

Studi Tipe Endapan Nikel Laterit Pada Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah

Anisa Sawitri B. Bania¹, Aang Panji Permana¹, Ronal Hutagalung¹
¹Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Universitas Negeri Gorontalo, Indonesia
*Email Koresponden: anisasawitry19622@gmail.com

Diterima: 21-05-2026

Disetujui: 22-06-2026

Publish: 30-06-2026

Abstrak Endapan nikel laterit merupakan sumber utama nikel yang terbentuk akibat proses pelapukan intensif batuan ultramafik di wilayah tropis. Karakterisasi tipe endapan menjadi penting untuk memahami mekanisme pengayaan nikel dan mendukung kegiatan eksplorasi yang lebih efektif. Penelitian ini bertujuan mengkarakterisasi serta menentukan tipe endapan nikel laterit di wilayah IUP PT Bumi Kalaena Persada, Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah. Penelitian dilakukan melalui analisis geomorfologi, observasi geologi permukaan, interpretasi data pengeboran, analisis geokimia menggunakan X-Ray Fluorescence (XRF), dan analisis petrografi. Penentuan tipe endapan didasarkan pada distribusi kadar Ni, karakteristik mineralogi, posisi muka air tanah, dan mekanisme akumulasi nikel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa profil laterit berkembang di atas batuan ultramafik berupa lherzolit terserpentinisasi yang termasuk dalam Kompleks Ultramafik. Kadar Ni mengalami pengayaan dominan pada zona saprolit dengan rentang 1,24–2,38%, disertai peningkatan kandungan MgO dan SiO₂ serta penurunan Fe. Analisis mineralogi menunjukkan keberadaan mineral hydrous Mg–Ni silicate berupa garnierit, talk, dan serpentin sebagai mineral pembawa utama nikel. Posisi muka air tanah diinterpretasikan berada pada zona transisi limonit–saprolit yang berperan dalam mengontrol mobilitas, presipitasi, dan akumulasi nikel. Integrasi karakteristik geokimia, mineralogi, hidrogeologi, dan pola akumulasi nikel menunjukkan bahwa endapan nikel laterit di daerah penelitian termasuk tipe hydrous silicate dengan zona saprolit sebagai horizon utama pengayaan nikel.

Kata kunci: Nikel Laterit; Hydrous Silicate; Saprolit; Geokimia; Morowali

Abstract Nickel laterite deposits represent the primary source of nickel formed through intensive weathering of ultramafic rocks in tropical regions. Deposit characterization is essential for understanding nickel enrichment mechanisms and supporting more effective exploration strategies. This study aims to characterize and classify the nickel laterite deposit type within the IUP area of PT Bumi Kalaena Persada, Bahodopi District, Morowali Regency, Central Sulawesi, Indonesia. The research employed geomorphological analysis, surface geological observations, drilling data interpretation, geochemical analysis using X-Ray Fluorescence (XRF), and petrographic examination. Deposit classification was based on Ni grade distribution, mineralogical characteristics, groundwater table position, and nickel accumulation mechanisms. The results indicate that the laterite profile developed over serpentinized lherzolite belonging to the Ultramafic Complex. Nickel enrichment is predominantly concentrated within the saprolite zone, with grades ranging from 1.24% to 2.38%, accompanied by increasing MgO and SiO₂ contents and decreasing Fe concentrations. Mineralogical analysis identified hydrous Mg–Ni silicate minerals, including garnierite, talc, and serpentine, as the principal nickel-bearing phases. The groundwater table is interpreted to occur within the limonite–saprolite transition zone, where it plays a significant role in controlling nickel mobility, precipitation, and accumulation. The integration of geochemical, mineralogical, hydrogeological, and nickel accumulation characteristics indicates that the deposit is classified as a hydrous silicate type, with the saprolite zone representing the principal horizon of nickel enrichment.

Keywords: Nickel Laterite; Hydrous Silicate; Saprolite; Geochemistry; Morowali

1. PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu komoditas mineral strategis yang berperan penting dalam mendukung perkembangan industri baja tahan karat dan teknologi energi terbarukan. Dalam beberapa tahun terakhir, kebutuhan nikel dunia mengalami peningkatan signifikan seiring berkembangnya industri baterai kendaraan listrik yang memerlukan pasokan nikel dalam jumlah besar. Kondisi tersebut mendorong peningkatan aktivitas eksplorasi dan pengembangan sumber daya nikel di berbagai negara penghasil nikel, termasuk Indonesia yang saat ini menjadi salah satu produsen dan pemilik cadangan nikel terbesar di dunia. Sebagian besar sumber daya nikel Indonesia berasal dari endapan nikel laterit yang berkembang pada wilayah beriklim tropis dengan batuan ultramafik sebagai batuan induk (Dalvi et al., 2004; Mudd, 2010; Butt & Cluzel, 2013; Marsh et al., 2013; Jowitt et al., 2020).

Endapan nikel laterit terbentuk akibat proses pelapukan kimia yang berlangsung secara intensif pada batuan ultramafik seperti peridotit, dunit, harzburgit, dan lherzolit. Proses lateritisasi menyebabkan redistribusi unsur-unsur kimia melalui mekanisme pelindian, mobilisasi, dan pengayaan sehingga menghasilkan profil laterit yang umumnya tersusun atas zona limonit, zona transisi, zona saprolit, dan batuan dasar. Karakteristik geokimia dan mineralogi yang berkembang pada setiap zona mencerminkan tingkat pelapukan, mobilitas unsur, serta kondisi lingkungan pembentukannya (Trescases, 1975; Elias, 2002; Freyssinet et al., 2005; Golightly, 2010; Berger et al., 2011).

Pembentukan dan distribusi kadar nikel pada profil laterit dikontrol oleh berbagai faktor geologi dan lingkungan. Faktor-faktor tersebut meliputi komposisi batuan induk, tingkat serpentinisasi, kondisi geomorfologi, struktur geologi, sistem drainase, curah hujan, serta kondisi hidrogeologi yang memengaruhi sirkulasi air tanah selama proses lateritisasi. Interaksi faktor-faktor tersebut mengontrol mekanisme pelindian, transportasi, dan presipitasi unsur nikel sehingga menghasilkan karakteristik endapan yang berbeda pada setiap wilayah (Brand et al., 1998; Freyssinet et al., 2005; Butt & Cluzel, 2013; Wells et al., 2009; Fan & Gerson, 2011).

