

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki cadangan endapan nikel laterit yang sangat besar dan tersebar luas pada kawasan beriklim tropis, menjadikannya sebagai salah satu produsen nikel dunia. Endapan ini terbentuk hasil dari proses pelapukan terhadap batuan ultramafik seperti dunit, harzburgit, lherzolit, dan peridotit, yang membentuk domain geologi seperti limonit dan saprolit dengan kadar dan sifat fisik berbeda. Zona saprolit kaya akan nikel dan cocok untuk operasi pirometalurgi, sedangkan zona limonit cenderung memiliki kadar besi dan kobalt lebih tinggi, cocok untuk proses HPAL (Ahmad, 2005). Oleh karena itu, identifikasi dan pemisahan zona-zona tersebut sangat penting untuk memaksimalkan efisiensi produksi dan nilai ekonomis bijih nikel.

Namun, distribusi kimia dan bentuk geometris dari endapan, seperti kehadiran *pinnacle* atau ketebalan *ore* yang tidak seragam, menciptakan tantangan dalam *grade control*. Penelitian di wilayah kompartemen X ini menunjukkan bahwa distribusi *ore* dipengaruhi oleh tingkat serpentinisasi batuan dasar serta tipe batuan ultramafik yang mendasarinya. Di Blok Timur (daerah penelitian), bijih terbentuk di atas batuan dasar yang telah mengalami serpentinisasi tinggi dan memiliki kadar nikel lebih tinggi (Ahmad, 2005). Variasi ini menyebabkan *irregular* yang tinggi pada kadar *ore*, meningkatkan risiko terjadinya dilusi jika tidak dikendalikan dengan baik.

Dilusi dalam penambangan laterit merupakan fenomena yang sulit dihindari dan dapat disebabkan oleh pencampuran *low grade ore* atau material *waste*. Menurut Notosiswoyo (2005), dilusi dibagi menjadi dua jenis, yaitu dilusi internal (geometrik dan inheren) dan dilusi eksternal. Dilusi internal terjadi ketika material berkadar rendah berada dalam zona *ore*, sedangkan dilusi eksternal terjadi akibat kesalahan operasional seperti runtuhnya dinding pit atau kesalahan penggalian batas *ore*. Lebih lanjut, Jang (2014) menyebutkan bahwa dilusi dapat dibedakan menjadi *planned* dan *unplanned*, di mana keduanya akan berdampak negatif pada kadar rata-rata dan meningkatkan tonase tanpa meningkatkan kadar bijih. Oleh karena itu, analisis pengaruh distribusi bijih dan pengendalian dilusi sangat penting untuk efisiensi operasi tambang.

Ketidaksesuaian antara blok model dengan kondisi aktual produksi juga menjadi penyebab utama terjadinya *ore loss* dan dilusi. Rekonsiliasi antara estimasi kadar dan tonase dengan hasil aktual produksi di lapangan merupakan metode penting untuk mengidentifikasi penyimpangan ini (Richard dan Sulemana, 2015).



il (2019), dilusi harus diperhitungkan secara eksplisit dalam karena akan menurunkan estimasi kadar rata-rata dan material yang ditambang. Oleh karena itu, peneliti tertarik uji bijih nikel laterit, mengidentifikasi potensi risiko dilusi, uk model dan aktual penambangan, serta mengevaluasi adap kadar dan tonase penambangan di Kompartemen X, upupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan.

### 1.1.1 Rumusan Masalah

Berdasarkan penjabaran latar belakang di atas, maka permasalahan yang akan diselesaikan dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh distribusi kimia dan *pinnacle* endapan nikel laterit terhadap sebaran bijih?
2. Bagaimana sebaran potensi dilusi berdasarkan produk bijih endapan nikel laterit?
3. Bagaimana perbandingan blok model dan kondisi aktual penambangan?
4. Bagaimana pengaruh dilusi terhadap kadar dan tonase penambangan?

### 1.1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk menganalisis pengaruh distribusi kimia dan *pinnacle* endapan nikel laterit terhadap sebaran bijih.
2. Untuk menganalisis sebaran potensi dilusi berdasarkan produk bijih endapan nikel laterit.
3. Untuk menganalisis perbandingan blok model dan kondisi aktual penambangan.
4. Untuk menganalisis pengaruh dilusi terhadap kadar dan tonase penambangan.

### 1.1.3 Batasan Masalah

Agar fokus penelitian lebih terarah, berikut ini merupakan batasan ruang lingkup penelitian:

1. Studi ini hanya terbatas pada satu area, yakni kompartemen X, kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan dengan batas area yang telah dilakukan penambangan.
2. Data yang digunakan terbatas pada data *drillholes*, data topografi, data produksi aktual yang tersedia selama Februari 2024 hingga April 2025.
3. Analisis distribusi kimia dan *pinnacle* hanya difokuskan pada zona bijih laterit.
4. Evaluasi dilusi hanya difokuskan pada dampaknya terhadap kadar dan tonase penambangan.

### 1.1.4 Lokasi Penelitian dan Kesampaian Daerah

Secara administratif, lokasi penelitian berada di Kecamatan, Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Lokasi ini dapat dijangkau menggunakan moda transportasi darat selama ±13 jam dari Kampus Fakultas Teknik Universitas Nuha, Kabupaten Luwu Timur yang berjarak kurang lebih





**Gambar 1.** Peta Kesampaian Daerah Penelitian.

### 1.1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan mampu memberikan beberapa manfaat, diantaranya:

#### 1. Manfaat Keilmuan

- Menyediakan referensi tambahan terkait pengaruh distribusi endapan nikel laterit terhadap kadar dan tonase *ore* penambangan.
- Berkontribusi pada pengembangan metode selektif *mining* dalam meminimalisir *ore loss* yang terjadi.



kan wawasan mengenai keterkaitan antara geokimia dan terhadap endapan nikel laterit di lokasi penambangan.

