

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Endapan laterit nikel memiliki potensi mineral bijih yang dapat dimanfaatkan dalam industri, termasuk bijih nikel (Ni) yang umumnya dieksploitasi, serta *cobalt* (Co) dan *scandium* (Sc) dalam jumlah yang sangat kecil (Butt, 2013). Hal tersebut menjadikan Indonesia sebagai salah satu negara penghasil nikel yang besar di dunia. Kegiatan eksplorasi nikel dilakukan untuk mencari sumber daya serta cadangan nikel baru yang sangat dibutuhkan khususnya pada dunia teknologi.

Potensi mineral terbesar di daerah penelitian pada daerah Kolaka ialah adanya endapan nikel yang cukup luas persebarannya. Berdasarkan dari web resmi PT. Ceria Nugraha Indotama Tbk, Komoditas bijih nikel diproduksi dari tambang nikel Kolaka Sulawesi Tenggara yang dioperasikan oleh UBP PT. Ceria Nugraha Indotama (Ceria Corp) di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Sulawesi Tenggara. Dengan kapasitas produksi tambang bijih saprolit 5,40 *wet metric ton* (WMT) per tahun dan bijih limonit 8,80 juta wmt per tahun.

Proses pembentukan nikel laterit diawali dari proses oksidasi dan pelapukan batuan ultramafik, dalam hal ini adalah batuan *harzburgite*. Batuan ini banyak mengandung *olivine*, *piroksen*, magnesium silikat dan besi, mineral-mineral tersebut tidak stabil dan mudah mengalami proses pelapukan. Proses pelapukan dimulai pada batuan ultramafik (*peridotite*, *dunite*, *serpentinite*), dimana batuan ini banyak mengandung *olivine* (MgFeSiO_4), *piroksen* ($\text{XY}(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$), magnesium silikat terdiri dari *forsterite* (Mg_2SiO_4), *enstatite* (MgSiO_3), *serpentine* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dan mineral-mineral lainnya. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Batuan ofiolit, yang terdiri dari batuan ultramafik dari pengayaan sekunder dan residual dari unsur Ni, Fe, Mn, dan Co.

Endapan nikel laterit dapat terbentuk di daerah yang memiliki relief sedang yang dikendalikan oleh struktur dan kepadatan rekahan. Pada daerah dengan kemiringan topografi yang bervariasi akan membentuk endapan nikel laterit dengan ketebalan yang berbeda (Thorne et.al, 2012). Kondisi morfologi sangat mempengaruhi sirkulasi air beserta unsur lainnya. Daerah yang landai, air akan bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk masuk lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Pada daerah terjal, air akan mengalir di permukaan dan terjadi erosi yang intensif. Akumulasi endapan umumnya terdapat pada daerah yang landai sampai kemiringan sedang. Ketebalan endapan nikel laterit bervariasi yang dipengaruhi oleh morfologi pada setiap daerah (Kusuma et al., 2019)

Berdasarkan uraian diatas menjadi latar belakang untuk mengadakan penelitian secara lebih detail, khususnya pada Blok X PT. Ceria Nugraha Indotama, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara, guna untuk mengumpulkan data-data geologi berupa data topografi, data geokimia, data logging hasil pemboran serta data-data lain yang dianggap perlu. Data kemudian diolah dan menuliskannya dalam bentuk tulisan dengan judul : **“ANALISIS PENGARUH TOPOGRAFI TERHADAP ZONASI POTENSI NIKEL LATERIT”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada, peneliti membatasi beberapa bahasan penelitian yang diwujudkan dalam bentuk rumusan masalah terkait dengan pengaruh topografi terhadap pengkayaan nikel daerah penelitian pada PT. Ceria Nugraha Indotama. Diharapkan penelitian yang dilakukan dapat lebih terfokus, terkordinasi dan efisien. Berikut ini beberapa rumusan masalah yang harus dapat terjawab:

- Bagaimana pola distribusi kandungan nikel daerah penelitian?
- Bagaimana karakterisasi profil laterit bawah permukaan daerah penelitian?
- Bagaimana geokimia nikel laterit daerah penelitian?
- Bagaimana pengaruh topografi terhadap zonasi potensi nikel laterit daerah penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

- Untuk menganalisis dan mampu menjelaskan pola disitribusi kandungan nikel daerah penelitian.
- Untuk menganalisis dan mampu menjelaskan karakterisasi profil laterit bawah permukaan daerah penelitian.
- Untuk menganalisis dan mampu menjelaskan geokimia nikel laterit daerah penelitian.
- Untuk menganalisis dan mampu menjelaskan pengaruh topografi terhadap zonasi potensi nikel laterit daerah penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan adanya penelitian ini diharapkan dapat menjadi informasi kepada peneliti, masyarakat, serta perusahaan untuk mengetahui pengaruh topografi terhadap zonasi potensi nikel laterit Blok X PT. Ceria Nugraha Indotama, sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan strategi eksplorasi mineral berbasis pendekatan *Graph Neural Networks* (GNN).

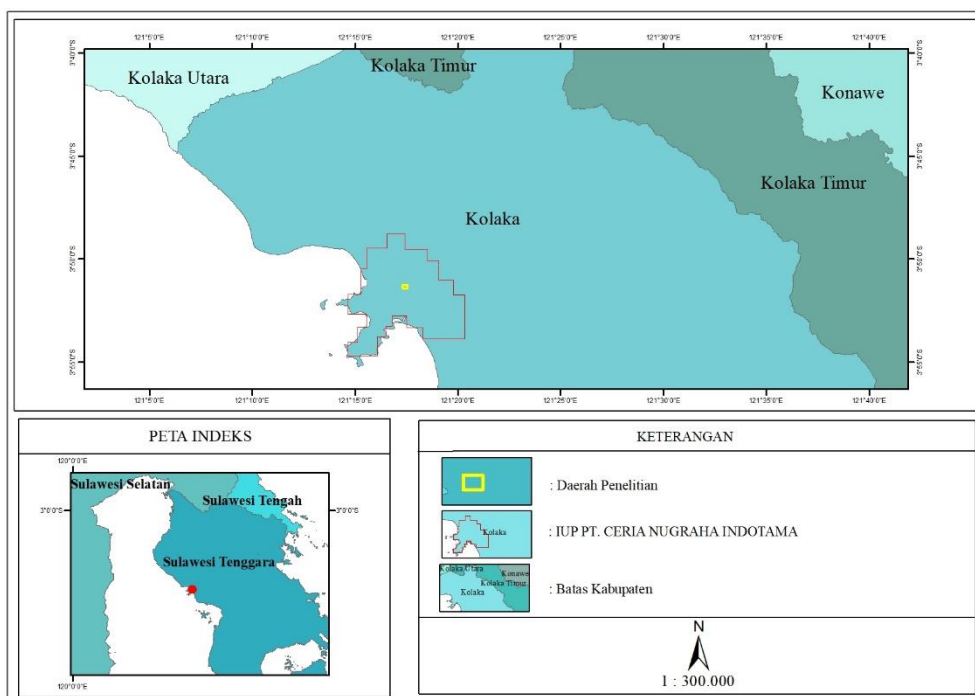
1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

- Penelitian hanya dilakukan di blok X IUP PT. Ceria Nugraha Indotama
- Pembahasan mengenai karakteristik profil bawah permukaan dan geokimia mengacu pada data *assay* dan data *logging* hasil pemboran
- Penelitian ini tidak mencakup block modeling kadar maupun estimasi cadangan terukur, tetapi terbatas pada delineasi zona high-grade.

1.6 Letak, Luas, dan Kesampaian Daerah

Secara administratif, lokasi penelitian berada di wilayah Wolo, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara, yang termasuk dalam area konsesi pertambangan PT. Ceria Nugraha Indotama. Secara geografis, wilayah ini terletak pada koordinat $122^{\circ}22'30''$ - $122^{\circ}23'00''$ Bujur Timur (BT) dan $3^{\circ}25'00''$ - $3^{\circ}27'30''$ Lintang Selatan (LS). Akses ke lokasi dapat dilakukan dengan melalui transportasi udara dari Makassar ke Pomalaa dengan waktu tempuh sekitar satu jam, dilanjutkan perjalanan darat dari Pomalaa ke lokasi penelitian selama kurang lebih dua jam. Alternatif lainnya adalah melalui jalur darat dari Makassar ke lokasi penelitian melalui Luwu Timur dengan waktu tempuh sekitar 18 jam. Sementara itu, perjalanan menggunakan jalur laut dari Pelabuhan Siwa ke Pelabuhan Tobaku memakan waktu sekitar 6 jam, yang kemudian dilanjutkan dengan perjalanan darat sekitar 40 menit menuju lokasi penelitian.

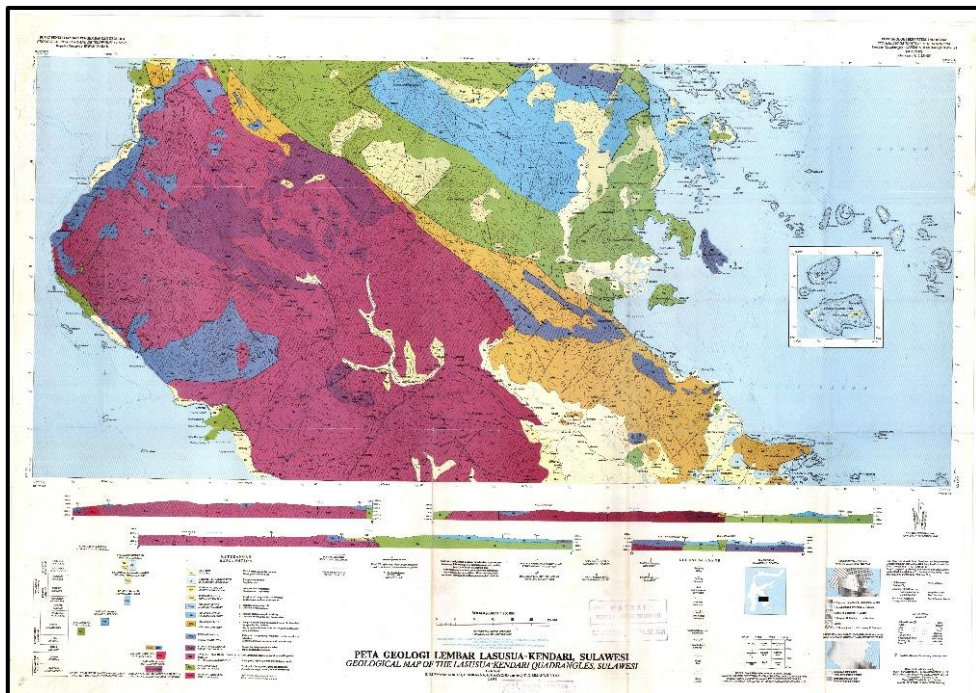


Gambar 1. Peta Tunjuk Lokasi Daerah Penelitian

1.7 Teori

1.7.1 Geologi Regional

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lasusua - Kendari skala 1:250.000 yang diterbitkan oleh Puslitbang Geologi, wilayah konsesi terutama terdiri dari batuan sedimen Pratersier yang merupakan bagian dari Formasi Meluhu dan Formasi Tokala, batuan ultrabasa berumur Kapur, serta batuan sedimen Tersier yang merupakan bagian dari Formasi Alangga dan endapan aluvial berumur Kuartar, seperti yang ditampilkan pada (Gambar 2) di bawah ini.