Secara genetik dan mineralogi, endapan nikel laterit umumnya dikelompokkan menjadi tiga tipe utama, yaitu Hydrous Silicate Deposit, Clay Silicate Deposit, dan Oxide Deposit. Tipe hydrous silicate dicirikan oleh pengayaan nikel pada zona saprolit yang berasosiasi dengan mineral hidrous magnesium-nikel silikat seperti garnierit, serpentin, dan talk. Tipe clay silicate dicirikan oleh keberadaan mineral lempung pembawa nikel yang terbentuk pada kondisi hidrogeologi tertentu, sedangkan tipe oxide menunjukkan pengayaan nikel yang dominan pada zona limonit yang kaya mineral oksida besi seperti goetit dan hematit (Golightly, 2010; Butt & Cluzel, 2013; Wells et al., 2009; Fan & Gerson, 2011).

Kabupaten Morowali, Sulawesi Tengah, merupakan salah satu wilayah penghasil nikel utama di Indonesia yang tersusun oleh Kompleks Ultramafik Sulawesi Timur. Kompleks batuan ultramafik yang luas serta kondisi iklim tropis yang mendukung pelapukan intensif menyebabkan berkembangnya endapan nikel laterit dengan ketebalan dan kadar yang relatif tinggi. Kawasan Bahodopi menjadi salah satu pusat aktivitas eksplorasi dan penambangan nikel karena memiliki potensi sumber daya yang besar dan karakteristik geologi yang mendukung proses pengayaan nikel (Kadariusman et al., 2004; Hall, 2012; Van Leeuwen & Pieters, 2011).

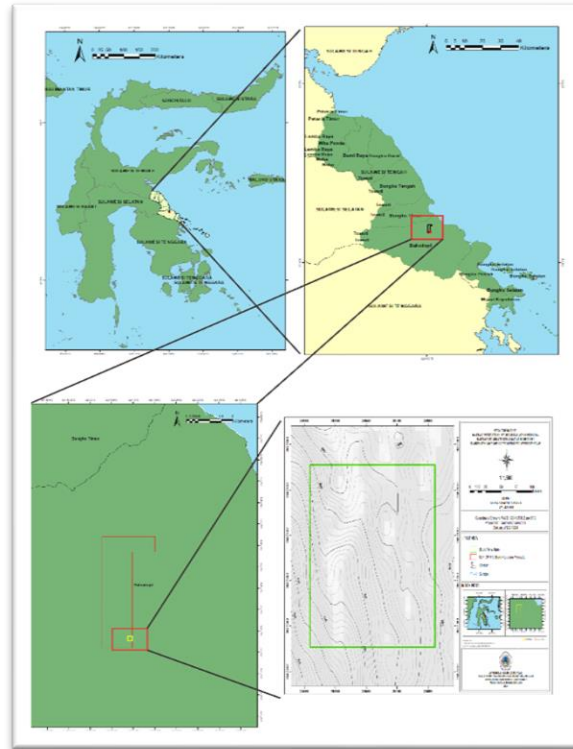
Berbagai penelitian sebelumnya mengenai endapan nikel laterit umumnya berfokus pada distribusi kadar unsur, karakteristik geokimia, atau zonasi laterit. Kajian yang mengintegrasikan distribusi kadar nikel, karakteristik mineralogi, posisi muka air tanah, dan mekanisme akumulasi nikel dalam satu kerangka interpretasi masih relatif terbatas, khususnya pada wilayah Bahodopi. Padahal, integrasi parameter-parameter tersebut dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor pengontrol pengayaan nikel dan karakteristik tipe endapan yang berkembang pada suatu profil laterit. Pendekatan tersebut juga penting untuk meningkatkan akurasi interpretasi genesa endapan dan potensi ekonominya (Freyssinet et al., 2005; Butt & Cluzel, 2013; Marsh et al., 2013; Jowitt et al., 2020).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-analitik yang mengintegrasikan data geomorfologi, geologi permukaan, pengeboran, geokimia, dan petrografi untuk mengkarakterisasi profil laterit serta menentukan tipe endapan nikel laterit pada wilayah penelitian. Tahapan penelitian meliputi observasi lapangan, survei geologi permukaan, akuisisi data bawah permukaan melalui pengeboran, preparasi sampel, analisis laboratorium, serta integrasi dan interpretasi data. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara karakteristik geologi, distribusi kadar nikel, mineralogi, kondisi hidrogeologi, dan mekanisme akumulasi nikel dalam profil laterit.

2.1 Lokasi Penelitian

Daerah penelitian terletak pada wilayah IUP PT Bumi Kalaena Persada, Desa Siumbatu, Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali, Provinsi Sulawesi Tengah. Secara geografis lokasi penelitian berada pada koordinat $2^{\circ}49'41,02''$ LS dan $122^{\circ}0'55,46''$ BT dengan luas area pengamatan sekitar ± 4 ha. Secara regional, wilayah penelitian termasuk dalam Kompleks Ultramafik Sulawesi Timur yang didominasi oleh batuan ultramafik sebagai batuan induk pembentuk endapan nikel laterit. Pemilihan lokasi didasarkan pada keterwakilan profil laterit, keberadaan data eksplorasi, dan potensi pengayaan nikel yang berkembang pada daerah tersebut.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui survei lapangan dan pengambilan data bawah permukaan. Survei geologi permukaan bertujuan memperoleh informasi geomorfologi, litologi, struktur geologi, tingkat pelapukan batuan, dan karakteristik persebaran laterit. Analisis geomorfologi dilakukan melalui observasi lapangan yang dipadukan dengan interpretasi model elevasi digital untuk mengidentifikasi bentuk lahan dan proses geomorfik yang berkembang pada daerah penelitian.

Data bawah permukaan diperoleh melalui kegiatan pengeboran menggunakan mesin Jacro 175 dengan pipa bor tipe HQ berdiameter 3,5 inci. Pengeboran dilakukan pada 16 titik bor dengan jarak antar titik sekitar 50 m. Data pengeboran digunakan untuk mengidentifikasi ketebalan zona limonit, zona transisi, zona saprolit, dan batuan dasar (bedrock), serta untuk mengetahui variasi vertikal karakteristik geokimia dan mineralogi endapan nikel laterit.