Perusahaan

in informasi geologis mengenai pengaruh distribusi kimia dan *pinnacle* terhadap sebaran *ore* pada endapan nikel laterit.

4

- Memberikan informasi visual berupa peta risiko potensi dilusi pada wilayah penambangan, sehingga dapat menentukan langkah mitigasi untuk mengurangi terjadinya dilusi, terkhusus pada sekitar daerah penelitian.
- Menyajikan analisis kualitatif dan kuantitatif mengenai dampak dilusi terhadap kadar dan tonase *ore* yang ditambang, sehingga berguna dalam pengendalian kualitas *ore* dan pencapaian tonase.

3. Manfaat Untuk Institusi

- Menambah sumber pustaka di institusi pendidikan, khususnya di bidang Teknik Geologi.
- Mempererat kolaborasi antara institusi pendidikan Universitas Hasanuddin dan PT. Vale Indonesia melalui studi berbasis kasus industri.
- Menjadi sarana promosi bagi institusi dalam menunjukkan peran aktif mahasiswa dan dosen dalam penelitian yang relevan dengan kebutuhan industri.

4. Manfaat Untuk Penulis

- Menambah sumber pustaka di institusi pendidikan, khususnya di bidang Teknik Geologi.
- Memenuhi kewajiban akademik melalui penyusunan tugas akhir atau skripsi guna meraih gelar Sarjana Teknik Geologi.
- Dapat memberikan pemahaman mendalam mengenai analisis distribusi endapan nikel laterit terhadap kadar dan tonase *ore* penambangan, khususnya di PT. Vale Indonesia Tbk.
- Menerapkan pengetahuan yang diperoleh selama masa studi ke dalam praktik kerja, khususnya dalam disiplin geokimia dan geostatistik.

## 1.2 Teori

### 1.2.1 Geologi Regional

Secara regional, wilayah geologi Soroako berada dalam cakupan peta geologi Lembar Malili dan Bungku. Lembaran-lembaran ini dipetakan pada skala 1 : 250.000 oleh Simandjuntak dkk., (1991; 1993). Kumpulan batuan yang menempati daerah Malili, Soroako, dan Bungku dapat diklasifikasikan ke dalam empat kelompok, yaitu: (i) Kompleks metamorf, (ii) Batuan tektonit, (iii) Sekuen sedimen mezosoik, (iii) Kompleks ultramafik, dan (iv) Endapan Tersier.

Batuan ultramafik yang terdapat di daerah penelitian termasuk *Earth Sulawesi Ophiolite* (ESO). ESO dikategorikan sebagai salah satu kompleks ofiolit paling besar di dunia bersama dengan Oman dan Papua Nugini. Ini mencakup area seluas sekitar



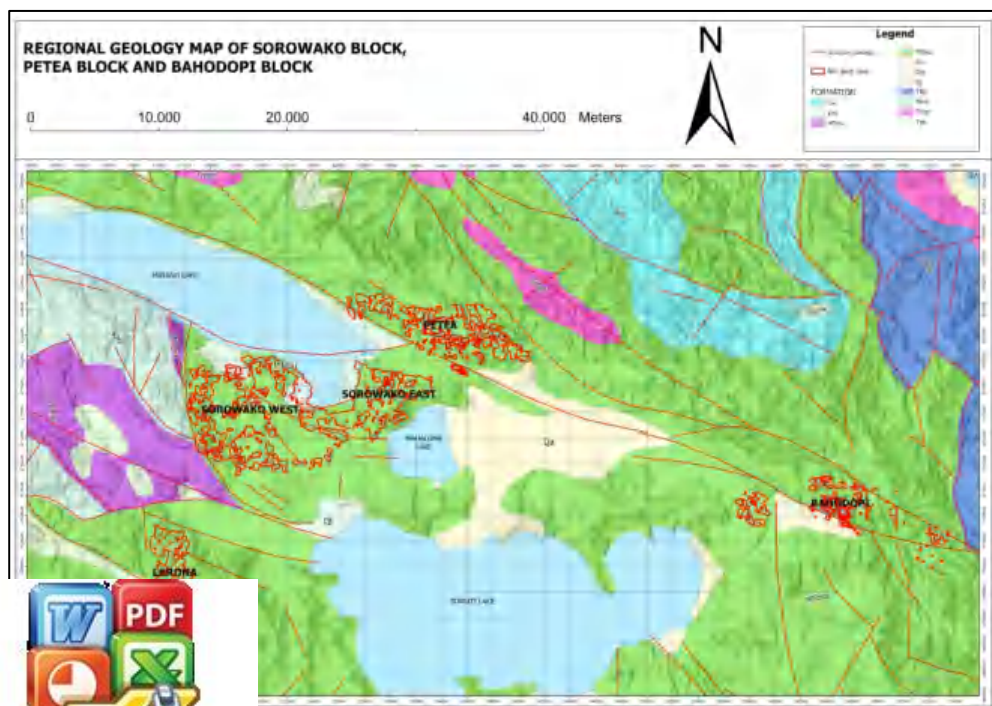
ketebalan sekitar 10.000 m. Distribusi batuan mafik dan i Tenggara dan Timur ditemukan sebagai blok-blok terisolasi di rat Teluk Bone dan pantai timur Teluk Tolo serta meluas ke a (Surono dan Sukarna, 2001).

elitian telah dieksplorasi secara rinci oleh PT. INCO (PT. Vale ng dominan adalah harzburgit dan lherzolit dengan sedikit dunit jarang (Ahmad, 2009). Secara umum, batuan ini dapat

digambarkan sebagai peridotit hijau hingga hijau tua. Peridotite umumnya berbutir kasar dengan piroksen (enstatit) yang biasanya muncul sebagai kristal besar berwarna perunggu. Dengan meningkatnya tingkat serpentinisasi, warna batuan umumnya menjadi lebih gelap.