Gambar 2. Peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi Tenggara
(Simandjuntak, et al, 1993)

1.7.1.1 Geomorfologi Regional

Geomorfologi pada daerah penelitian dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu Dataran Aluvial, Perbukitan Bergelombang Rendah, dan Perbukitan Bergelombang Tinggi. Dataran Aluvial berkembang terutama di sekitar Sungai Wolo yang mengalir ke arah selatan dengan topografi yang relatif datar dan menempati sekitar 10% dari daerah penelitian. Perbukitan Bergelombang Rendah mencakup sebagian besar wilayah penelitian, sekitar 70%, dan berupa perbukitan kecil dengan kelereng landai antara 10° hingga 25°. Morfologi ini memanjang dari timur laut ke barat daya, dipotong oleh dataran aluvial di sekitar Sungai Wolo pada bagian barat, serta

mengelilingi Perbukitan Bergelombang Tinggi, yang mengelompok di bagian tengah wilayah penelitian. Perbukitan Bergelombang Tinggi menempati hampir 20% wilayah penelitian, dengan kelerengan yang terjal hingga 70° di beberapa tempat.

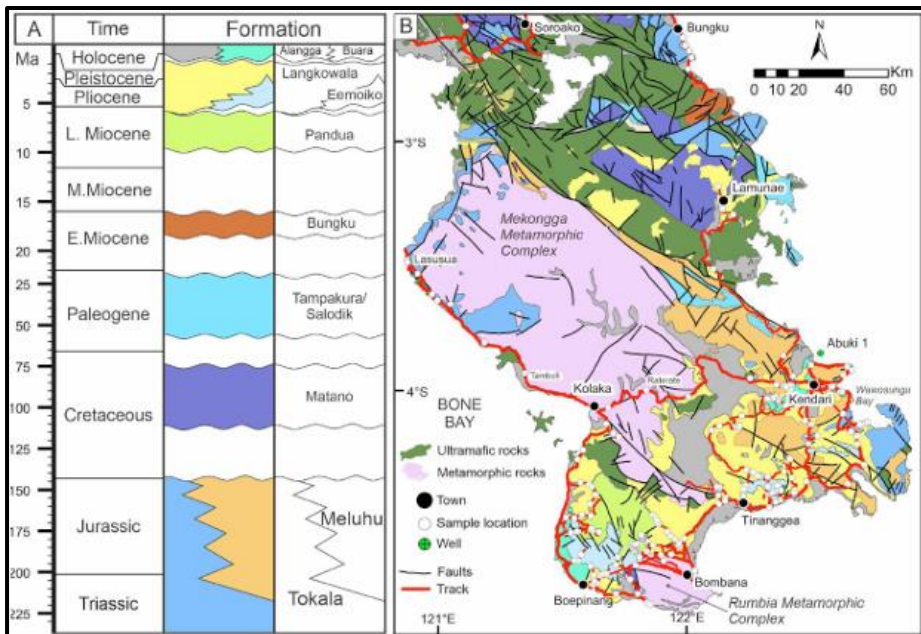
Pada dataran aluvial, laterit tidak berkembang dan hanya ditemukan hasil erosi laterit yang tertransportasi ke daerah tersebut. Pada lereng bukit dengan kelerengan sekitar 20°, zona laterit umumnya relatif tipis. Sebaliknya, pada perbukitan bergelombang yang lebih datar dengan kelerengan sekitar 10° hingga 15°, zona laterit berkembang lebih baik. Lateritisasi di Zona Perbukitan Bergelombang Tinggi juga tidak berkembang dengan baik, bahkan di beberapa tempat dijumpai singkapan batuan dasar yang muncul ke permukaan. Namun demikian, di dataran yang relatif landai pada Zona Perbukitan Bergelombang Tinggi, lateritisasi masih dapat berkembang secara terbatas.

1.7.1.2 Stratigrafi Regional

Secara umum, stratigrafi regional daerah penelitian yang tercakup dalam lembar Lasusua-Kendari terdiri atas dua satuan batuan utama, yaitu **Aluvium (Qa)** dan **Batuan Ofiolit (Ku)**. Aluvium (Qa) tersusun dari kerikil, kerakal, pasir, lempung, dan lumpur, yang merupakan hasil endapan sungai, rawa, dan pantai. Satuan ini berumur Holosen. Batuan Ofiolit (Ku) terdiri dari peridotit, dunit, dan serpentinit. Serpentinit berwarna kelabu tua hingga kehitaman, bersifat padu dan pejal, bertekstur afanitik dengan komposisi mineral antigorit, lempung, dan magnetit, serta umumnya menunjukkan struktur kekar dan cermin sesar pada skala megaskopis.

Dunit berwarna kehitaman, bersifat padu dan pejal, dengan tekstur afanitik. Mineral penyusunnya meliputi olivin (sekitar 90%), piroksin, plagioklas, sedikit serpentinit, dan magnetit, dengan ukuran butir halus hingga sedang. Terdapat indikasi deformasi pada dunit yang ditunjukkan oleh penyimpangan dan pelengkungan kembar pada piroksin. Beberapa dunit mengalami serpentinisasi kuat yang menghasilkan struktur sisa seperti rijang serta mineral pengganti seperti serpentinit.

Peridotit terdiri dari jenis harzburgit dan lherzolit. Harzburgit memiliki warna hijau hingga kehitaman, bersifat holokristalin, padu, dan pejal, dengan komposisi mineral berupa olivin (60%) dan piroksin (40%). Di beberapa lokasi, harzburgit menunjukkan struktur perdaunan dan karakteristik kristal bergerigi akibat penghabluran ulang. Lherzolit berwarna hijau kehitaman, holokristalin, padu, dan pejal, tersusun dari mineral olivin (45%), piroksin (25%), serta mineral tambahan seperti epidot, klorit, dan bijih. Satuan batuan ini memiliki tekstur kasar hingga halus dan diperkirakan berumur Kapur.

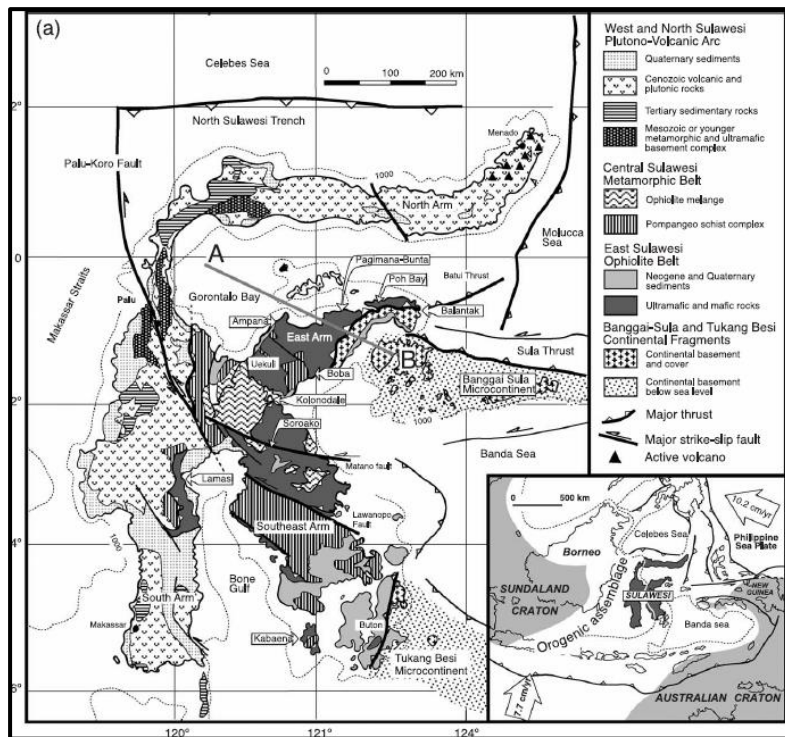


Gambar 3. Peta Geologi Lengan Tenggara, Provinsi Sulawesi Tenggara (*after* Nugraha and Hall, 2022 dalam Van Leeuwen & Maulana, 2025)

1.7.1.3 Struktur Regional

Struktur geologi Lembar Lasusua-Kendari menunjukkan karakteristik kompleks tumbukan di tepi benua yang aktif. Berdasarkan struktur, himpunan batuan, biostratigrafi, dan umur, wilayah ini terbagi menjadi dua domain yang sangat berbeda, yaitu: (1) allochthon, terdiri dari ofiolit dan batuan malihan, dan (2) autochthon, mencakup batuan gunungapi dan pluton Tersier, pinggiran benua Sundaland, serta kelompok molasa Sulawesi. Seperti wilayah Sulawesi bagian timur pada umumnya, Lembar Lasusua memiliki struktur geologi yang sangat rumit akibat pengaruh aktivitas tektonik berulang di daerah ini.

Struktur geologi yang dijumpai di daerah penelitian meliputi sesar, lipatan, dan kekar. Sesar dan kelurusan dominan berarah barat laut–tenggara, sejalan dengan Sesar Geser Jurus Mengiri Lasolo. Sesar Lasolo masih aktif hingga saat ini, dibuktikan dengan keberadaan mata air panas di Desa Sonai, Kecamatan Pondidaha, yang berada pada batugamping terumbu berumur Holosen, serta jalur sesar di tenggara Tinobu. Aktivitas sesar ini diduga terkait dengan Sesar Sorong yang kembali aktif pada Kala Oligosen (Simandjuntak et al., 1993).