Sampel inti bor (core) yang mewakili masing-masing zona laterit selanjutnya dipilih untuk analisis laboratorium. Sampel yang digunakan meliputi material limonit, saprolit, dan bedrock yang dianggap representatif terhadap variasi litologi dan kadar nikel pada daerah penelitian.

2.3 Teknik Analisis Data

2.3.1 Analisis Petrologi dan Petrografi

Analisis petrologi dilakukan secara megaskopis melalui pengamatan warna, tekstur, struktur, tingkat pelapukan, dan komposisi mineral utama batuan menggunakan bantuan lup geologi. Analisis ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik batuan induk yang berperan dalam pembentukan profil laterit.

Analisis petrografi dilakukan terhadap tiga sampel batuan representatif menggunakan mikroskop polarisasi pada sayatan tipis (thin section). Pengamatan meliputi identifikasi mineral penyusun, tekstur, struktur, hubungan antar mineral, dan tingkat alterasi batuan. Penentuan jenis batuan ultramafik mengacu pada klasifikasi batuan plutonik menurut Streckeisen (1974). Hasil analisis petrografi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh komposisi batuan induk terhadap perkembangan profil laterit dan distribusi nikel.

2.3.2 Analisis Geokimia

Analisis geokimia dilakukan menggunakan metode X-Ray Fluorescence (XRF) terhadap sampel hasil pengeboran yang mewakili zona limonit, saprolit, dan batuan dasar. Sebelum proses analisis, sampel

terlebih dahulu melalui tahapan preparasi yang meliputi pengeringan, penghancuran, penghalusan hingga ukuran lolos 200 mesh, dan pembentukan pelet.

Parameter geokimia yang dianalisis meliputi unsur dan oksida utama yang berperan dalam proses lateritisasi, yaitu Ni, Fe, MgO, SiO₂, Al₂O₃, CaO, dan Co. Data geokimia digunakan untuk mengevaluasi pola distribusi unsur pada setiap zona laterit serta hubungan antara kadar nikel dengan unsur-unsur pengontrol selama proses pelapukan dan pengayaan.

2.5 Analisis Tipe Endapan Nikel Laterit

Penentuan tipe endapan nikel laterit dilakukan melalui integrasi data geokimia, mineralogi, karakteristik profil laterit, posisi muka air tanah, dan mekanisme akumulasi nikel. Distribusi kadar Ni digunakan untuk mengidentifikasi zona pengayaan utama, sedangkan karakteristik mineralogi digunakan untuk menentukan mineral pembawa nikel yang dominan pada setiap horizon laterit.

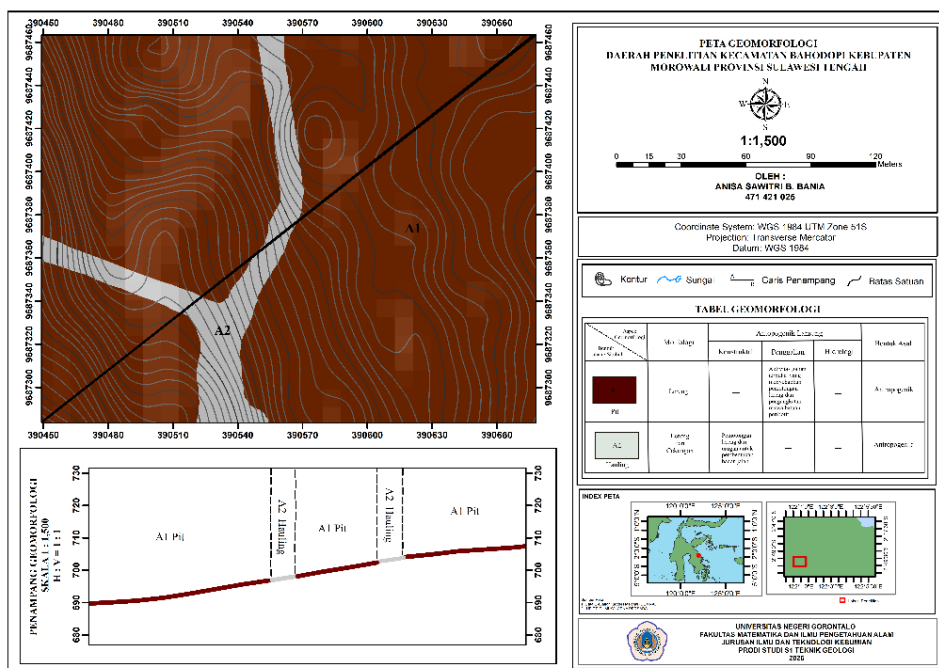
Interpretasi posisi muka air tanah dilakukan berdasarkan perubahan karakteristik geokimia antar zona laterit yang ditunjukkan oleh variasi kandungan Fe, MgO, SiO₂, dan Ni. Selanjutnya, pola akumulasi nikel dianalisis berdasarkan hubungan antara distribusi kadar Ni, karakteristik mineralogi, dan kondisi hidrogeologi pada profil laterit. Klasifikasi tipe endapan mengacu pada model endapan nikel laterit yang dikemukakan oleh Freyssinet et al. (2005), yang membedakan endapan menjadi Hydrous Silicate Deposit, Clay Silicate Deposit, dan Oxide Deposit. Hasil integrasi seluruh parameter digunakan untuk menentukan tipe endapan nikel laterit yang berkembang pada daerah penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Geologi Daerah Penelitian