Batuan ultramafik di Soroako menunjukkan dominasi olivin primer dengan jumlah yang lebih kecil (hingga 40%) dari ortopiroksen dan jumlah yang lebih kecil (hingga 25%) dari klinopiroksen. Rasio ortopiroksen terhadap klinopiroksen (Opx : Cpx) umumnya lebih besar dari dua. Mineral opaq termasuk kromit (sekitar 2%) sementara magnetit sekunder dalam batuan yang terpeninisasi dengan barik dapat mencapai hingga 5% dan terlokalisasi dalam urat-urat tipis atau di sepanjang tepi kristal olivin peninggalan, atau terdistribusi dalam bentuk penyebaran. Kerentanan magnetik batuan dan tingkat serpentinisasi berkorelasi.

Batuan ultramafik juga menunjukkan tanda-tanda deformasi yang luas berdasarkan struktur kristal di dalam sekitar sesar terutama sesar naik utama di daerah pinggiran yang memisahkan ultramafik dari sedimen di sekitarnya. Kompleks ultramafik di Soroako dibatasi di bagian barat oleh sesar naik yang menekuk ke arah barat yang memisahkannya dari sedimen Mesozoikum yang sebagian besar terdiri dari batugamping dengan serpih merah yang saling berselingan. Breksiasi yang ekstensif dan mylonisasi ultramafik terlihat jelas di sepanjang kontak sesar ini. Peta geologi lokal daerah Soroako ditunjukkan pada (gambar 2).



logi Area Sorowako yang disederhanakan.  
penulis setelah Simandjuntak. dkk (1991).

## 1. Geomorfologi Regional

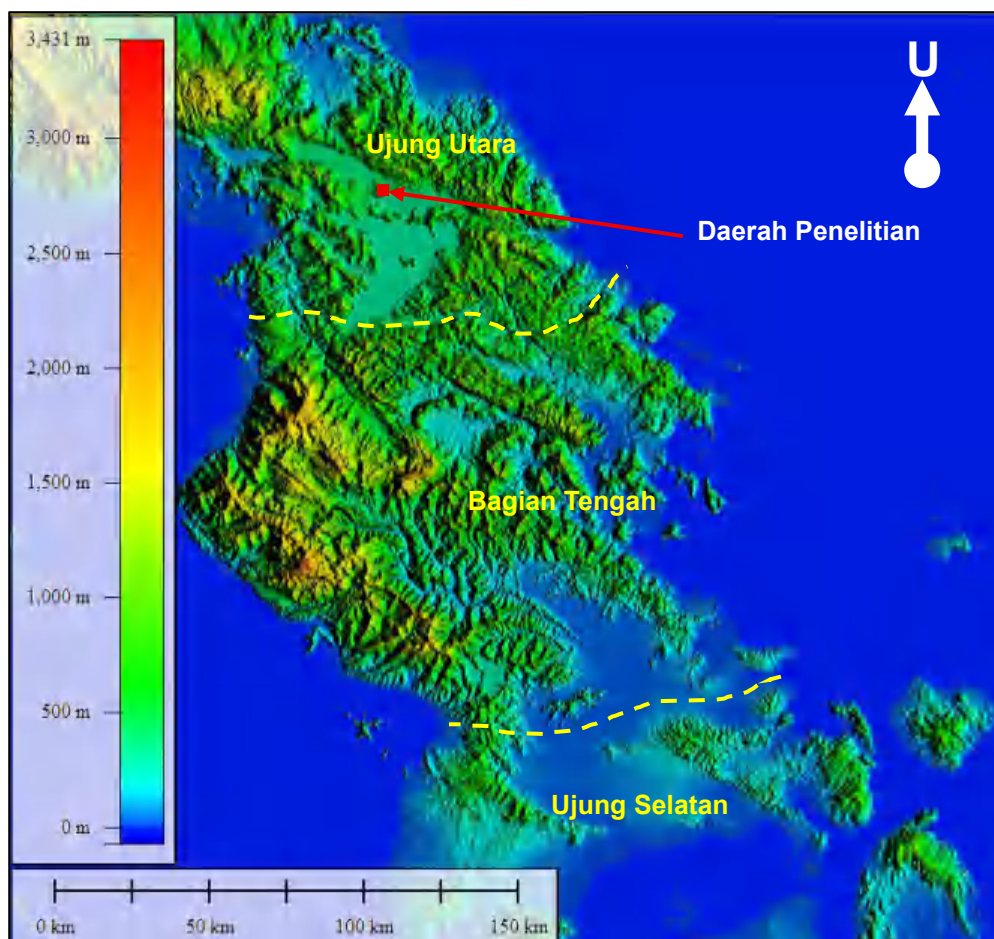
Secara morfologi, Geologi Lembar Malili pada wilayah ini dapat dibedakan menjadi empat satuan, yakni Daerah Pegunungan, Daerah Perbukitan, Daerah Kras, dan Daerah Pedataran. Daerah Pegunungan menempati area bagian barat dan tenggara pada lembar peta. Di sisi barat, terdapat dua sistem pegunungan utama yaitu Pegunungan Tineba dan Pegunungan Koro-Ue yang memanjang dari arah barat laut ke tenggara, dengan elevasi berkisar antara 700 hingga 3016 meter di atas permukaan laut, dan terbentuk oleh batuan granit serta malihan.

Sementara itu, di bagian tenggara lembar peta terdapat Pegunungan Verbeek dengan ketinggian antara 800–1346 meter di atas permukaan laut yang tersusun dari batuan ultramafik dan batugamping. Beberapa puncak penting di antaranya adalah G. Baliase (3016 m), G. Tambake (1838 m), Bulu Nowinokel (1700 m), G. Kaungabu (1760 m), Bulu Taipa (1346 m), Bulu Ladu (1274 m), Bulu Burangga (1032 m), dan Bulu Lingke (1209 m). Sungai-sungai utama yang mengalir di wilayah ini meliputi S. Kataena, S. Pincara, S. Rongkong, S. Larona, dan S. Malili, dengan pola aliran dendritik.