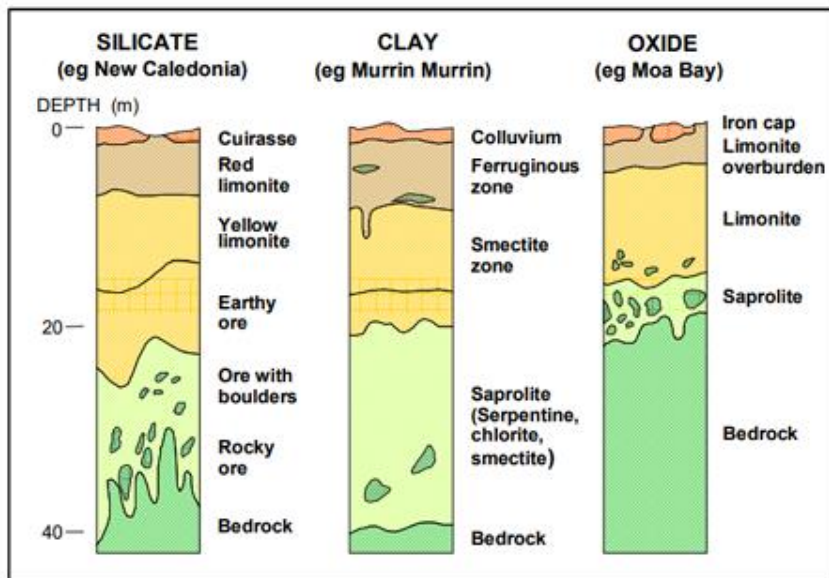
Gambar 4. Struktur Regional Lengan Tenggara Sulawesi (Kadarusman, et al. 2004)

1.7.2 Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit merupakan produk dari pelapukan yang intensif dari serpentinit di bawah kondisi tropis dan lembab yang menyumbang lebih dari 60% nikel di dunia. Menurut (Butt & Cluzel, 2013), endapan nikel laterit adalah suatu batuan dasar yang sangat lapuk dengan satu atau lebih lapisan yang mengandung cadangan nikel (Ni) yang dapat dieksploitasi, umumnya akan ditemukan juga kobalt (Co), dan juga unsur tanah jarang skandium (Sc). Mereka ditentukan oleh kriteria ekonomi, yaitu bahwa kadar dan *tonase* Ni-Co cukup untuk ditambang dan diproses demi keuntungan finansial.

Laterit juga merupakan sumber dari berbagai mineral ekonomis, seperti bauksit, nikel (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), emas (Au), dan *platinum group elements* (PGE). Bagian bawah dari profil laterit disebut zona saprolit, yang merupakan zona pelapukan tinggi, di mana tekstur dan struktur batuan asalnya masih dapat dikenali. Karena pengaruh fluida yang bersifat teroksidasi dan asam, bagian paling bawah zona ini ditandai dengan ketidakstabilan sulfida dan karbonat, yang mengalami pencucian atau *leaching* dari logam-logam *chalcopryite* dan unsur-unsur alkali. Bagian bawah zona saprolit ini dicirikan dengan terurainya mineral feldspar dan ferromagnesian, sementara Si dan Al tetap bertahan dalam bentuk mineral lempung seperti kaolinit dan *halloysite* (Maulana, 2017).

Jenis endapan nikel laterit yang terbentuk dari batuan ultramafik dapat dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan kandungan mineraloginya (Brand et al., 1998), yaitu:



Gambar 5. Jenis tipe endapan laterit (Brand, et al, 1998)

1. *Silicate Laterites*

Endapan Hydrous Mg Silikat (serpentin, garnierit). Zona saprolit cukup tebal, dikarenakan oleh proses pengangkatan tektonik yang lambat namun konsisten serta muka air tanah yang rendah pada profil laterit. Zona limonit tipis pada tipe ini yang dipengaruhi oleh intensitas erosi pada bagian atas profil. Kandungan Ni pada tipe *silicate laterites* umumnya 2.0-3.0%

2. *Clay Laterites*

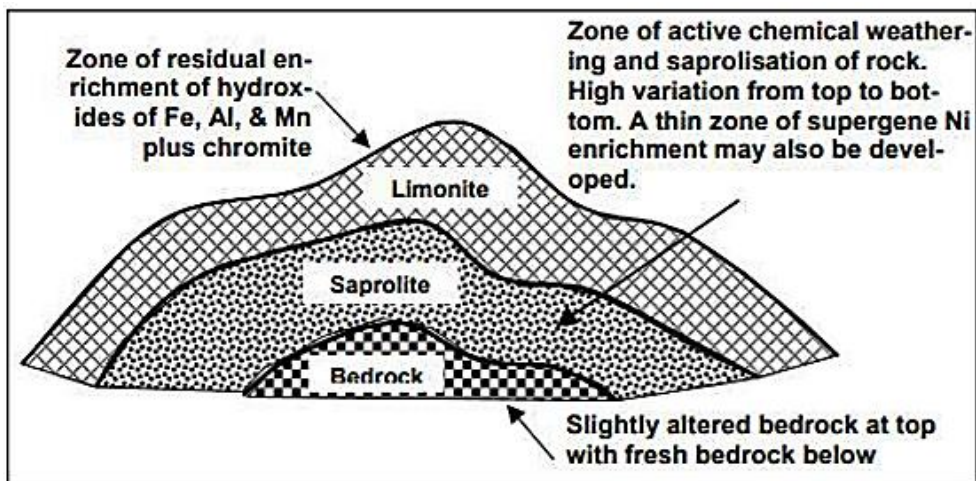
Endapan lempung silikat, didominasi oleh smektit (nontronit dan saponit) yang terdapat pada bagian atas profil. Kondisi pelapukan tidak berjalan dengan baik seperti pada iklim dingin dan iklim panas, silika tidak terlindi seperti di lingkungan tropis lembab. Silika tersebut bergabung bersama Fe dan Al membentuk zona dimana lempung smektit mendominasi. Profil seperti ini biasanya dicirikan dengan lapisan tipis yang kaya besi oksida pada bagian atasnya dan didasari oleh lapukan saprolit yang mengandung serpentin dan nontronit. Kandungan Ni pada *nontronite* umumnya 1.0-1.5%

3. *Oxide Laterites*

Endapan oksida, didominasi oleh Fe oksihidroksida, seperti goetit, yang terbentuk pada zona *saprolite* hingga pedolith. Pada tipe ini sering kali mengandung silika sekunder, seperti kalsedon dan kuarsa. Endapan oksida merupakan produk akhir yang paling umum dari laterisasi batuan ultramafik. Olivin adalah mineral yang paling tidak stabil dan merupakan yang pertama mengalami pelapukan

Tabel 1. Persentase mineral bijih nikel menurut (Butt & Cluzel, 2013)

OXIDE ORE			
Goethite	Oxide	$\alpha\text{-(Fe}^{3+}\text{)O(OH)}$	2% Ni, 0.2% Co
Asbolane	Oxide	$(\text{Ni}^{2+}, \text{Co}^{3+})_x \text{Mn}^{4+}(\text{O, OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	16% Ni, >4% Co
Lithiophorite	Oxide	$(\text{Al, Li})\text{Mn}^{4+}\text{O}_2(\text{OH})_2$	1% Ni, ~7% Co
HYDROUS MG SILICATE ORE			
Ni lizardite - népouite	Serpentine	$(\text{Mg, Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	6–33% Ni
7Å garnierite	Serpentine	Variable, poorly defined	15% Ni
Nimite	Chlorite	$(\text{Ni}_3\text{Al})(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	17% Ni
14Å garnierite	Chlorite	Variable, poorly defined	3% Ni
Falcondoite	Sepiolite	$(\text{Ni, Mg})_4\text{Si}_6\text{O}_{13}(\text{OH})_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	24% Ni
Kerolite-willemseite	Talc	$(\text{Ni, Mg})_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	16–27% Ni
10Å garnierite	Talc	Variable, poorly defined	20% Ni
CLAY SILICATE ORE			
Nontronite	Smectite	$\text{Na}_{0.3}\text{Fe}_2^{3+}(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	~4% Ni
Saponite	Smectite	$(\text{Ca}/2, \text{Na})_{0.3}(\text{Mg, Fe}^{2+})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}_2) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	~3% Ni

**Gambar 6.** Ilustrasi profil laterit pada bukit (Ahmad, 2008)

1.7.3 Batuan Dasar Nikel Laterit

Batuan ultramafik adalah mineral yang kaya akan mafik (ferromagnesian) dengan mengesampingkan kuarsa, feldspar dan feldspatoid batuan ini terdiri dari *olivine*, *pyroxene*, *hornblende* dan mika (Ahmad, 2008) batuan ultramafik memiliki

indeks warna lebih dari 70. Batuan ultrabasa tidak sama dengan ultramafik contoh batuan yang kaya akan feldspatoid adalah ultrabasa karena tidak mengandung ferromagnesian.

Batuan ultramafik sebagian besar dari plutonik dan tidak memiliki bagian bagian vulkanik. Klasifikasi batuan Ultramafik:

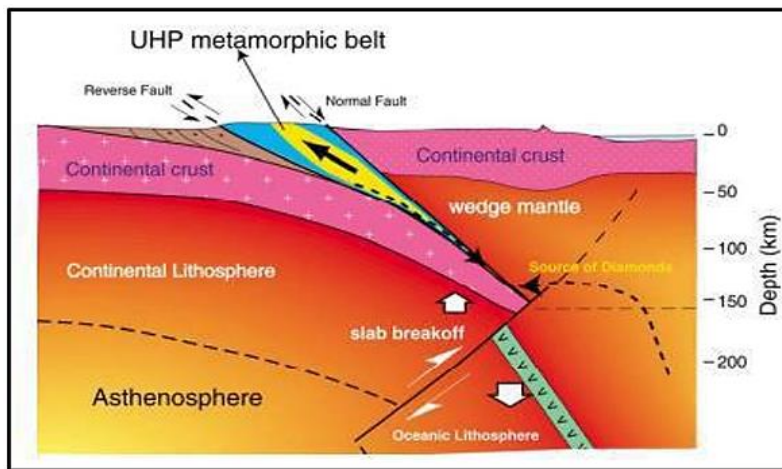
- A. *Dunite* adalah batuan *ultramafic monomineralic* seluruhnya terdiri dari *olivine*. Mineral aksesori meliputi: *chromite*, *magnetite*, *ilmenite* dan *spinel*
- B. *Pyroxenite* adalah batuan *ultramafic monomineralic* seluruhnya terdiri dari *pyroxenes*. *Pyroxenites* diklasifikasikan lebih lanjut ke dalam apakah *pyroxene* bersifat ortorombik atau monoklinik:
 1. *Orthopyroxenites: Bronzitites*
 2. *Clinopyroxenites: Diopsidites; diallagites*
- C. *Serpentinite* adalah batuan *monomineralic* seluruhnya terdiri dari *serpentine*. Batuan dapat dibentuk oleh serpentinisasi *dunite*, *pyroxenite*, *hornblendite* atau *peridotite*.
- D. *Peridotite* adalah batuan ultramafik yang mengandung sebagian besar *olivine* tapi juga mineral mafik lainnya dalam jumlah yang signifikan. Mineral aksesori meliputi *magnetite*, *chromite*, *ilmenite*, dan *spinel*. Bergantung pada mineral mafik, peridotit dapat diklasifikasikan sebagai:
 1. *Pyroxene peridotite*
 2. *Hornblende peridotite*
 3. *Mica peridotite* (seperti *kimberlite*)

Batuan ultramafik merupakan batuan beku yang terbentuk akibat intrusi magma yang sumbernya langsung dari mantel bumi dan umumnya atau kebanyakan terbentuk di MOR (*Mid Oceanic Ridge*). Menurut Williams, Turner, & Gilbert (1954).