3.1.1 Geomorfologi

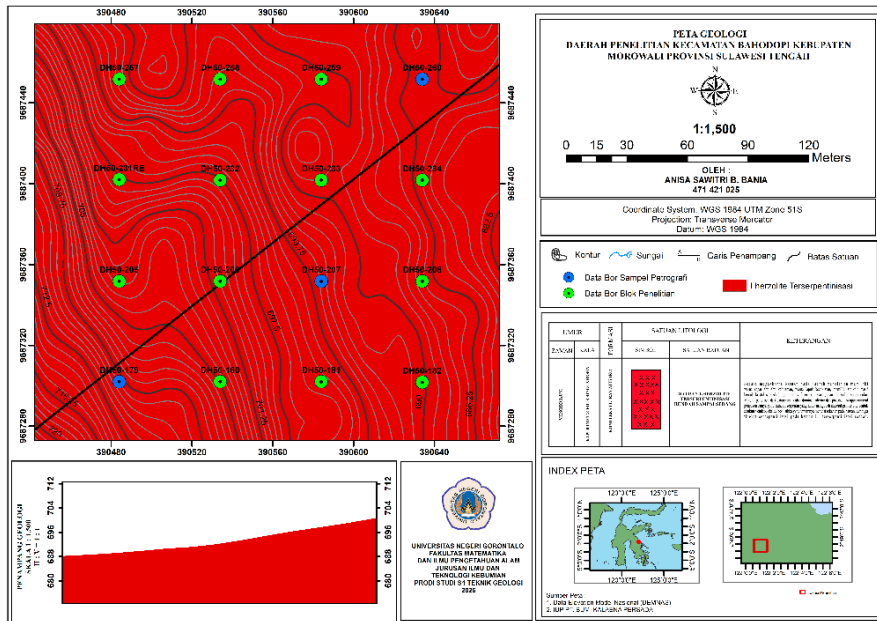
Analisis geomorfologi menunjukkan bahwa bentang alam daerah penelitian telah mengalami modifikasi yang signifikan akibat aktivitas pertambangan. Berdasarkan klasifikasi geomorfologi antropogenik, wilayah penelitian termasuk ke dalam bentuk lahan montanogenic yang dicirikan oleh perubahan morfologi alami menjadi area bukaan tambang dan infrastruktur pendukung. Satuan pit mendominasi sekitar 90% area penelitian, sedangkan satuan jalan hauling menempati sekitar 10% area. Dominasi bentang alam antropogenik menunjukkan bahwa morfologi asli telah mengalami perubahan akibat aktivitas penggalian pada batuan ultramafik yang menjadi batuan induk endapan nikel laterit. Meskipun demikian, karakteristik geomorfologi yang relatif landai hingga bergelombang masih memungkinkan berlangsungnya proses infiltrasi dan pelindian yang berperan dalam perkembangan profil laterit.



Gambar 2. Peta Geomorfologi Daerah Penelitian

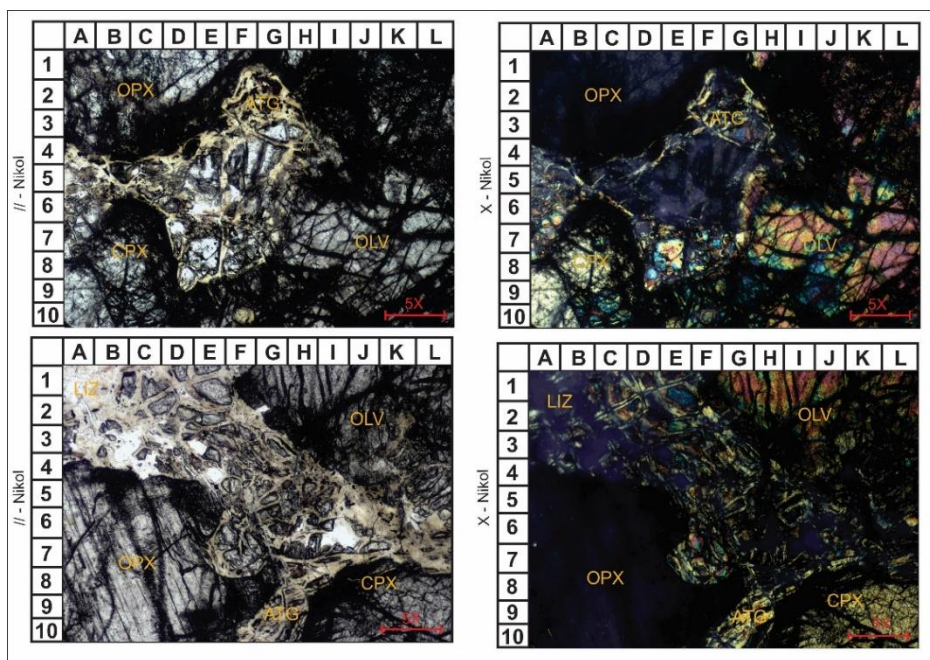
3.1.2 Litologi dan Stratigrafi

Hasil pengamatan lapangan dan analisis petrografi menunjukkan bahwa batuan dasar penyusun daerah penelitian termasuk ke dalam Kompleks Ultramafik yang didominasi oleh lherzolit terserpentinisasi. Kehadiran mineral serpentin sebagai hasil alterasi mineral primer mengindikasikan bahwa batuan induk telah mengalami proses serpentinisasi sebelum berlangsungnya lateritisasi. Kondisi tersebut penting karena serpentinisasi dapat meningkatkan porositas dan permeabilitas batuan sehingga mempercepat sirkulasi fluida pelapukan dan mendukung proses pengayaan nikel. Keberadaan lherzolit terserpentinisasi juga menunjukkan bahwa batuan induk memiliki kandungan mineral ferromagnesian yang cukup tinggi sebagai sumber utama nikel selama proses pelapukan.