Daerah Perbukitan berada di bagian tengah hingga timur laut lembar peta, dengan elevasi antara 200–700 meter di atas permukaan laut. Kawasan ini merupakan perbukitan berlereng landai yang berada di antara satuan pegunungan dan pedataran. Secara litologi, perbukitan ini terdiri atas batuan vulkanik, ultramafik, dan batupasir. Beberapa puncak yang menonjol di antaranya adalah Bulu Tiruan (630 m), Bulu Tambunana (477 m), dan Bulu Bukila (645 m).

Sungai-sungai yang berhulu di kawasan pegunungan mengalir melewati zona ini menuju daerah pedataran dan selanjutnya bermuara ke Teluk Bone. Pola aliran sungainya umumnya dendritik. Daerah Kras menempati bagian timur laut lembar peta dan memiliki ketinggian antara 800–1700 meter di atas permukaan laut, serta tersusun oleh batugamping. Ciri khas morfologi daerah ini ditunjukkan dengan keberadaan dolina, sinkhole, serta sungai bawah tanah. Beberapa puncak yang tinggi di kawasan ini adalah Butu Wasopute (1768 m) dan Pegunungan Toruke Empenai (1185 m). Daerah Pedataran berada di sisi selatan lembar peta, membentang dari wilayah utara Palopo, Sabbang, Masamba, hingga Bone-Bone. Wilayah ini umumnya memiliki ketinggian hanya beberapa meter di atas permukaan laut dan tersusun oleh endapan aluvium. Satuan ini merupakan zona pemukiman dan pertanian yang cukup produktif. Sungai-sungai yang mengalir di area ini antara lain S. Pampengan, S. Rongkong, dan S. Kebu, yang menunjukkan pola berkelok. Selain itu, pola aliran subdendritik disertai keberadaan air terjun pada beberapa lokasi khususnya di area pegunungan, memperlihatkan karakteristik aliran air yang ri luasnya dataran di bagian selatan dan keberadaan sungai, maka area ini memperlihatkan ciri morfologi dewasa. Menurut (S. Pampengan, S. Rongkong, dan S. Kebu), Lengan Tenggara Sulawesi dibagi menjadi tiga bagian besar, bagian tengah, dan ujung selatan (Gambar 3).





**Gambar 3.** Kenampakan Fisiografi Lengan Tenggara Sulawesi Berdasarkan Data SRTM 1 *arc-second* (SRTM Plus v3) sebagai hasil modifikasi dalam menggambarkan pembagian Lengan Tenggara Sulawesi berdasarkan Van Bemmelen (1949). Sumber: Dimodifikasi penulis setelah Van Bemmelen (1949).

## 2. Stratigrafi Regional

Secara regional, berdasarkan litologi, struktur, dan biostratigrafi, Lembar Malili termasuk ke dalam dua mendala geologi utama, yaitu Mendala Geologi Sulawesi Timur dan Mendala Geologi Sulawesi Barat, yang dipisahkan oleh Sesar Palu Koro yang berarah hampir utara-selatan. Wilayah Mendala Geologi Sulawesi Timur dibagi menjadi dua bagian (sub-mendala), yaitu lajur batuan malihan dan lajur ofiolit Sulawesi Timur yang berarah hampir utara-selatan. Mendala Geologi Sulawesi Barat adalah keberadaan lajur batuan ultramafik serta batuan sedimen pelagik berumur Neogen, intrusi berumur Neogen, dan sedimen flysch berumur Neogen yang didapatkan pada zona tepian benua (Paparan Sunda). Di bagian barat Sulawesi Timur, satuan batuan tertua terdiri atas kompleks ofiolit



yang mencakup ultramafik seperti harzburgit, dunit, piroksenit, wehrlit, dan serpentinit, serta secara lokal juga dijumpai batuan mafik seperti gabro dan basal. Usia batuan ini belum dapat ditentukan secara pasti, namun diperkirakan seumur dengan ofiolit lengan timur Sulawesi, yaitu Kapur hingga Awal Tersier (Simandjuntak, 1986).

Di sisi barat mendala ini terdapat lajur batuan metamorf, yaitu Kompleks Pompangeo, yang terdiri atas berbagai jenis sekis hijau seperti sekis mika, sekis hornblenda, sekis glaukofan, serta filit, batusabak, dan batugamping terdaunkan atau pualam, dengan kemunculan lokal breksi. Usia kompleks ini diperkirakan tidak lebih tua dari Kapur. Di atas satuan ofiolit tersebut, secara tak selaras diendapkan Formasi Matano. Bagian atas formasi ini terdiri dari batugamping kalsilit, rijang radiolaria, argilit, dan batulempung napalan, sementara bagian bawahnya berupa rijang radiolaria yang bersisipan dengan kalsilit yang jumlahnya makin meningkat ke arah atas. Berdasarkan kandungan fosil, formasi ini diperkirakan berumur Kapur.

Wilayah ini juga menunjukkan keberadaan kompleks melange Wasuponda, yang tersusun atas fragmen batuan asing (*exotic blocks*) seperti batuan mafik, serpentinit, pikrit, rijang, batugamping terdaunkan, sekis, amfibolit, dan eklogit dengan ukuran bervariasi, tertanam dalam massa dasar lempung merah bersisik. Batuan tektonik ini banyak tersingkap di sekitar Wasuponda, serta di wilayah Ensa, Koro Mudi, dan Petumbea, dan diduga terbentuk sebelum Zaman Tersier. Pada Miosen Akhir, di atas satuan tersebut diendapkan secara tak selaras satuan sedimen pasca-orogena Neogen, yang dikenal sebagai Kelompok Molasa Sulawesi. Kelompok ini mencakup dua formasi utama, yaitu: Formasi Tomata: tersusun atas klastika halus hingga kasar dan Formasi Larona: didominasi oleh klastika kasar, yang diendapkan di lingkungan laut dangkal hingga darat. Proses pengendapan kelompok ini terus berlangsung hingga Kala Pliosen.