Menurut McDonough dan Rudnick, 2001 dalam Kadarusman, 2009, terdapat tiga prinsip sumber batuan ultramafik yang dapat tersingkap dipermukaan, yaitu:

1. *Orogenic Peridotite Massifs*

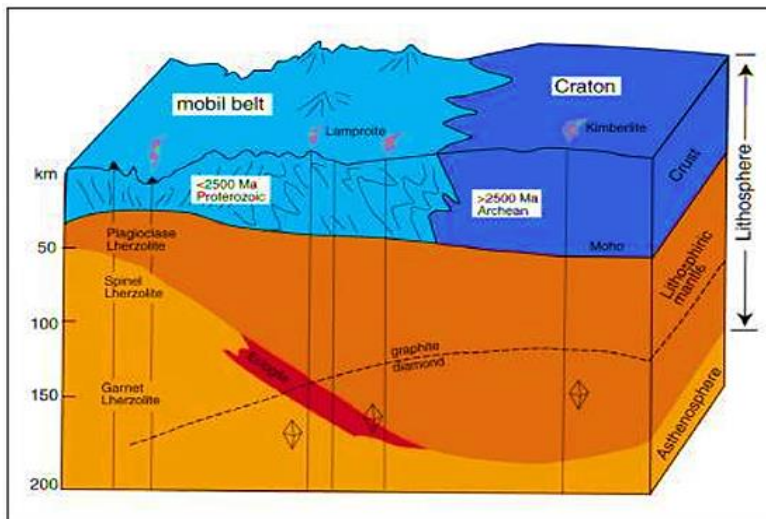
Tubuh batuan ultramafik memiliki dimensi yang cukup luas, mencapai ratusan kilometer. Komposisi utamanya adalah lapisan peridotit dan piroksenit. *Lherzolit* adalah litologi yang dominan, dengan sedikit kandungan hazburgit dan piroksenit. Proses pengangkatan batuan ultramafik ini disebabkan oleh metamorfisme dengan tekanan sangat tinggi saat terjadi tumbukan antara kerak benua atau kolisi (lihat Gambar 6). Akibat dari *buoyancy* (gaya apung) dari kerak benua yang tidak tersubduksi setelah terjadi (*slab break off*) dari proses subduksi kerak benua menyebabkan terbukanya batuan ultramafik ke permukaan.



Gambar 7. Proses tektonik terbentuknya *orogenic peridotite* (Kadarusman, 2009)

2. *Peridotite Xenoliths/Mantle Xenolith*

Berasal dari mantel atas, batuan ultramafik hadir dalam *host volcanic* sebagai magma *alkali basalt* dan *ultraposik* (*kimberlit* dan *lamproit*). Ultraposik biasanya erupsi melalui kraton yang stabil, sementara basal alkali ditemukan dalam batuan yang lebih muda. Batuan ultramafik berjenis kimberlit dapat ditemukan pada kedalaman minimal 40 kilometer dan ditemukan sebagai *mantle xenolith*. Lherzolit adalah jenis batuan ultramafik yang paling umum dijumpai, sementara hazburgit, piroksenit, dan eklogit ditemukan dalam jumlah yang lebih sedikit.



Gambar 8. Batuan *ultramafic kimberlite* ditemukan pada kedalaman 40 km (Kadarusman, 2009)

3. *Oceanic Peridotite*

Batuan ultramafik yang muncul ke permukaan biasanya ditemukan dalam suatu sikuen ofiolit yang berhubungan dengan tepian cekungan hingga tepian kontinen, busur kepulauan, atau kompleks subduksi. Ofiolit terungkap karena kerak samudera terpisah atau keluar dari posisi normalnya dan kembali ke dalam mantel melalui proses subduksi. Ofiolit terdiri dari batuan kerak dan batuan mantel, serta lapisan sedimen. Batuan ultramafik yang ditemukan dalam ofiolit meliputi dunit, harzburgit, lherzolit, dengan jumlah piroksenit yang sedikit.

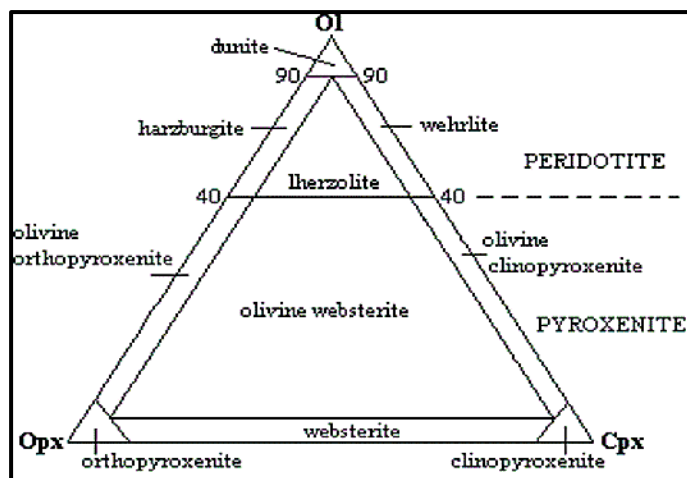
Batuan yang mengandung lebih dari 90% mineral mafik disebut batuan ultramafik (tidak ada batuan mafik). Jika komposisi mineral dapat ditentukan, batuan akan terklasifikasi secara independen dari skema QAPF berdasarkan komponen relatif (dalam persen volume) atau keduanya. Olivin (Ol), ortopiroksen (Opx), dan klinopiroksen (Cpx), atau olivin (Ol), piroksen (Px), dan amfibol (Hbl). Amfibol direpresentasikan sebagai hornblende (Hbl) dan batumannya berupa hornblendit karena nama amfibolit telah digunakan pada jenis batuan lain.

Tabel 2. Kandungan nikel beberapa *olivine*, *pyroxenes* dan *chromites* (Ahmad, 2008)

	% Ni	%NiO
<u>OLIVINES</u>		
<i>Harzburgite</i> , Poro, New Caledonia	0.39	0.50
Unserpentinised peridotite, Bonsora W, Sorowako	0.358	0.456
Unserpentinised peridotite, Konde Pit 717, Sorowako	0.313	0.398
Unserpentinised peridotite, Sorowako	0.29	0.37
<i>Harzburgite</i> , Tiebaghi, New Caledonia	0.24	0.30
"Early" rocks of Skaergaard Intrusion, Greenland	0.20	0.25
<u>PYROXENES</u>		
Opx in <i>Harzburgite</i> , Poro, New Caledonia	0.10	0.127
Opx in Unserpentinised peridotite, Konde Pit 717, Sorowako	0.067	0.085
Opx in Unserpentinised peridotite, Bonsora W, Sorowako	0.0635	0.081
Opx in <i>Harzburgite</i> , Tiebaghi, New Caledonia	0.047	0.06
Cpx in Unserpentinised peridotite, Sorowako	0.039	0.05
<u>CHROMITES</u>		
Unserpentinised peridotite, Konde Pit 717, Sorowako	0.0657	0.084
Unserpentinised peridotite, Bonsora W, Sorowako	0.062	0.079
<u>ULTRAMAFICS</u>		
Average dunite compositions (Edel'shtein, 1960)	0.26	0.33
Unserpentinised peridotite, Bonsora W, Sorowako	0.22	0.28
Average peridotite compositions (Edel'shtein, 1960)	0.16	0.20
Average pyroxenite compositions (Edel'shtein, 1960)	0.08	0.102

1.7.4 Klasifikasi Batuan

Batuan ultramafik adalah kelompok batuan yang terdiri terutama dari mineral mafik (seperti olivin, piroksen, dan amfibol) dengan kandungan mineral felsik yang terbatas (biasanya kalsium plagioklas) dan mineral aksesori lainnya (misalnya garnet, spinel, phlogopite, dan lain-lain.). Batuan ini meliputi peridotit yang merupakan bagian dari mantel bumi, serta ultramafik yang terbentuk melalui pemisahan mineral mafik dalam peridotit atau pengendapan di dasar ruang magma, biasanya berupa batuan gabro. Diagram klasifikasi QAPF menganggap batuan ultramafik sebagai batuan yang memiliki kandungan mineral mafik (indeks warna M) > 90%. Oleh karena itu, untuk mengklasifikasikan batuan ini, diperlukan diagram ternary yang khusus berdasarkan proporsi olivin – ortopiroksen – klinopiroksen (Ol – Opx – Cpx) dan olivin – piroksen – hornblende (Ol – Px – Hbl) [lihat juga: cara menggunakan plot ternary]. Gambar 8 menjelaskan tentang diagram Ol – Opx – Cpx untuk saat ini.



Gambar 9. Klasifikasi IUGS Batuan Ultrabasa Streckeisen (1976)

Sebagian besar batuan ultramafik terdiri dari tiga mineral utama dalam diagram ini, yaitu olivin, piroksen ferromagnesian (ortopiroksen, enstatit), dan piroksen kalsium (klinopiroksen, diopside). Untuk batuan ultramafik yang mengandung hornblende (sangat jarang), digunakan diagram yang berbeda. Ada dua kelompok (90 > 40%) dan piroksenit (olivine < 40%). Peridotit terdiri dari empat jenis batuan utama:

- Dunite*: sebagian besar terdiri dari olivin (> 90%).
- Harzburgite*: terutama terdiri dari olivin dan ortopiroksen.
- Lherzolite*: peridotit yang mengandung olivin, ortopiroksen, dan klinopiroksen.
- Wehrlite*: sebagian besar terdiri dari olivin dan klinopiroksen.

Piroksenit dibagi lebih lanjut menjadi:

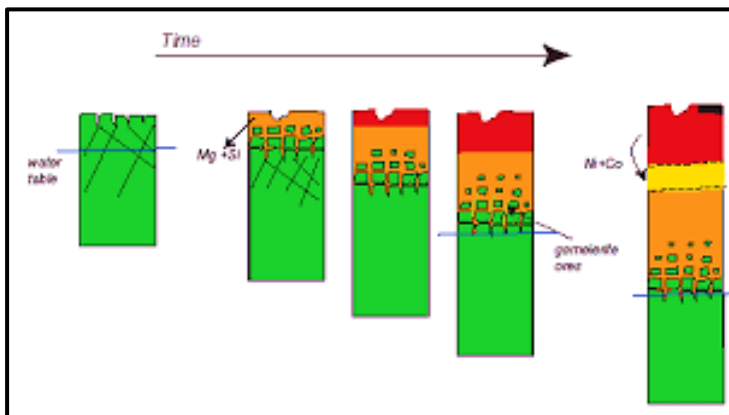
- Ortopiroksenit: dengan kandungan ortopiroksen > 90%.