Gambar 3. Peta Geologi Daerah Penelitian

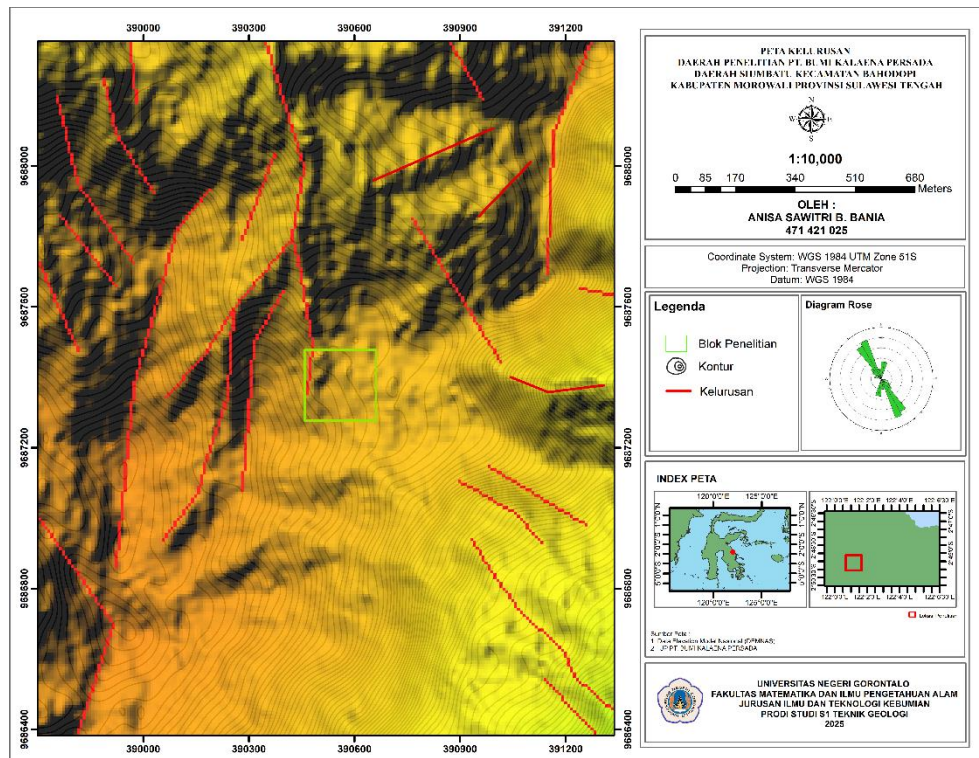
Analisis petrografi memperlihatkan dominasi mineral olivin, piroksen, dan serpentin yang menunjukkan karakteristik batuan ultramafik yang telah mengalami alterasi. Kehadiran mineral serpentin memperkuat interpretasi bahwa batuan induk mengalami proses serpentinisasi yang berperan penting dalam pembentukan profil laterit dan pelepasan unsur nikel selama proses pelapukan.



Gambar 4. Sampel Analisis Petrografi Daerah Penelitian

3.1.3 Struktur Geologi

Interpretasi struktur geologi berdasarkan analisis kelurusan menggunakan data DEMNAS menunjukkan pola dominan berarah barat laut–tenggara. Arah tersebut sejalan dengan pola struktur regional Sulawesi Timur yang berkembang akibat aktivitas tektonik regional. Walaupun struktur geologi tidak dapat diamati secara langsung karena tingginya tingkat pelapukan, keberadaan sistem kelurusan tersebut diduga berperan dalam mengontrol pergerakan fluida pelapukan dan distribusi air tanah selama proses lateritisasi. Kondisi ini berpotensi memengaruhi perkembangan profil laterit dan distribusi pengayaan nikel pada zona saprolit.



Gambar 5. Peta Struktur Geologi Daerah Penelitian

3.2 Distribusi Geokimia Nikel pada Profil Laterit

Hasil analisis XRF menunjukkan bahwa distribusi nikel pada daerah penelitian memperlihatkan pola pengayaan yang berbeda antara zona limonit dan zona saprolit. Pada zona limonit, kadar Ni umumnya berada pada kisaran 0,14–1,19%, sedangkan pada zona saprolit meningkat menjadi 1,24–2,38% (Tabel 1). Pola tersebut menunjukkan bahwa pengayaan nikel berlangsung lebih intensif pada zona saprolit dibandingkan zona limonit.

Peningkatan kadar Ni pada zona saprolit diikuti oleh meningkatnya kandungan MgO dan SiO₂ serta menurunnya kadar Fe. Hubungan tersebut mengindikasikan bahwa nikel berasosiasi dengan mineral silikat hasil alterasi yang berkembang pada zona saprolit. Sebaliknya, zona limonit dicirikan oleh tingginya kandungan Fe dan Al₂O₃ yang mencerminkan dominasi mineral oksida besi sebagai hasil pelapukan lanjut. Pola geokimia tersebut menunjukkan adanya migrasi nikel dari bagian atas profil menuju zona yang lebih dalam melalui proses pelindian dan pengendapan kembali selama proses lateritisasi.

Tabel 1. Kadar Ni Hasil Analisis X-Ray Fluorescence (XRF) Pada Daerah Penelitian

No	Hole Id	Zona Laterit	Kedalaman	Ni (%)	Fe (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)
1	DH50-260	Limonit	0 - 10,6 m	0,25 - 1,03 %	53,92 - 63,07 %	12,08 - 19,02%	2,34 - 17,44%	0,49 - 22,47%
			10,6 - 24,7 m	1,24 - 2,31 %	10,32 - 24,65 %	33,80 - 44,09%	12,2 - 28,66%	1,41 - 13,52%
		Saprolit	m	%	24,65 %	44,09%	28,66%	13,52%