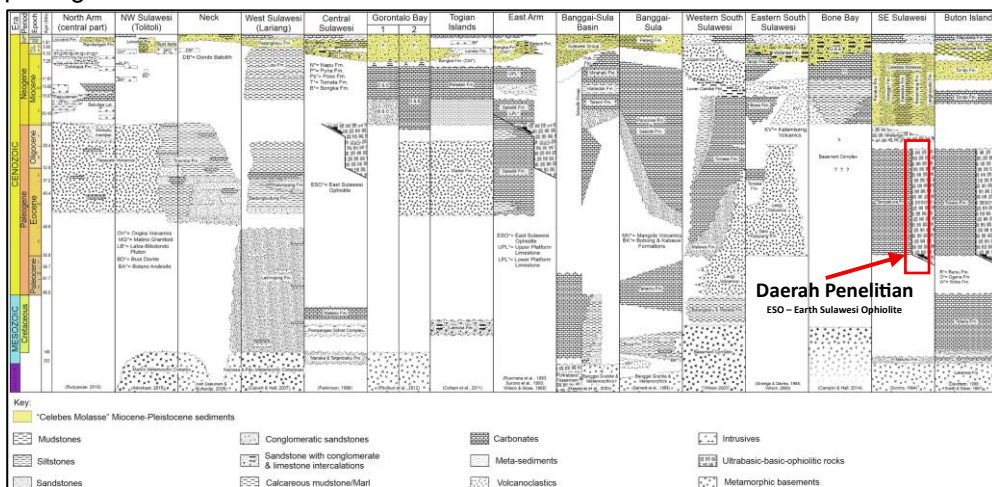
Pada bagian Mendala Geologi Sulawesi Barat, satuan batuan tertuanya adalah Formasi Latimojong, yang diduga berumur Kapur Akhir dan terdiri atas deret flysch, yaitu perselingan antara argilit, filit, batusabak, dan wake, disisipi rijang radiolaria serta konglomerat. Batuan ini dipercaya diendapkan pada lingkungan tepi Paparan Sunda. Di atasnya secara tak selaras diendapkan Formasi Toraja, yang terdiri atas serpih, batugamping, batupasir, dan konglomerat, dengan umur yang bervariasi dari Eosen hingga Miosen Tengah (Djuri & Sudjarmiko, 1974).

Selama Kala Oligosen, berlangsung aktivitas gunungapi bawah laut, menghasilkan lava bantal dan breksi gunungapi dengan komposisi basa hingga menengah, yang membentuk satuan Batuan Gunungapi Lamasi. Kegiatan vulkanik ini berlanjut hingga Miosen Tengah, membentuk satuan Batuan Gunungapi Tineba bagian di antaranya sudah terangkat ke permukaan laut.



secara tak selaras diendapkan Formasi Bone-bone yang terdiri dari serpih serta perselingan antara konglomerat dan klastika halus, dengan fosil foraminifera kecil, yang menandakan umur Miosen Akhir. Kegiatan gunungapi berlanjut lagi pada Plio-Plistosen hingga Miosen Akhir dengan lava dan piroklastika berkomposisi andesit, yang dikenal sebagai satuan Batuan Gunungapi Masamba. Selain itu, terdapat dua jenis batuan

terobosan granit yang berbeda umur: satu berumur Miosen Akhir, dan satu lagi Pliosen. Granit yang lebih muda tersebar cukup luas di bagian barat laut lembar peta, sementara granit Miosen Akhir di sekitar Palopo menerobos Formasi Latimojong dan Formasi Toraja, menghasilkan alterasi dan mineralisasi hidrotermal. Satuan paling muda di wilayah ini adalah aluvium, berupa endapan sungai, danau, dan pantai yang tersebar luas di bagian utara Teluk Bone dan selatan Danau Poso. Visualisasi stratigrafi lengkap dari lengan timur Sulawesi di sekitar lokasi penelitian dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.** Kompilasi stratigrafi Sulawesi dan variasi umur pengendapan *Celebes Molasse*.  
 Sumber: Nugraha *et al.* (2022).

**Lajur Ofiolit Sulawesi Timur (Earth Sulawesi Ophiolite)**  
**Batuan Beku**

MTos **Batuan Ultramafik:** harzburgit, lherzolit, wehrlit, websterit, serpentin dan dunit.

Harzburgit berwarna hijau hingga kehitaman, memiliki tekstur holokristalin, padat, dan kompak. Ukuran mineral bervariasi dari halus hingga kasar, dengan komposisi utama berupa olivin (60%) dan piroksen (40%). Di sejumlah lokasi dijumpai struktur *intergranular*. Proses re-kristalisasi pada piroksen dan olivin menunjukkan batas antar kristal yang saling mengunci atau bergerigi.

Lherzolit, hijau kehitaman; hotokristalin, padu dan pejal. Mineral penyusunnya ialah olivin (45%), piroksen (25%), dan sisanya epidot, yakut, klorit dan bijih dengan lus sampai kasar.

at padu dan pejal; kehitaman; bertekstur afanitik. Batuan ini olivin, serpentin, piroksen dan iddingsit. Serpentin dan iddingsit bjabahan olivin.

u kehitaman; holokristalin, padu dan pejal. Batuan ini tersusun piroksen dengan ukuran kristal halus hingga sedang, serta mineral serpentin, klorit, dan serisit yang memiliki kilap tinggi.





