. Peningkatan sudut lereng secara konsisten berkorelasi dengan penipisan profil laterit total, ditandai oleh nilai R^2 sebesar 0,8052. Dinamika ini mempertegas tesis utama mengenai kontrol morfologi terhadap genesa laterit: pada domain lereng yang datar hingga landai, keseimbangan antara tingginya tingkat infiltrasi air dengan rendahnya laju erosi menciptakan kondisi ideal bagi optimalisasi proses pelapukan dan pelindian (*leaching*) unsur-unsur mobil, yang pada akhirnya menghasilkan profil laterit tebal dan matang. Di sisi lain, pada domain lereng terjal atau curam, terbatasnya volume air yang berinfiltrasi serta tingginya intensitas erosi yang mengikis material permukaan menyebabkan pembentukan profil laterit menjadi terbatas dan tipis.

4. KESIMPULAN

Kondisi geologi Site Wagemna dicirikan oleh dominasi bentuk asal struktural (punggungan landai, lereng curam, dan terjal), karst, dan fluvial dengan batuan dasar ultramafik Kompleks Ofiolit (peridotit, dunit, serpentinit) yang ditindih tidak selaras oleh batugamping Formasi Weda. Struktur geologi lokal berupa sesar naik right thrust slip fault dan kekar gerus berorientasi utara-selatan mengontrol sirkulasi fluida sebagai jalur permeabilitas sekunder pelapukan. Secara lateral, endapan nikel laterit mencakup 34% area yang terkonsentrasi di punggungan berlereng landai karena mendukung retensi material, sedangkan singkapan batuan dasar dominan berada di lereng terjal dan alur sungai akibat laju erosi mekanis yang tinggi.

Analisis kuantitatif membuktikan bahwa kemiringan lereng memiliki korelasi linear negatif yang kuat dengan kedalaman zona pengkayaan Ni ($R^2 = 0,8335$) dan total ketebalan profil laterit ($R^2 = 0,8052$), di mana topografi datar-landai mengoptimalkan infiltrasi air untuk membentuk profil pengkayaan yang tebal dan mendalam. Selain itu, ditemukan dikotomi kontrol fisik pada sub-horizon laterit dimana ketebalan zona limonit sangat dipengaruhi oleh kemiringan lereng permukaan ($R^2 = 0,7981$) karena sensitif terhadap erosi, sementara ketebalan zona saprolit tidak dipengaruhi secara linear oleh kelerengan ($R^2 = 0,0027$) melainkan dikontrol oleh faktor internal bawah permukaan seperti karakteristik batuan asal dan kerapatan kekar batuan dasar.

DAFTAR PUSTAKA

- Apandi, T., & Sudana, D. (1980). *Geological map of the Ternate sheet area, North Maluku*. Geological Research and Development Centre.
- Aquino, K. A., Arcilla, C. A., Schardt, C., & Tupaz, C. A. J. (2022). Mineralogical and Geochemical Characterization of the Sta. Cruz Nickel Laterite Deposit, Zambales, Philippines. *Minerals*, 12(3), 305. <https://doi.org/10.3390/min12030305>
- Arsat, & Munthe, A. L. (2024, Oktober 7). *Geochemical analysis of block X nickel laterite: Implication for optimal ore upgrading*. PIT IAGI BALIKPAPAN 2024.
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinities. *Elements*, 9(2), 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Gleeson, S. A., Butt, C. R. M., & Elias, M. (2003). Nickel Laterites: A Review. *SEG Discovery*, (54), 1–18. <https://doi.org/10.5382/SEGnews.2003-54.fea>

- Golightly, J. P. (1981). Nickeliferous Laterite Deposits. Dalam B. J. Skinner (Ed.), *Seventy-Fifth Anniversary Volume* (hlm. 710–735). Economic Geology Publishing Company. <https://doi.org/10.5382/AV75.18>
- 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. (2024). Pengaruh Kemiringan Lereng Terhadap Ketebalan Endapan Nikel Laterit Daerah Tobimeita, Kecamatan Langgikima, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 6(3), 174–185. <https://doi.org/10.14710/jgt.6.3.2023.174-185>
- IAGI. (2023). *Sandi Stratigrafi Indonesia Edisi 2023*. Ikatan Ahli Geologi Indonesia.
- Ilham, M., Sampe, H., Patanduk, A., Al Mubarak, M. H., & S., N. R. (2021). PENGARUH BATUAN DASAR DAN KELERENGAN TERHADAP KADAR DAN KETEBALAN NIKEL LATERIT STUDI KASUS DAERAH PETASIA, MOROWALI UTARA. *JURNAL TEKNIK GEOLOGI : Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 4(2), 23. <https://doi.org/10.30872/jtgeo.v4i2.5452>
- Kenedy, L. V. F., & Pambudi, S. (2026). Pengaruh Kemiringan Lereng dan Litologi Batuan Dasar terhadap Kadar Nikel pada Endapan Nikel Laterit di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 1159–1168. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1751>
- Konopka, G., Szamałek, K., & Zglinicki, K. (2022). Ni-Co Bearing Laterites from Halmahera Island (Indonesia). *Applied Sciences*, 12(15), 7586. <https://doi.org/10.3390/app12157586>
- Rickard, M. J. (1972). Fault Classification: Discussion. *GSA Bulletin*, 83(8), 2545–2546. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1972\)83%5B2545:FCD%5D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1972)83%5B2545:FCD%5D2.0.CO;2)
- Supriatna, S. (1980). *Geological map of the Morotai sheet area, North Maluku*. Geological Research and Development Centre.
- Syafrizal, Heriawan, M. N., Anggayana, K., Indriati, T., & Andriansyah, R. (2009). STUDI GENESA DAN KARAKTERISASI HORIZON LATERIT PADA ENDAPAN NIKEL LATERIT : STUDI KASUS ENDAPAN LATERIT DI HALMAHERA TIMUR, MALUKU UTARA. *PROSIDING TPT XVIII PERHAPI 2009*. TPT XVIII PERHAPI 2009.
- van Zuidam, R. (1985). Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping. *ITC, Smits Publ., Enschede, The Hague*.
- Yasin, A. (1980). *Geological map of the Bacan sheet area, North Maluku*. Geological Research and Development Centre.