2	DH50-207	Limunit	0 - 3,6 m	0,41 0,61%	- 57,50 66,16%	- 11,43 12,83%	- 1,42 1,55%	- 2,58 7,73%	-
		Saprolit	3,6 - 22 m	1,31 %	- 2,30 43,65%	10, 84 45,50%	- 13,69 45,50%	- 11,34 32,54%	- 0,82 4,44%
3	DH50-179	Limunit	0 - 5.6 m	0,41 0,82%	- 53,18 59,34%	- 11,76 13,02%	- 2,40 9,45%	- 0,81 12,43%	-
		Saprolit	5,6 - 20 m	1,27 1,91%	- 9,14 29,57%	- 32,89 43,94%	- 17,01 28,19%	- 0,52 0,40%	-
4	DH50-231RE	Limunit	0 - 3,6 m	0,43 0,61%	- 57,50 66,16%	- 14,61 20,99%	- 2,23 2,68%	- 2,47 10,37%	-
		Saprolit	3,60 - 20 m	1,33 2,03%	- 9,02 46,65%	- 28,23 46,54%	- 13,21 29,86%	- 0,82 11,69%	-
5	DH50-180	Limunit	0 - 5 m	0,18 0,65%	- 44,23 59,70%	- 11,23 12,99%	- 0,77 1,79%	- 0,52 4,28%	-
		Saprolit	5 - 27 m	1,26 1,95%	- 9,00 34,84%	- 13,38 41,43%	- 13,07 30,79%	- 0,20 2,90%	-
6	DH50-233	Limunit	0 - 7,5 m	0,36 1,19%	- 55,86 59,02%	- 10,46 13,77%	- 2,20 9,30%	- 0,81 10,68%	-
		Saprolit	7,5 - 33 m	1,34 1,88%	- 6,46 18,45%	- 31,60 43,89%	- 17,93 30,79%	- 0,44 6,39%	-
7	DH50-182	Limunit	0 - 8,4 m	0,28 1,04%	- 54,31 65,37%	- 10,00 12,03%	- 1,36 4,44%	- 0,47 5,34%	-
		Saprolit	8,4 - 21 m	1,29 1,86%	- 9,02 15,68%	- 16,23 41,43%	- 22,58 30,90%	- 0,28 2,33%	-
8	DH50-206	Limunit	0 - 10 m	0,9 0,72%	- 44,37 58,99%	- 11,02 14,03%	- 1,21 5,74%	- 1,14 5,53%	-
		Saprolit	10 -16 m	1,35 1,85%	- 6,93 14,52%	- 27,63 39,87%	- 15,74 29,84%	- 1,12 3,68%	-
9	DH50-234	Limunit	0 - 8 m	0, 24 1,09%	- 44,49 57,38%	- 12,05 14,21%	- 2,39 10,58%	- 2,20 22,47%	-
		Saprolit	8 - 22 m	1,28 2,02%	- 8,37 20,58%	- 32,92 43,89%	- 17,00 28,18%	- 0,52 5,02%	-
10	DH50-208	Limunit	0 - 9 m	0,37 0,77%	- 55,52 59,75%	- 13,67 16,53%	- 2,40 3,25%	- 4,39 19,88%	-
		Saprolit	9 - 24 m	1, 39 2,06%	- 9,34 52,25%	- 27,18 45,37%	- 15,70 29,84%	- 0,63 4,43%	-
11	DH50-232	Limunit	0 - 7 m	0,27 0,92%	- 53,78 58,48%	- 12,87- 15,04%	1,47 3,00%	- 4,54 20,51%	-
		Saprolit	7 - 25 m	1,37 2,07%	- 9,53 15,84%	- 13,67 45,50%	- 15,43 30,25%	- 0,61 5,09%	-
12	DH50-205	Limunit	0 - 10,7 m	0,29 0,99%	- 53,57 59,82%	- 13,22 18,44%	- 2,02 11,63%	- 1,25 8,70%	-
		Saprolit	10,7 - 20 m	1,40 1,82%	- 9,77 23,65%	- 30,34 41,88%	- 15,28 27,74%	- 1,12 3,68%	-
13	DH50-257	Limunit	0 - 3 m	0,22 0,42%	- 21,97 54,02%	- 10,13 12,54%	- 1,64 1,90%	- 0,54 13,65%	-
		Saprolit	3 -12 m	1,37 1,81%	- 6,44 49,9%	- 13,20 36,59%	- 10,64 29,84%	- 0,93 5,67%	-
14	DH50-258	Limunit	0 - 7 m	0,14 0,77%	- 47,81 64,03%	- 14,33 17,81%	- 1,44 2,81%	- 0,54 5,67%	-
		Saprolit	7 - 19 m	1,41 1,92%	- 8,09 13,54%	- 27,18 45,80%	- 15,88 33,45%	- 1,48 4,43%	-

15	DH50-259	Limonit	0 - 7,70 m	0,24 0,40%	- 51,91 62,07%	- 13,33 20,94%	- 3,04 10,41%	- 1,57 19,88%	-
		Saprolit	7,70 - 24 m	1,24 1,84%	- 8,62 21,74%	- 30,45 47,74%	- 9,42 42,12%	- 0,56 11,19%	-
16	DH50-181	Limonit	0 - 10 m	0,26 1,06%	- 43,82 57,66%	- 13,00 15,92%	- 2,37 17,77%	- 0,49 47%	- 24,
		Saprolit	10 - 27,4 m	1,27 2,38%	- 10,65 28,61%	- 21,10 41,43%	- 14,54 43,16%	- 0,12 3,64%	-

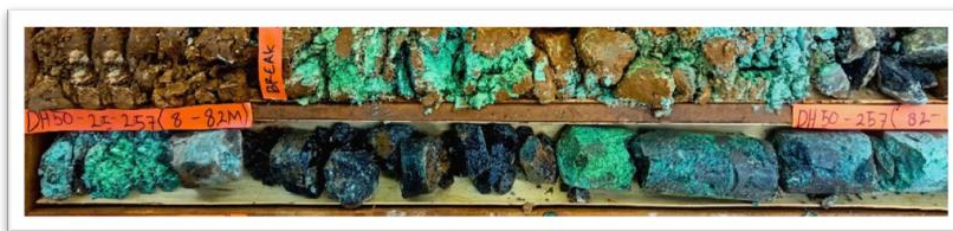
3.3 Karakteristik Mineralogi dan Pembawa Nikel

Karakteristik mineralogi menunjukkan perbedaan yang jelas antara zona limonit dan zona saprolit. Zona limonit didominasi oleh mineral oksida dan hidroksida besi seperti goetit dan hematit yang dicirikan oleh warna coklat kemerahan hingga coklat tua. Dominasi mineral tersebut mencerminkan kondisi oksidatif yang kuat selama proses pelapukan.



Gambar 6. Kenampakan Mineral Hematit, Mangan Dan Goethite Pada Zona Limonit

Pada zona saprolit ditemukan mineral garnierit, serpentin, dan talk yang merupakan kelompok hydrous Mg–Ni silicate. Kehadiran mineral-mineral tersebut menunjukkan bahwa nikel tidak hanya teradsorpsi pada permukaan mineral, tetapi juga terikat dalam struktur kristal mineral silikat hasil alterasi. Asosiasi mineral tersebut merupakan karakteristik utama endapan nikel laterit bertipe hydrous silicate yang umumnya berkembang pada zona saprolit.