- 1) Lipatan terbuka (lemah) – terbentuk pada batuan berumur Miosen hingga Plistosen. Lapisan memiliki kemiringan landai, umumnya kurang dari  $30^\circ$ , dengan sumbu lipatan berarah barat daya – timur laut dan pola bergelombang.
- 2) Lipatan tertutup – terbentuk dalam batuan sedimen Mesozoikum, ditandai oleh kemiringan lapisan yang curam ( $50^\circ$  hingga tegak), termasuk lipatan simetris maupun tidak simetris, bahkan dalam beberapa kasus terbalik. Umumnya memiliki sumbu berarah utara – selatan, dan diperkirakan terbentuk pada Oligosen atau lebih tua.
- 3) Lipatan tumpang tindih – berkembang pada batuan sedimen Mesozoikum, batuan malihan, dan di beberapa lokasi pada serpentin yang terdaunkan. Hubungan antar lipatan menunjukkan superposisi deformasi, di mana lipatan awal ( $f_1$ ) berimpit atau dipotong oleh lipatan kedua ( $f_2$ ) yang terbentuk pada Miosen Tengah. Deformasi lanjutan pada Plio–Plistosen menghasilkan lipatan tahap ketiga ( $f_3$ ) yang memiliki sumbu berarah barat laut – tenggara, searah dengan lipatan dalam batuan sedimen muda. Lipatan megaskopis ini banyak ditemukan pada batuan malihan dan serpentin terdaunkan.

Kekar berkembang luas dalam hampir seluruh satuan batuan, dan terbentuk dalam beberapa periode tektonik berbeda. Pola dan arah kekar bervariasi tergantung pada jenisnya: ac, b, maupun diagonal. Perkembangan struktur dan sedimentasi di wilayah ini memiliki keterkaitan erat dengan dinamika tektonik Mendala Banggai-Sula, yang telah mengalami penerobosan kerak benua sejak akhir Paleozoikum.

- Pada Trias, Formasi Tokala diendapkan di lingkungan tepi paparan.
- Di akhir Trias, terjadi rifting pada pinggiran benua yang diikuti oleh pengendapan Formasi Batebeta secara selaras pada awal Jura.
- Selanjutnya, pada Zaman Jura, Formasi Nanaka diendapkan secara tidak selaras di atas batuan yang lebih tua dalam lingkungan transisi darat – laut dangkal. Sementara di lingkungan neritik luar, diendapkan Formasi Tetambahu dan Formasi Masiku, yang berkembang dari akhir Jura hingga permulaan Kapur.

Ketiga satuan ini terbentuk di pinggiran benua aktif yang kini menjadi bagian dari Mendala Banggai–Sula, dan seluruhnya tersingkap di Lembar Bungku (Simandjuntak et al., 1981) yang berada di timur Lembar Malili. Pada Zaman Kapur, di bagian barat wilayah ini, terjadi proses pemekaran dasar samudera yang membentuk kerak samudera. Kerak ini kemudian menjadi bagian dari Lajur Ofiolit Sulawesi Timur. Proses pengendapan sedimen pelagos di atas kerak tersebut berlangsung hingga Kapur Akhir, dan menghasilkan Formasi Matano. Menjelang peng samudera menunjam ke arah barat, ke bawah pinggiran a busur gunungapi. Proses subduksi ini kini tercermin oleh s batuan banchu di Wasuponda (Simandjuntak, 1980).

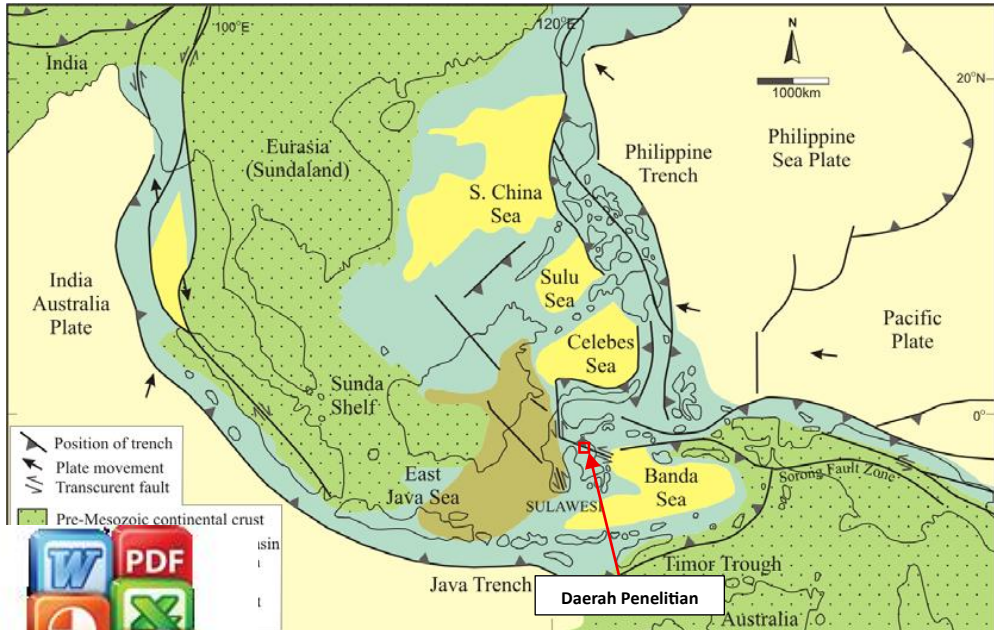
t dari zona penunjaman tersebut, endapan *flysch* dari Formasi pada Kapur Atas, dan diikuti oleh pengendapan Formasi Toraja aktivitas gunungapi bawah laut pada Oligosen, yang



menghasilkan Vulkanik Lamasi. Kegiatan ini berlanjut hingga Miosen, membentuk Vulkanik Rampi dan Tineba. Satuan-satuan ini kini termasuk ke dalam Mendala Sulawesi Barat. Selama Paleogen, Formasi Larca (karbonat) diendapkan dalam lingkungan busur laut dangkal, dan kemudian diikuti oleh Formasi Takaluku pada Miosen Tengah.