- b. Websterit: terdiri dari klinopiroksen dan ortopiroksen.
- c. Klinopiroksenit: dengan kandungan klinopiroksen > 90%. Dalam variasi piroksenit yang mengandung olivin antara 5 dan 40%, istilah '*olivine*' digunakan dalam namanya (misalnya, *olivine websterit*).

Diagram ini secara baik menggambarkan variasi kimia utama pada batuan ultramafik. Komposisi yang rendah SiO_2 berada dekat dengan sudut paling atas (*dunite*), sementara komposisi yang kaya SiO_2 terdapat di bagian bawah diagram. Hal ini dikarenakan piroksen secara stoikiometri mengandung lebih banyak silika dibandingkan olivin. Demikian pula, komposisi yang kaya kalsium terletak di sebelah kanan diagram, karena klinopiroksen adalah satu-satunya mineral dalam diagram ini yang mengandung kalsium.

1.7.5 Genesa Nikel Laterit

Berdasarkan faktor pengontrol laterit, dalam pembentukan laterit harus memiliki batuan ultramafik yang kaya akan olivin. Batuan ultramafik yang kaya akan olivin tadi mengalami proses eksogen berupa pelapukan kimia melalui media air sehingga lateritisasi dapat berjalan. Sebelum proses lateritisasi berlangsung, batuan ultramafik dapat mengalami serperntisasi terlebih dahulu. Batuan ultramafik yang mengalami serpentinisasi memiliki Ni yang lebih kaya bahkan hingga 16 kali dibandingkan dengan kandungan awalnya (Sutisna, 2006).

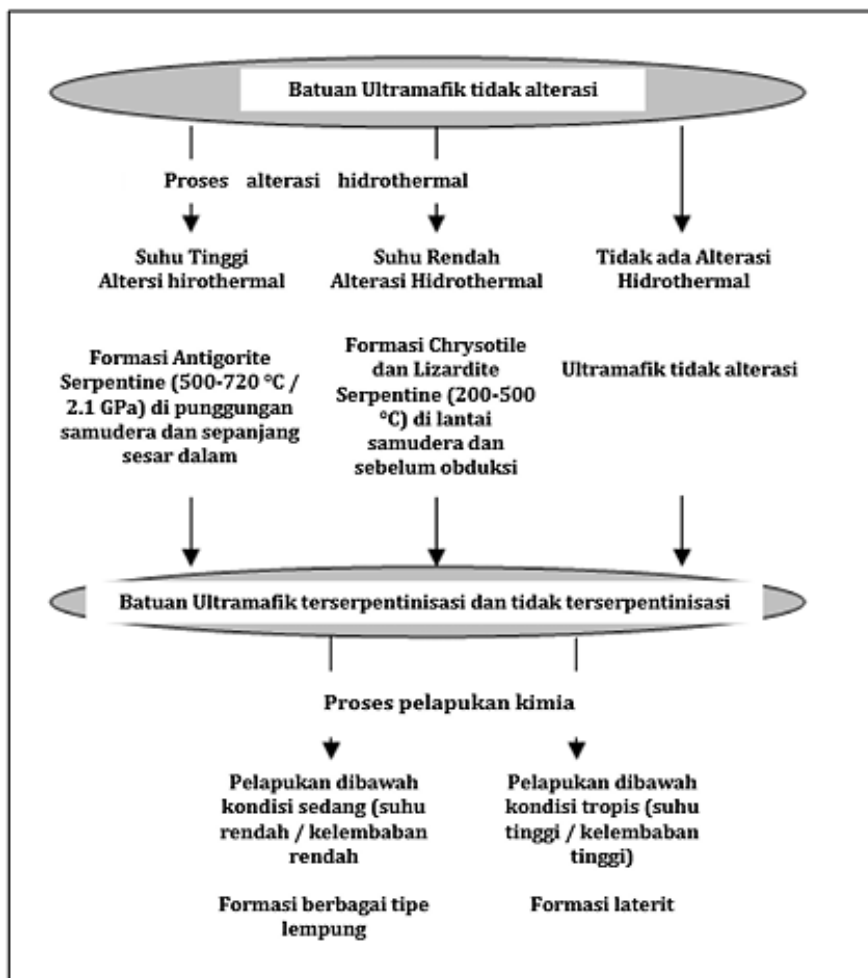


Gambar 10. Pembentukan Endapan Nikel (Kadariusman, et al, 2004)

Proses pertama dalam laterisasi adalah pelindian melalui media air. Air yang kaya akan CO_2 akan menguraikan mineral yang tidak stabil. Pada proses lateritisasi, tidak semua mineral mengalami pelapukan secara bersamaan. Olivin merupakan mineral yang paling cepat mengalami pelapukan karena ketidaksetimbangannya. Seiring dengan pelapukan olivin, pelapukan diikuti oleh piroksen hingga serpentin. Akibat dari pelapukan tersebut unsur-unsur akan bergerak mengikuti dari mobilitas

unsurnya. Larutan yang mengandung Mg, Ni, dan Si terus menerus kebawah selama larutannya bersifat asam, hingga pada suatu kondisi dimana suasana cukup netral akibat adanya kontak dengan tanah dan batuan, maka ada kecenderungan untuk membentuk endapan hydrosilikat.

Nikel yang terkandung dalam rantai silikat atau hydrosilikat dengan komposisi yang mungkin bervariasi tersebut akan mengendap pada celah-celah atau rekahan-rekahan yang dikenal dengan urat-urat garnierit dan krisopras. Zona ini disebut dengan zona saprolit. Sedangkan limonit terbentuk akibat oksidasi besi yang mengendap sebagai ferihidroksida dan membentuk mineral seperti goetit, limonit, dan hematit di dekat permukaan membentuk zona limonit.



Gambar 11. Skema perubahan batuan ultramafik (Ahmad, 2008).

1.7.6 Penyebaran dan Penampang Endapan Nikel Laterit

Secara horisontal penyebaran Ni tergantung dari arah aliran air tanah yang sangat dipengaruhi oleh bentuk kemiringan lereng (topografi). Air tanah bergerak dari daerah – daerah yang mempunyai tingkat ketinggian ke arah lereng, yang mana sebagian besar dari air tanah pembawa Ni, Mg dan Si yang mengalir ke zona pelindian atau zona tempat fluktuasi air tanah berlangsung. Pada tempat-tempat yang banyak mengandung rekahan rekahan Ni akan terjebak dan terakumulasi di tempat-tempat yang dalam sesuai dengan rekahan-rekahan yang ada, sedangkan pada lereng dengan kemiringan landai sampai sedang adalah merupakan tempat pengkayaan nikel.

Profil (penampang) laterit dapat dibagi menjadi beberapa zona. Profil nikel laterit tersebut dideskripsikan dan diterangkan oleh daya larut mineral dan kondisi aliran air tanah. Menurut Golightly, 1979 profil laterit dibagi menjadi 4 zonasi, yaitu:

1. Zona Limonit (LIM)

Zona ini berada paling atas pada profil dan masih dipengaruhi aktivitas permukaan dengan kuat. Zona ini tersusun oleh humus dan limonit. Mineral-mineral penyusunnya adalah goethit, hematit, tremolit dan mineral-mineral lain yang terbentuk pada kondisi asam dekat permukaan dengan relief relatif datar. Secara umum material-material penyusun zona ini berukuran halus (lempung-lanau), sering dijumpai mineral stabil seperti spinel, magnetit dan kromit.

2. Zona *Medium Grade Limonite* (MGL)

Sifat fisik zona *Medium Grade Limonite* (MGL) tidak jauh berbeda dengan zona *overburden*. Tekstur sisa batuan induk mulai dapat dikenali dengan adanya fragmen batuan induk, yaitu peridotit atau serpentin. Rata-rata berukuran antara 1-2 cm dalam jumlah sedikit. Ukuran material penyusun berkisar antara lempung-pasir halus. Ketebalan zona ini berkisar antara 0-6 meter. Umumnya singkapan zona ini terdapat pada lereng bukit yang relatif datar. Mineralisasi sama dengan zona *limonite* dan zona saprolit, yang membedakan adalah adanya kuarsa, lihopirit, dan opal.

3. Zona Saprolit

Zona saprolit merupakan zona bijih, tersusun atas fragmen-fragmen batuan induk yang teralterasi, sehingga mineral penyusun, tekstur dan struktur batuan dapat dikenali. Derajat serpentinisasi batuan asal laterit akan mempengaruhi pembentukan zona saprolit, dimana peridotit yang sedikit terserpentinisasi akan memberikan zona saprolit dengan unit batuan sisa yang keras, pengisian celah oleh mineral – mineral garnierit, kalsedon-nikel dan kuarsa, sedangkan serpentin akan menghasilkan zona saprolit yang relatif homogen dengan sedikit kuarsa atau garnierit.

4. Zona batuan induk (*Bedrock zone*)

Zona batuan induk berada pada bagian paling bawah dari profil laterit. Batuan induk ini merupakan batuan yang masih segar dengan pengaruh proses-

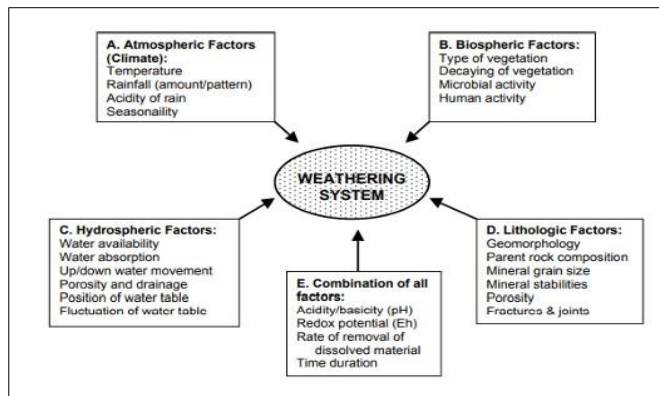
proses pelapukan sangat kecil. Batuan induk umumnya berupa peridotit, serpentinit, atau peridotit terserpentinisasi.

Tabel 3. Parameter Unsur dan Senyawa sebagai Dasar Pembagian Layer Nikel Laterit (PT. Ceria Nugraha Indotama SOP, 2022)

	Fe	MgO	Al ₂ O ₃	Co	Ni
LIMONITE	≥30%	<5%	≥10%	-	-
SAPROLITE	10%≤Fe<30%	>5%	-	<0,08%	-
BEDROCK	<10%	>27%	-	-	<0,7%

1.7.7 Faktor Pengontrol Laterisasi

Diagram dibawah ini adalah bagaimana beberapa faktor yang mempengaruhi proses laterisasi menurut Jenny (1961) dan Chesworth (1990) menyebutkan faktor tersebut antara lain :



Gambar 12. Faktor pengontrol laterisasi (Ahmad, 2008)

A. Faktor Atmosfer

1. Suhu,

tingkat di mana pemecahan mineral terjadi. Menurut peraturan Van't Hoff, setiap perubahan suhu 10 °C meningkatkan kecepatan reaksi kimia sekitar 2 sampai 3 kali.