Gambar 7. Kenampakan Mineral garnierite Pada Zona Saprolit



Gambar 8. Kenampakan Mineral Serpentin Pada Zona Saprolit



Gambar 9. Kenampakan Mineral Talc Pada Zona Saprolit

Perubahan komposisi mineral dari mineral oksida pada zona limonit menuju mineral silikat pada zona saprolit menunjukkan adanya perubahan kondisi geokimia selama proses lateritisasi. Lingkungan pelapukan yang lebih stabil pada zona saprolit memungkinkan terjadinya akumulasi dan preservasi nikel dalam bentuk mineral hydrous Mg–Ni silicate sehingga menghasilkan kadar Ni yang lebih tinggi dibandingkan zona limonit

3.4 Kontrol Hidrogeologi terhadap Pengayaan Nikel

Interpretasi posisi muka air tanah menunjukkan bahwa batas antara zona limonit dan saprolit berada pada kedalaman sekitar 6–7,5 m. Zona limonit berkembang pada lingkungan oksidatif yang berada di atas muka air tanah dan dicirikan oleh tingginya kandungan Fe serta rendahnya kandungan MgO dan SiO₂. Sebaliknya, zona saprolit berkembang pada kondisi yang relatif lebih reduktif dan stabil di bawah muka air tanah.

Perubahan kondisi geokimia tersebut berperan penting dalam mengontrol mobilitas nikel selama proses lateritisasi. Pada zona oksidatif, nikel cenderung mengalami pelindian dan bermigrasi ke bagian bawah profil. Ketika mencapai lingkungan yang lebih stabil pada zona saprolit, nikel mengalami presipitasi dan terakumulasi bersama mineral hydrous Mg–Ni silicate.

Tabel 2. Interpretasi Posisi Muka Air Tanah Berdasarkan Karakter Geokimia dan Zonasi Laterit

Zona Laterit	Kedalaman (m)	Karakteristik XRF	Kondisi Geokimia	Interpretasi Posisi MAT
Limonit	0 - 6 m	Fe tinggi, Al ₂ O ₃ tinggi, MgO & SiO ₂ rendah, Ni rendah	Oksidatif	Diatas muka air tanah
Transisi	6 - 7,5 m	Fe menurun, MgO & SiO ₂ meningkat, Ni mulai meningkat	Oksidatif Reduktif	-Zona fluktuasi muka air tanah
Saprolit	6 - 10 m	MgO & SiO ₂ tinggi, Ni tinggi, Fe rendah	Relatif reduktif	Dibawah muka air tanah

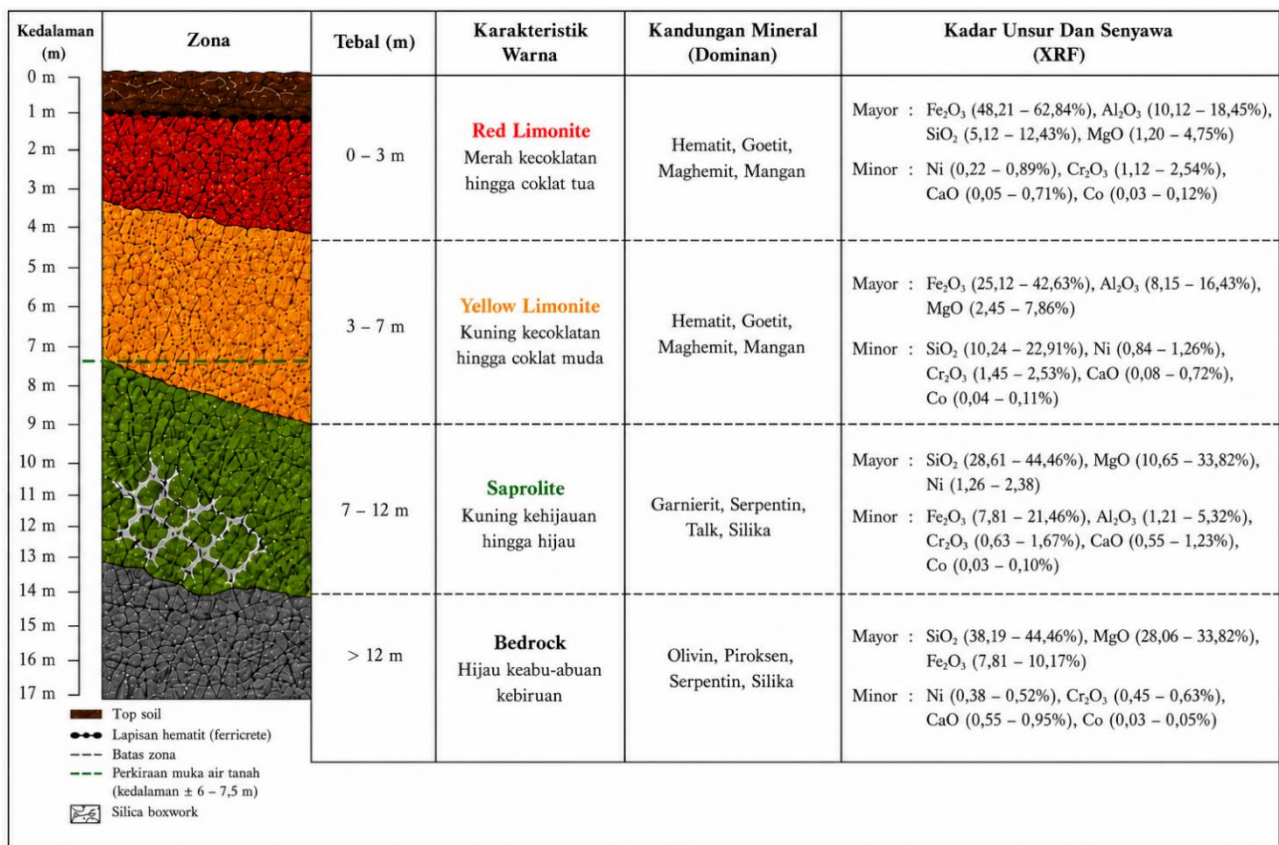
3.5 Karakteristik Tipe Endapan Nikel Laterit

Integrasi data geokimia, mineralogi, hidrogeologi, dan pola akumulasi nikel menunjukkan bahwa endapan laterit pada daerah penelitian termasuk ke dalam tipe Hydrous Silicate Deposit. Interpretasi tersebut didukung oleh dominasi pengayaan nikel pada zona saprolit, hubungan positif antara kadar Ni dengan MgO dan SiO₂, keberadaan mineral garnierit, serpentin, dan talk sebagai pembawa nikel, serta posisi muka air tanah yang mendukung akumulasi nikel pada bagian bawah profil laterit.