Pada Oligosen, Sesar Sorong mulai aktif sebagai sesar geser (transcurrent) dan menerus ke arah Sesar Matano dan Sesar Palu–Koro. Aktivasi sesar ini mengakibatkan blok Banggai–Sula bergerak ke arah barat dan memisahkan diri dari benua Australia. Selanjutnya, pada Miosen Tengah, bagian timur kerak samudera Mendala Sulawesi Timur mengalami obduksi ke atas platform Banggai–Sula yang telah bergeser ke barat. Di bagian barat, zona penunjaman dan busur luar kemudian tersesarsungkupkan di atas zona *fore-arc basin* dan busur gunungapi, menyebabkan saling bertemunya tiga mendala geologi tersebut.

Pada Akhir Miosen hingga Pliosen, terjadi pengendapan batuan klastika dari Kelompok Molasa Sulawesi (contohnya Formasi Tomata, Formasi Bone-Bone) dalam lingkungan laut terbuka hingga darat, bersamaan dengan intrusi granit di bagian barat. Memasuki Plio–Plistosen, wilayah ini mengalami deformasi tektonik besar-besaran. Intrusi granitik berlanjut di Mendala Sulawesi Barat dan diikuti oleh proses perlipatan dan penyesaran blok, yang menghasilkan cekungan-cekungan kecil dan dangkal, beberapa di antaranya tertutup. Di dalamnya, terendapkan batuan klastika kasar, sedangkan endapan aluvium, danau, sungai, dan pantai terus terbentuk hingga masa kini.



Struktur tektonik regional Pulau Sulawesi.  
 (dari van der Pluijm & Pieters (2011) dimodifikasi penulis).



## 1.2.2 Batuan Ultramafik

Batuan ultramafik merupakan salah satu komponen utama penyusun mantel atas bumi yang terletak di bawah kerak benua maupun kerak samudera (Kadariusman, 2009). Secara umum, batuan beku ultramafik didefinisikan sebagai batuan yang memiliki kandungan  $\text{SiO}_2$  kurang dari 45%. Komposisi mineral dari batuan ini didominasi oleh mineral berat yang mengandung unsur-unsur seperti Fe, Co, dan Mn.

Terdapat perbedaan pemaknaan antara istilah "ultramafik" dan "ultrabasa". Istilah batuan ultrabasa digunakan untuk menjelaskan jenis batuan berdasarkan kandungan geokimia, terutama yang mengandung silika dalam jumlah sangat rendah dan cenderung tidak mengandung mineral ferromagnesian. Mineral ferromagnesian sendiri dikenali melalui warna gelapnya, dan biasanya mengandung Fe serta Mg sebagai unsur dominan. Apabila kandungan Fe dan Mg dalam suatu batuan sangat rendah, hal tersebut menunjukkan bahwa batuan tersebut lebih didominasi oleh mineral silika seperti feldspar, feldspathoid, dan muskovit (Ahmad, 2006).

Mineral utama penyusun batuan ultramafik meliputi olivin, piroksen, dan amfibol, yang umumnya berwarna gelap ketika masih dalam kondisi segar. Ketika mineral-mineral primer ini mengalami dekomposisi, akan terbentuk larutan unsur-unsur terlarut yang kemudian mengendap pada lokasi tertentu. Proses pelapukan ini berlangsung secara dinamis dan lambat, sehingga dapat membentuk profil laterit yang mencerminkan urutan tahapan laterisasi (Hasria et al., 2020).

Mineral mafik merupakan kelompok mineral yang terdiri dari olivin, ortopiroksen, klinopiroksen, biotit, hornblenda/amfibol, kromit, turmalin, besi oksida, serta dalam jumlah kecil garnet dan spinel, dengan kemungkinan terdapat biotit pula. Oleh karena itu, diketahui bahwa sebagian besar batuan ultramafik tergolong juga sebagai batuan ultrabasa. Namun, tidak semua batuan ultrabasa dapat dikategorikan sebagai batuan ultramafik. Misalnya, batuan piroksenit, meskipun memiliki kandungan silika yang mencapai sekitar 60%, tetap diklasifikasikan sebagai batuan ultramafik karena komposisinya didominasi oleh mineral piroksen.

**Tabel 1.** Perbandingan Batuan Ultramafik dan Batuan Ultrabasa.

	<b>Ultramafic rock (Mafics &gt; 70%)</b>	<b>Ultrabasic rock (Silica &lt; 45%)</b>
<i>Dunite</i>	Yes, mafics 100%	Yes, silica = 43%
<i>Serpentinite</i>	Yes, mafics 100%	Yes, silica = 43%
<i>Harzburgite</i> (50% olivine, 50% enstatite)	Yes, mafics 100%	No, silica = 51%
<i>tatite)</i>	Yes, mafics 100%	No, silica = 60%
	No, mafics <10%	Yes, silica = 43%

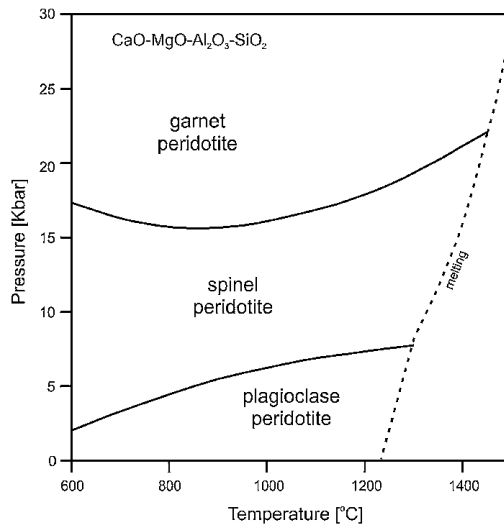
9).