2. Curah hujan,

suplai moisture/uap air untuk reaksi kimia dan suplai air untuk menghilangkan konstituen zat terlarut. Curah hujan yang ringan dan terus menerus lebih efektif dibanding hujan lebat yang tiba-tiba.

3. Musim,

faktor penting dalam proses pelapukan kimia dalam suhu dan rezim curah hujan. Sementara suhu tinggi dan curah hujan tinggi mendorong pelapukan kimiawi, gangguan singkat di lingkungan ini menandai tandanya sendiri pada siklus pelapukan.

B. Faktor Biosfer

Daerah tropis mempromosikan pertumbuhan vegetasi yang rimbun sementara suhu tinggi dan aktivitas mikroba tidak memungkinkan adanya akumulasi yang signifikan. Tingkat pembusukan bahan vegetasi sangat tinggi di daerah tropis dan menyebabkan pembangkitan sejumlah asam organik.

C. Faktor Hidrosfer

Hidrosfer termasuk rezim air yang mengelilingi permukaan batu yang terbuka dan terus turun ke bawah permukaan air tanah. Hal ini dapat dinyatakan agak kategoris bahwa tanpa kehadiran hidrosfer tidak ada pelapukan kimia yang mungkin terjadi dan produk pelapukan tersebut tidak akan pernah bisa dilepas. Dengan demikian faktor-faktor Hidrosfer mengendalikan tingkat dan jenis pelapukan kimia yang sangat besar.

D. Faktor Litologi

1. Komposisi batuan induk,

Endapan nikel laterit terbentuk di atas batuan dasar ultramafik yang memiliki konsentrasi nikel primer yang relatif tinggi. Dengan demikian, banyak endapan kadar tinggi di New Caledonia dan Sulawesi (Indonesia) terbentuk atas *dunites* dan *harzburgites* dengan kandungan *olivine* tinggi. *Lherzolite* dan *wehrlites* umumnya memberikan kadar nikel lebih rendah karena kandungan nikel yang lebih rendah dari clinopyroxenes.

2. Ukuran butir batuan dan bukaan seperti kekar.

Rekahan dan sesar semuanya cenderung membantu proses pelapukan kimia dan pelepasan bahan terlarut. bahwa batuan beku ukuran buti kasar lebih rentan terhadap pelapukan kimiawi daripada batuan halus.

3. Stabilitas mineral

Dalam ketahanannya terhadap pelapukan kimiawi. Beberapa cuaca sangat cepat (selama ribuan tahun) sementara cuaca lainnya sangat lambat (lebih dari jutaan tahun).

4. Porositas,

Dalam kasus batuan ultramafik, tingkat serpentinisasi meningkatkan porositas relatif batuan dasar dan memungkinkan air meresap untuk mengakses mineral sites yang mungkin tidak jauh dari kekar terbuka dan rekahan.

5. Kekar dan rekahan,

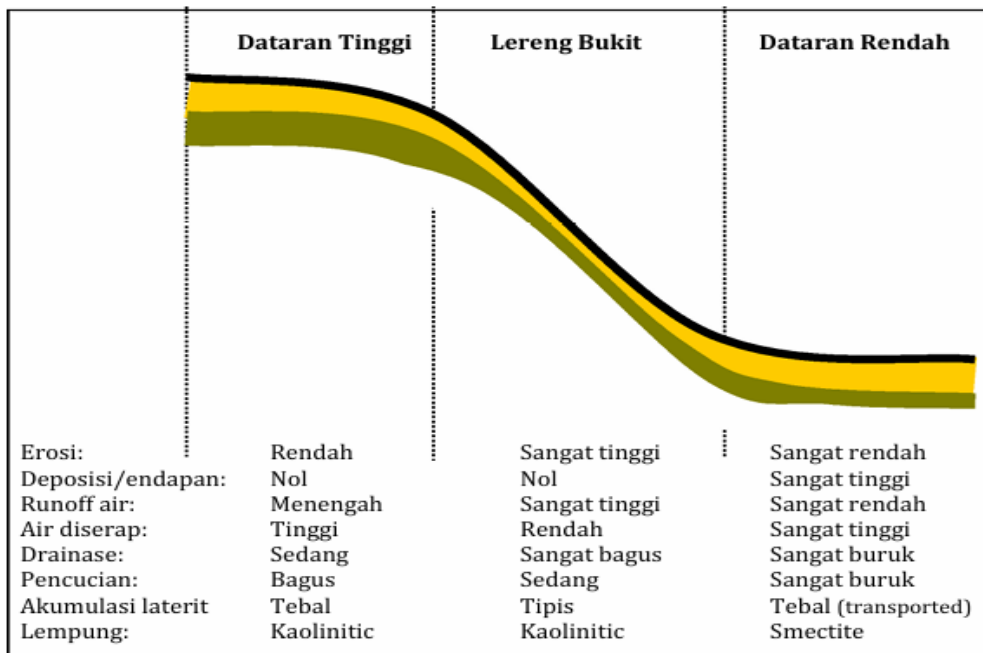
Akses air ke permukaan mineral dan memungkinkan bahan terlarut untuk dibawa pergi juga meningkatkan tingkat pelapukan kimia. Dalam konteks ini kekar di batuan dasar serta rekahan dan sesar memainkan peran penting dalam mengarahkan air hujan asam ke bagian yang lebih dalam dari profil pelapukan dan membawa pulang produk pelapukan kimia.

6. Topografi,

Pengaruh topografi terhadap perkembangan laterit diberikan melalui proses penyerapan air, pemindahan substansi zat terlarut, dan erosi profil laterit.

Tabel 4. Keseimbangan antara pembentukan laterit dan erosi laterit (Ahmad,2008)

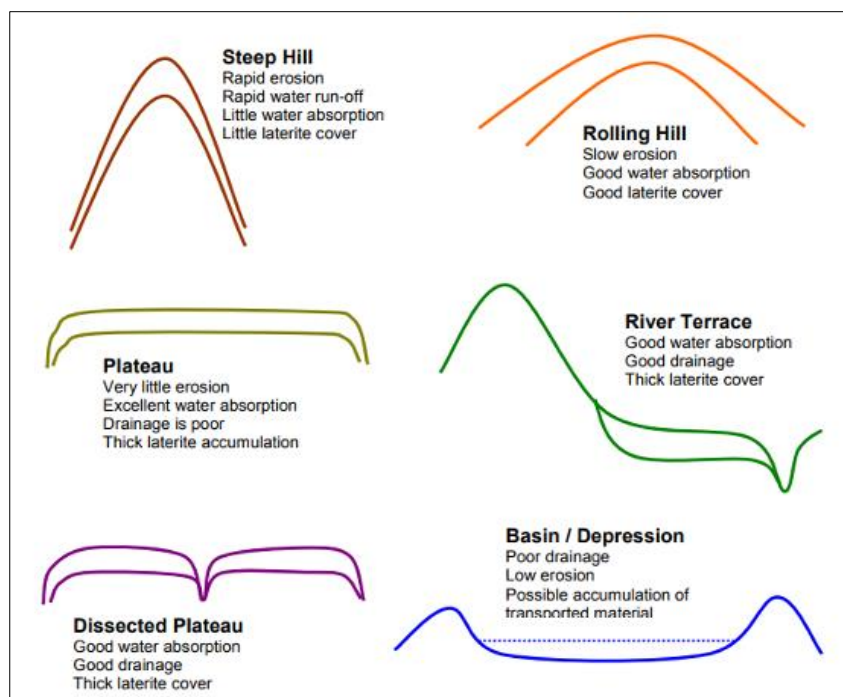
	Daerah atas datar	Kemiringan sangat curam	Kemiringan sedang	Daerah bawah datar
Penyerapan air hujan	Tinggi	Sangat kecil	Sedang	Tinggi
Pemindahan material terlarut	Sedang/cukup	Rendah, karena penyerapan air hujan	sempurna	Rendah karena drainase yang buruk
Erosi residu	Rendah	Sangat tinggi	sedang	Sangat rendah
Akumulasi bersih residu insitu	Tinggi karena pembentukan laterit tinggi dan erosi yang rendah	Rendah	Rendah – sedang	Tinggi
Akumulasi laterit yang ditransport	Nol	Nol	Tanah bergerak pelan dapat menebal disisi bukit	Sangat signifikan

**Gambar 13.** Diagram Komposit Topografi Laterit (Ahmad,2008)

1.7.8 Topografi dan Relief Topografi

Menurut Ahmad (2008), Topografi dan fitur *drainase* juga memainkan peran penting dalam pembentukan endapan bauksit dan gibbsite. Pada saat yang sama, proses laterisasi mengarah pada pengembangan beberapa pemandangan yang tidak biasa. Pengaruh topografi terhadap perkembangan laterit diberikan melalui proses penyerapan air, pemindahan substansi zat terlarut, dan erosi profil laterit.

Kondisi ideal untuk pelapukan kimia tercapai pada *slope* yang landai dan dimana air yang *run-off* tidak berlebihan serta drainasenya bagus. Level tertinggi dari pengayaan nikel supergen membutuhkan air tanah dengan pelarutan nikel hingga ke *water table* paling rendah. Area yang datar dan memiliki *water table* yang tinggi tidak akan menunjukkan pengayaan nikel supergen yang signifikan pada zona *saprolite*. Topografi dan laju *chemical weathering* mengontrol ketebalan dari profil laterit yang mewakili keseimbangan antara laterit baru yang terbentuk di dasar profil dan laterit tua terkikis di bagian atas profil.



Gambar 14. Bentuk lahan laterit yang disederhanakan (Ahmad,2008)

Bentuk lahan laterit memiliki peranan penting dalam menentukan proses pelapukan batuan dan pengayaan unsur logam, seperti nikel. Berdasarkan gambar di atas, terdapat enam bentuk lahan utama yaitu *steep hill*, *rolling hill*, *plateau*, *river terrace*, *dissected plateau*, dan *basin/depression*. Masing-masing bentuk lahan memiliki karakteristik yang berbeda terhadap tingkat erosi, penyerapan air, sistem drainase, serta ketebalan lapisan laterit yang terbentuk. Variasi morfologi ini

memengaruhi intensitas pelapukan dan mobilitas unsur logam, sehingga sangat berpengaruh terhadap pembentukan endapan laterit nikel di permukaan bumi.

Pada daerah ***steep hill*** atau bukit terjal, lerengnya memiliki kemiringan sangat tinggi sehingga air hujan cepat mengalir ke bawah tanpa sempat meresap ke dalam tanah. Kondisi ini menyebabkan terjadinya erosi yang cepat dan penyerapan air yang rendah. Akibatnya, proses pelapukan kimia yang membentuk laterit tidak berkembang dengan baik, dan lapisan laterit yang terbentuk menjadi tipis. Daerah ini biasanya tidak ideal untuk akumulasi nikel karena mineral-mineral yang mengandung nikel mudah terangkut oleh air limpasan.