Tabel 3. Parameter Perbedaan Endapan Nikel Laterit (Freysnet,2005)

Parameter	<i>Hydrous Silicate Deposit</i>	<i>Clay Sillicate Deposit</i>	<i>Oxide Deposit</i>
Kadar Ni	Kandungan Ni 1.8 - 2.5%	Kandungan Ni 1.0 - 1.5%	Kandungan Ni 1.0 - 1.6%
Mineral	Dominan Mineral Hydrous Mg-Ni Silikat	Si Bersama Dengan Fe, Ni, dan Al Membentuk Mineral Lempung	Mineral Utamanya Geothite
Posisi Muka Air Tanah	Posisi Muka Air Tanah Relatif Dalam	Posisi Muka air Tanah Awal Relatif Lebih Rendah dan Drainase Terhambat	Posisi Muka Air Tanah Relatif Dangkal dan Drainase Tidak Terhambat
Akumulasi Ni	Nikel Lebih Banyak Terakumulasi Pada Zona Saprolite	Zona Limonit Lebih sering Terendam Air Sehingga Terbentuk Zona Lempung	Ni Lebih Banyak Terakumulasi Pada Zona Limonit

Pola pengayaan yang berkembang menunjukkan mekanisme akumulasi residu dan metasomatik yang umum dijumpai pada endapan hydrous silicate. Pada kondisi tersebut, nikel hasil pelapukan batuan ultramafik mengalami mobilisasi dari zona atas dan kemudian terpresipitasi pada zona saprolit yang kaya mineral silikat magnesium.



Gambar 10. Karakteristik Tipe Endapan Nikel Laterit Pada Daerah Penelitian

Hasil integrasi seluruh parameter menunjukkan bahwa kombinasi batuan induk lherzolit terserpentinisasi, perkembangan saprolit yang relatif tebal, keberadaan mineral hydrous Mg-Ni silicate, dan kontrol muka air tanah merupakan faktor utama yang mengendalikan pembentukan endapan nikel laterit bertipe hydrous silicate di wilayah Bahodopi

4. KESIMPULAN

Penelitian di wilayah IUP PT Bumi Kalaena Persada, Desa Siumbatu, Kecamatan Bahodopi, Kabupaten Morowali menunjukkan bahwa profil laterit berkembang di atas batuan ultramafik berupa lherzolit terserpentinisasi yang termasuk dalam Kompleks Ultramafik berumur Kapur Awal. Hasil analisis geokimia memperlihatkan bahwa pengayaan nikel terjadi secara dominan pada zona saprolit dengan kadar Ni mencapai 2,38%, yang disertai peningkatan kandungan MgO dan SiO₂ serta penurunan kadar Fe. Kondisi tersebut menunjukkan adanya hubungan erat antara akumulasi nikel dan perkembangan mineral silikat hasil alterasi. Analisis mineralogi mengidentifikasi keberadaan garnierit, serpentin, dan talk sebagai mineral pembawa utama nikel yang berasosiasi dengan zona saprolit. Selain itu, posisi muka air tanah yang berada pada zona transisi limonit–saprolit berperan sebagai kontrol hidrogeokimia yang memengaruhi mobilitas, presipitasi, dan akumulasi nikel selama proses lateritisasi. Integrasi karakteristik geologi, geokimia, mineralogi, dan hidrogeologi menunjukkan bahwa endapan nikel laterit di daerah penelitian termasuk ke dalam tipe Hydrous Silicate Deposit, dengan zona saprolit sebagai horizon utama pengayaan nikel dan target prospek yang paling potensial untuk kegiatan eksplorasi maupun evaluasi sumber daya.

5. REFERENSI

- Berger, V. I., Singer, D. A., Bliss, J. D., & Moring, B. C. (2011). Ni-Co laterite deposits of the world database and grade-tonnage models. U.S. Geological Survey Open-File Report, 2011–1058.
- Brand, N. W., Butt, C. R. M., & Elias, M. (1998). Nickel laterites: Classification and features. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(4), 81–88.
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel laterite ore deposits: Weathered serpentinites. *Elements*, 9(2), 123–128.
- Dalvi, A. D., Bacon, W. G., & Osborne, R. C. (2004). The past and the future of nickel laterites. PDAC International Convention, Toronto.
- Elias, M. (2002). Nickel laterite deposits: Geological overview, resources and exploitation. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17(4), 81–88.
- Fan, R., & Gerson, A. R. (2011). Nickel geochemistry of laterites and implications for the formation of nickel-rich zones. *Ore Geology Reviews*, 38(1–2), 123–138.
- Freyssinet, P., Butt, C. R. M., Morris, R. C., & Piantone, P. (2005). Ore-forming processes related to lateritic weathering. *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, 681–722.
- Golightly, J. P. (2010). Progress in understanding the evolution of nickel laterites. *SEG Special Publication*, 15, 451–485.
- Hall, R. (2012). Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570–571, 1–41.
- Jowitt, S. M., Mudd, G. M., & Thompson, J. F. H. (2020). Future availability of nickel and implications for global supply. *Resources Policy*, 65, 101585.
- Kadarusman, A., Miyashita, S., Maruyama, S., Parkinson, C. D., & Ishikawa, A. (2004). Petrology, geochemistry and paleogeographic reconstruction of the East Sulawesi Ophiolite. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(1), 75–96.
- Marsh, E. E., Anderson, E. D., & Gray, F. (2013). Nickel laterite deposits of the world: Geological models and resource estimates. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report.
- Mudd, G. M. (2010). Global trends and environmental issues in nickel mining: Sulfides versus laterites. *Ore Geology Reviews*, 38(1–2), 9–26.
- Trescases, J. J. (1975). L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. *ORSTOM Memoirs*, 78, 1–259.
- Van Leeuwen, T. M., & Pieters, P. E. (2011). Mineral deposits of Sulawesi. Geological Agency of Indonesia.
- Wells, M. A., Ramanaidou, E. R., Verrall, M., & Tessarolo, C. (2009). Mineralogy and crystal chemistry of garnierites in nickel laterite deposits. *European Journal of Mineralogy*, 21(2), 467–483