Berbeda dengan bukit terjal, pada ***rolling hill*** atau perbukitan landai, kemiringan lereng yang lebih rendah memungkinkan air hujan untuk meresap lebih banyak ke dalam tanah. Proses pelapukan berlangsung lebih intensif dan erosi yang terjadi lebih lambat. Kondisi ini mendukung pembentukan lapisan laterit yang lebih tebal dan stabil. Oleh karena itu, daerah perbukitan landai sering menjadi zona transisi antara daerah erosi di bagian atas dan daerah akumulasi di bagian bawah, sehingga masih berpotensi menyimpan endapan nikel laterit.

Sementara itu, ***plateau*** atau dataran tinggi cenderung datar dan luas dengan erosi yang sangat kecil. Air hujan dapat meresap dengan baik, namun drainasinya seringkali buruk sehingga air mudah tergenang. Keadaan ini menyebabkan proses pelapukan kimia berlangsung lama, memungkinkan akumulasi unsur-unsur besi dan nikel dalam jumlah besar. Akibatnya, lapisan laterit yang terbentuk di plato umumnya sangat tebal dan kaya akan mineral logam, menjadikannya salah satu morfologi paling ideal untuk pembentukan endapan nikel laterit ekonomis.

Pada ***river terrace*** atau teras sungai, kondisi topografi yang relatif datar dan *drainase* yang baik mendukung penyerapan air sekaligus mencegah genangan berlebihan. Lapisan laterit di daerah ini cenderung tebal dan terdistribusi merata karena adanya kombinasi antara pelapukan di tempat dan pengendapan ulang dari material yang tererosi dari daerah sekitarnya. Hal yang sama juga terjadi pada *dissected plateau*, yaitu plato yang telah terpotong oleh lembah-lembah erosi. Meskipun mengalami diseksi, wilayah ini tetap memiliki kondisi *drainase* dan pelapukan yang baik sehingga lapisan lateritnya tetap tebal dan potensial.

Terakhir, pada ***basin/depression*** atau cekungan, morfologi yang rendah menyebabkan air dan material hasil erosi dari daerah sekitarnya terkumpul di tempat ini. Drainase yang buruk membuat air sering tergenang, sehingga proses pelapukan dan pengendapan berjalan bersamaan. Daerah ini sering menjadi tempat akumulasi material tertransportasi yang kaya unsur logam, meskipun lapisan lateritnya tidak selalu terbentuk secara in-situ. Oleh karena itu, daerah cekungan dapat memiliki potensi nikel yang cukup tinggi, terutama jika material dari daerah lebih tinggi terakumulasi dalam jumlah besar.

1.7.9 Analisa Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng merupakan salah satu parameter geomorfologi yang sangat penting dalam analisis bentuklahan karena mencerminkan keseimbangan antara proses endogen dan eksogen yang bekerja di permukaan bumi. Menurut Young (1972), kemiringan lereng berperan langsung dalam mengontrol intensitas proses erosi, laju pelapukan, kestabilan permukaan, serta distribusi material hasil pelapukan. Oleh karena itu, klasifikasi kemiringan lereng tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga memiliki makna genetik terhadap perkembangan morfologi suatu wilayah.

Tabel 5. Klasifikasi kemiringan lereng (Young, 1972)

Kelas Lereng	Proses, Karakteristik dan Kondisi lahan	Simbol warna yang disarankan.
0° – 1,7° (0 - 3 %)	Datar atau hampir datar, umumnya berkembang pada dataran struktural, pedataran denudasional, atau permukaan tua yang telah mengalami stabilisasi morfologi dalam waktu geologi yang panjang	Hijau Muda
1,7° – 4,6° (3 - 8 %)	Landai, umumnya berkembang pada dataran struktural, pedataran denudasional, atau permukaan tua yang telah mengalami stabilisasi morfologi	Kuning
4,6° – 8,5° (8 - 15 %)	Lereng agak curam, proses erosi mulai berperan lebih dominan dibandingkan pelapukan	Kuning tua
8,5° – 16,7° (15 - 30 %)	Lereng yang curam, proses erosi mulai berperan lebih dominan dibandingkan pelapukan. Material hasil pelapukan cenderung terangkut ke bagian lereng yang lebih rendah, sehingga ketebalan tanah dan regolit menjadi lebih tipis	Merah
>16,7° (>30 %)	Kemiringan lereng yang curam sampai terjal, proses denudasi dan gerakan massa menjadi faktor pengontrol utama, menyebabkan permukaan lereng relatif tidak stabil dan miskin akumulasi material halus	Merah tua

Dalam konteks geomorfologi tropis, khususnya wilayah dengan intensitas pelapukan kimia yang tinggi, klasifikasi Young (1972) dinilai lebih representatif dibandingkan klasifikasi berbasis morfografi semata. Hal ini karena klasifikasi tersebut mempertimbangkan keterkaitan antara kemiringan lereng, kestabilan permukaan, dan proses pelapukan jangka panjang. Oleh sebab itu, klasifikasi Young (1972) banyak digunakan sebagai dasar analisis hubungan antara morfologi dengan proses laterisasi, pembentukan tanah, serta distribusi endapan residual.

1.7.10 Analisis Korelasi Pearson *Product Moment* (PPM)

Korelasi Pearson Product Moment (PPM) adalah salah satu dari sembilan teknik analisis korelasi yang paling banyak digunakan. Metode ini diperkenalkan oleh Karl Pearson sekitar tahun 1900. Menurut Sugiyono (2013), korelasi Pearson digunakan untuk mengidentifikasi hubungan dan menguji hipotesis mengenai hubungan antara dua variabel (bivariat) yang memiliki skala pengukuran interval atau rasio, dengan syarat sumber data dari kedua variabel atau lebih tersebut harus berasal dari sumber yang sama.

Korelasi PPM memiliki beberapa kriteria yang perlu dipenuhi agar dapat diterapkan, di antaranya:

1. Sampel harus diambil secara acak (random) dari populasi.
2. Data yang akan dianalisis korelasinya harus memiliki skala pengukuran interval atau rasio.
3. Variasi skor dari kedua variabel yang akan dikorelasikan harus relatif sama.
4. Distribusi skor variabel yang akan dikorelasikan sebaiknya berbentuk unimodal.
5. Hubungan antara variabel X dan Y harus bersifat linier.

Tujuan dari korelasi ini adalah untuk mencari koefisien korelasi yang dilambangkan dengan simbol r . Fungsi utamanya adalah untuk mengetahui tingkat hubungan serta menyatakan besarnya kontribusi (sumbangan) antara dua variabel, yaitu variabel bebas (independent) yang dilambangkan dengan x dan variabel terikat (dependent) yang dilambangkan dengan y . Menurut Lind, Marchal, dan Wathen (2008), koefisien korelasi merupakan ukuran yang menggambarkan kekuatan hubungan linier antara dua variabel. Adapun karakteristik koefisien korelasi:

1. Koefisien korelasi sampel dilambangkan dengan huruf kecil r .
2. Nilai r menunjukkan arah dan kekuatan hubungan linier antara dua variabel.
3. Hubungan yang sempurna atau sangat kuat terjadi ketika $r = 1$ atau $r = -1$.
4. Nilai r yang mendekati 0 menunjukkan hubungan yang lemah atau hampir tidak ada hubungan antara variabel.
5. Nilai r yang mendekati 1 menunjukkan hubungan positif antara variabel.
6. Nilai r yang mendekati -1 menunjukkan hubungan negatif atau kebalikan antara variabel.

Untuk menentukan nilai koefisien korelasi, diperlukan tabel bantu. Data yang telah dikelompokkan ke dalam variabel x dan y dimasukkan ke dalam tabel tersebut untuk menghitung x^2 , y^2 , xy , dan seterusnya. Hasil perhitungan tersebut kemudian dimasukkan ke dalam rumus korelasi untuk mendapatkan nilai r . Agar nilai r dapat dipahami dengan baik, perlu dilakukan interpretasi. Sebagai contoh, jika ditemukan $r = 0,9219$, dapat dilihat bahwa nilai tersebut positif, menunjukkan adanya hubungan langsung antara variabel x dan y . Nilai yang mendekati 1 menunjukkan bahwa hubungan antara kedua variabel tersebut sangat kuat.

Tabel 6 Nilai korelasi PPM (Sugiyono,2013)

Nilai Korelasi (r)	Tingkat Hubungan
0.00 – 0.19	Sangat Lemah
0.20 – 0.39	Lemah
0.40 – 0.59	Sedang/Moderat
0.60 – 0.79	Kuat
0.80 – 1.00	Sangat Kuat

r_{xy} = Korelasi antara variabel x dengan y

x = Variabel A (misalnya: total MgO)

y = Variabel B (misalnya: total Ni)

n = Jumlah pasangan data (banyaknya sampel atau titik data)

$\sum x$ = Jumlah total nilai variabel **x** (misalnya: total MgO)

$\sum y$ = Jumlah total nilai variabel **y** (misalnya: total Ni)

$\sum x^2$ = Jumlah kuadrat nilai **x** $\rightarrow \sum(x^2)$, bukan $(\sum x)^2$

$\sum y^2$ = Jumlah kuadrat nilai **y** $\rightarrow \sum(y^2)$, bukan $(\sum y)^2$

$\sum xy$ = Jumlah hasil kali antara nilai x dan y pada setiap pasangan data $\rightarrow \sum(x \cdot y)$

Rumus Korelasi PPM : $r_{xy} = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{(n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2) (n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2)}}$

1.7.11 Graph Neural Networks dalam Analisis Spasial Tiga Dimensi

Graph Neural Networks (GNN) merupakan metode pembelajaran mesin yang dirancang untuk memodelkan data yang terstruktur dalam bentuk grafik, dimana objek direpresentasikan sebagai *node* (titik) dan hubungan antar objek direpresentasikan sebagai *edge* (garis). Berbeda dengan metode konvensional yang mengasumsikan data bersifat independen dan terdistribusi secara *Euclidean*, GNN mampu menangkap ketergantungan spasial dan hubungan non-linear antar data. Dalam konteks geologi, khususnya endapan nikel laterit, pendekatan grafik sangat relevan karena distribusi kadar Ni dipengaruhi oleh hubungan spasial tiga dimensi, kontinuitas vertical, serta kontrol morfologi yang bersifat tidak linear dan saling berinteraksi (Wu,Z., et al, 2021).

Secara matematis, sebuah grafik didefinisikan sebagai $G=(V,E)$, dengan $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ sebagai himpunan node dan $E \subseteq V \times V$ sebagai himpunan edge. Setiap node v_i memiliki vector fitur x_i yang dalam penelitian ini merepresentasikan atribut geologi seperti koordinat spasial (X, Y, Z), elevasi, kemiringan lereng, dan kadar Ni. Proses utama dalam GNN dikenal sebagai *message passing*, yang secara umum dirumuskan sebagai:

$$\mathbf{h}_i^{(k+1)} = \sigma \left(\sum_{j \in \mathcal{N}(i)} W^{(k)} \mathbf{h}_j^{(k)} + \mathbf{b}^{(k)} \right)$$

Dengan $\mathbf{h}_i^{(k)}$ adalah representasi node pada lapisan ke- k , $\mathcal{N}(i)$ adalah himpunan node tetangga, $W^{(k)}$ adalah matriks bobot yang dipelajari, dan σ adalah fungsi aktivasi non-linear. Formulasi ini memungkinkan informasi spasial dan morfologi dari node-node tetangga berkontribusi langsung terhadap estimasi kadar Ni pada suatu titik (Kipf, & Welling, 2017).

Konektivitas graf dalam penelitian ini dibangun berdasarkan kedekatan spasial tiga dimensi, di mana node-node lubang bor atau interval bor yang berdekatan secara horizontal maupun vertikal dihubungkan sebagai tetangga. Pendekatan ini secara geologi merepresentasikan asumsi kontinuitas laterit, yaitu bahwa interval dengan jarak spasial dekat cenderung mengalami proses pelapukan dan pengayaan Ni yang serupa (Butt & Cluzel, 2013).

Pada tahap estimasi dan visualisasi, hasil representasi graf dievaluasi melalui grafik distribusi tiga dimensi kadar Ni. Plot 3D digunakan sebagai bentuk eksplorasi visual awal untuk menilai kontinuitas spasial sebelum dilakukan pelatihan model prediktif penuh. Warna titik merepresentasikan kadar Ni sebagai atribut node, sedangkan posisi X–Y–Z mempertahankan geometri geologi asli. Visualisasi ini memungkinkan identifikasi kluster spasial, diskontinuitas vertikal, serta pengaruh morfologi terhadap distribusi Ni secara intuitif dan terintegrasi. Dengan demikian, grafik 3D berfungsi sebagai jembatan antara teori dan interpretasi geologi, sekaligus sebagai dasar validasi konseptual terhadap hipotesis pengaruh morfologi terhadap kadar Ni (Fryssinet, 2005)

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Metode Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 2 (dua) yaitu observasi lapangan dan analisis laboratorium. Observasi lapangan secara langsung dilakukan dengan cara pengambilan data-data geologi yang tersingkap meliputi aspek – aspek geomorfologi, singkapan hasil bukaan dan sampel *coring*, dan struktur geologi. Analisis laboratorium dilakukan dengan analisis geokimia dan petrografi.

Metode penelitian yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi lima tahapan, yaitu tahap pendahuluan, tahap penelitian lapangan, tahap pengolahan data, tahap analisis dan interpretasi data, serta tahap penyusunan laporan.

2.1.1 Tahapan Pendahuluan

Tahap pendahuluan dilakukan sepenuhnya sebelum penelitian dimulai. Pada fase ini, penulis melakukan berbagai langkah awal untuk memulai penelitian. Tahapan ini sangat krusial untuk memaksimalkan hasil penelitian, sekaligus memberikan panduan yang jelas mengenai apa dan bagaimana penelitian dilakukan secara ilmiah, sehingga hasilnya dapat dipertanggungjawabkan.

Tahap Pendahuluan dilaksanakan sebelum penelitian, terdiri dari:

1. Pengurusan administrasi, pengurusan surat izin guna legalitas kegiatan penelitian.
2. Studi literatur, dilakukan untuk memperoleh landasan teori dan informasi terkait karakteristik laterit, hubungan antar unsur geokimia (Ni, Fe, SiO₂, MgO), serta metode pengolahan data geologi. Literatur yang digunakan meliputi jurnal ilmiah, buku referensi, laporan penelitian sebelumnya, dan data sekunder lainnya.

2.1.2 Tahapan Penelitian Lapangan

Pada tahap observasi lapangan, dilakukan kunjungan langsung ke lokasi, yaitu area operasi penambangan atau daerah eksplorasi. Tahap ini meliputi kegiatan sebagai berikut :

1. Pengamatan dan pengukuran terhadap aspek-aspek morfologi seperti: relief (bentuk puncak, bentuk lembah dan keadaan lereng), pelapukan (jenis dan tingkat pelapukan).
2. Pengamatan unsur-unsur geologi daerah penelitian meliputi kondisi fisik singkapan batuan dari hasil bukaan maupun sampel *coring* dan pengambilan contoh batuan untuk analisis petrografi.
3. Pengamatan dan pengukuran unsur-unsur struktur geologi seperti kedudukan batuan, kekar, sesar, breksiasi dan lain-lain yang bertujuan untuk memahami pola struktur yang berkembang di daerah penelitian.
4. Dokumentasi lapangan berupa catatan lapangan, sketsa, dan foto lapangan.

2.1.3 Tahapan Pengambilan Data

Pengambilan data primer bawah permukaan dilakukan melalui pengeboran (*coring*) menggunakan mesin penggerak *diesel* yang mampu menembus kedalaman hingga 50–60 meter, tergantung pada kemampuan alat dan mata bor. Dalam praktek ini, mesin bor yang digunakan adalah tipe Jacro 175-200. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan dalam proses pemboran meliputi jenis material yang akan ditembus, tingkat keberadaan air bawah permukaan, serta kemiringan area pemboran.

2.1.4 Analisis Data Pengeboran (*Coring*)

Pengeboran adalah salah satu tahap dalam proses eksplorasi yang dilakukan untuk memperoleh informasi lebih mendalam mengenai kondisi geologi di bawah permukaan suatu daerah. Oleh karena itu, data pengeboran sangat krusial untuk interpretasi data geologi lebih lanjut. Analisis data bor dalam penelitian ini bertujuan untuk mempelajari profil laterit (limonit dan saprolit) serta batuan dasar di area penelitian. Pengamatan dilakukan secara langsung pada hasil pengeboran, dengan mengidentifikasi ciri-ciri masing-masing profil laterit.

2.1.5 Analisa Laboratorium

Analisis laboratorium bertujuan untuk mengolah data-data yang telah dikumpulkan selama penelitian lapangan. Beberapa jenis analisis yang akan dilakukan antara lain:

2.1.5.1 Analisis Geokimia X-Ray Fluorescence (XRF)

X-Ray Fluorescence (XRF) adalah alat yang digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dan konsentrasi unsur-unsur yang terkandung dalam suatu sampel dengan metode spektrometri. XRF umumnya digunakan untuk menganalisis unsur-unsur dalam mineral atau batuan. Analisis unsur dilakukan secara kualitatif untuk mengidentifikasi jenis unsur yang ada, serta secara kuantitatif untuk menentukan konsentrasi unsur dalam sampel hasil pengeboran.

2.1.5.2 Analisis Petrografi

Analisis petrografi dilakukan dengan mengamati sayatan tipis (*thin section*) batuan menggunakan mikroskop polarisasi untuk memperoleh informasi lebih detail mengenai komposisi mineral, tekstur, dan struktur penyusun batuan. Pengamatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis mineral yang membentuk batuan dasar (*bedrock*), yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam penentuan jenis batuan.

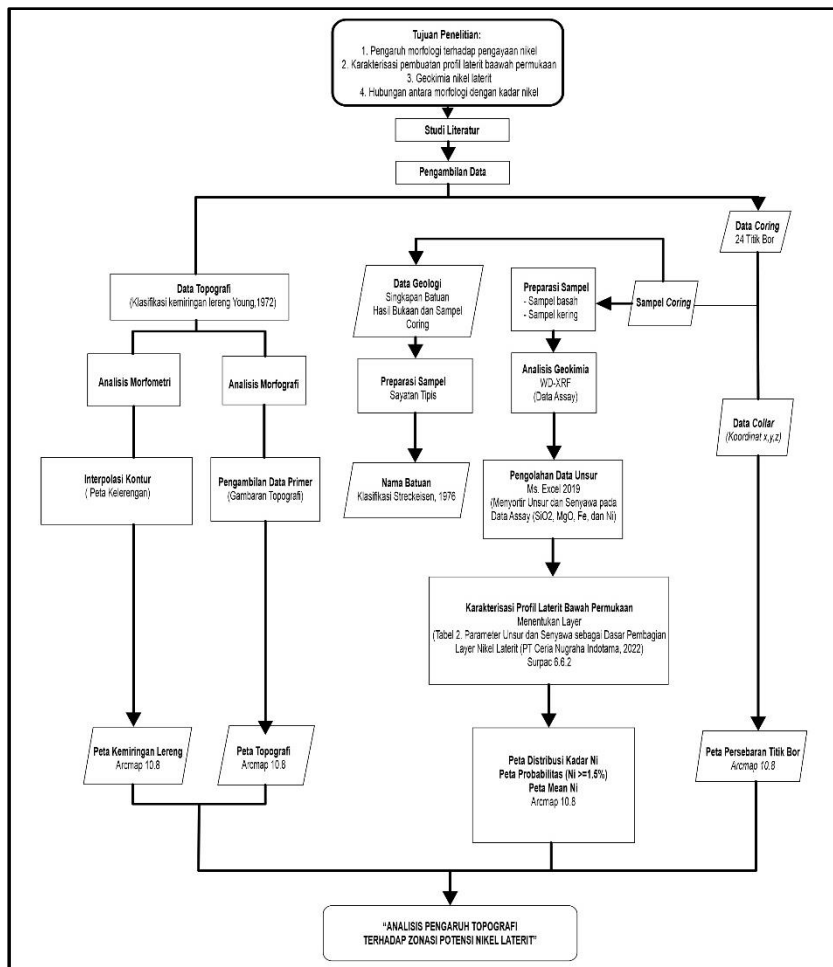
2.1.6 Tahapan Interpretasi dan Penyajian Data

Pada tahap ini, semua hasil analisis diinterpretasikan dan disajikan dalam bentuk peta menggunakan perangkat lunak ArcMap 10.8 untuk memvisualisasikan data secara spasial. Peta yang dihasilkan meliputi:

- A. Peta Persebaran Titik Bor
- B. Peta kemiringan lereng
- C. Peta sebaran ketebalan laterit
- D. Peta distribusi kadar Ni
- E. Peta probabilitas Ni
- F. Peta mean Ni

2.1.7 Tahap Penyusunan Laporan

Pada tahap ini, semua data yang diperoleh, termasuk data lapangan, data pengeboran, dan data geokimia, diolah menggunakan metode XRF untuk menghasilkan kesimpulan mengenai pengaruh topografi terhadap zonasi potensi nikel pada Daerah Wolo, Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Setelah data diolah, hasilnya digabungkan dan disusun dalam bentuk tulisan ilmiah, yaitu skripsi, yang dipresentasikan dalam seminar pada Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin.



Gambar 15. Diagram Alir