Beberapa mineral dominan yang umum ditemukan dalam batuan ultramafik antara lain dijelaskan oleh McDonough dan Rudnick (1998), yaitu:

#### 1. Olivin

Mineral olivin dalam batuan ultramafik umumnya tersusun terutama oleh forsterit ( $Mg_2SiO_4$ ). Kandungan forsterit dalam olivin umumnya berkisar antara 90% hingga 92%, bahkan dapat mencapai hingga 94%, sedangkan sisanya biasanya terdiri atas fayalit ( $Fe_2SiO_4$ ). Dalam batuan peridotit, olivin umumnya mengandung unsur kalsium (Ca) dalam jumlah antara beberapa ratus hingga seribu ppm. Hubungan pertukaran Ca antara klinopiroksen dan olivin digunakan sebagai indikator tekanan atau geobarometer, terutama pada fasies spinel peridotit (lihat Gambar 6), karena jenis batuan ini dianggap memiliki respons yang rendah terhadap variasi tekanan.



**Gambar 6.** Batas-batas antara bidang plagioklas, spinel, dan peridotit garnet dalam sistem  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  dari Gasparik (1984). Garis putus-putus, yang menunjukkan temperatur minimum peleburan, berasal dari Dixon (1980) dan Presnall (1976).

#### 2. Ortopiroksen

Kadar alumina dalam mineral ortopiroksen pada fasies peridotit garnet (lihat Gambar 6) umumnya rendah dan bervariasi. Ortopiroksen dalam fasies ini sering digunakan sebagai indikator untuk memperkirakan tekanan saat pembentukan batuan. Kandungan CaO pada ortopiroksen secara umum cukup bervariasi dan dapat merefleksikan komposisi kimia dari peridotit yang



umina dari ortopiroksen pada fasies peridotit garnet (lihat Gambar 6) umumnya rendah dan bervariasi, biasanya ortopiroksen pada fasies ini sering digunakan untuk memperkirakan tekanan pembentukannya. Secara umum, kandungan kalsium pada ortopiroksen sangat bervariasi dan umumnya digunakan untuk memperkirakan komposisi kimia dari peridotit yang

mengetahui suhu pembentukan, sedangkan kandungan  $\text{Na}_2\text{O}$  dan  $\text{TiO}_2$  dapat mencerminkan komposisi dari peridotit tersebut.

### 3. Klinopiroksen

Konsentrasi alumina pada klinopiroksen dalam fasies peridotit garnet (lihat Gambar 6) umumnya juga menunjukkan nilai yang rendah dan bervariasi. Sama seperti ortopiroksen, kandungan alumina pada klinopiroksen digunakan sebagai penunjuk tekanan saat pembentukan batuan. Sementara itu, kadar  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dalam klinopiroksen biasanya tinggi.

### 4. Spinel

Mineral spinel dapat merujuk pada satu jenis mineral spesifik atau pada kelompok mineral. Kelompok ini mencakup spinel ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), hercynit ( $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ), magnesio-kromit ( $\text{MgCr}_2\text{O}_4$ ), dan kromit ( $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ ). Secara umum, lherzolit mengandung spinel dengan kandungan Al yang tinggi dan Cr yang rendah. Sebaliknya, pada harzburgit, kandungan Al biasanya rendah, sedangkan Cr cenderung lebih tinggi.

### 5. Plagioklas

Dalam peridotit, mineral plagioklas umumnya didominasi oleh anorthit ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). Proporsi anorthit pada plagioklas dalam peridotit (lihat Gambar 6) berkisar antara 50–80%, sedangkan sisanya berupa albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). Plagioklas juga kerap dijumpai sebagai mineral sekunder dalam xenolith peridotit, yang umumnya menunjukkan sifat komposisi basa. Keberadaan Na yang relatif tinggi dihubungkan dengan potensi pembentukan mineral amfibol.

## 1.2.3 Endapan Laterit

Nikel laterit terbentuk sebagai hasil residu dari pelapukan kimia pada batuan ultramafik kaya olivin maupun turunan batuan metamorfnya yang memiliki kadar nikel awal berkisar antara 0,2 – 0,4%. Ciri utama dari endapan nikel laterit, termasuk kadar, tonase, dan mineraloginya, ditentukan oleh pengaruh gabungan antara faktor geologi dan iklim, seperti riwayat geomorfologi, pola drainase, struktur geologi, dan litologi. Faktor-faktor ini saling berinteraksi dalam suatu sistem yang dinamis, yang memungkinkan konsentrasi nikel terjadi di dalam regolith (Brand, 1998).

Proses terbentuknya endapan nikel laterit dipicu oleh kombinasi dari kondisi geologi, iklim, hidrologi, dan geomorfologi yang mendukung terjadinya laterisasi, khususnya pada batuan ultramafik. Jenis batuan penyusun juga berpengaruh, di mana batuan non ultramafik cenderung menghambat proses laterisasi, sehingga kandungan nikel yang terbentuk menjadi lebih rendah. Selain itu, kondisi struktural turut berperan penting dalam perkembangan lapisan limonit-saprolit (Adi Tonggihroh



t juga dikenal sebagai sumber dari berbagai mineral ekonomis (Ni), mangan (Mn), tembaga (Cu), emas (Au), dan *platinum*. Zona terdalam dari profil laterit dikenal sebagai zona saprolit, di mana dengan intensitas pelapukan tinggi, di mana tekstur primer batuan induk masih dapat dikenali. Karena pengaruh fluida yang asam, bagian bawah dari zona ini menunjukkan ketidakstabilan

sulfida dan karbonat, akibat proses pencucian atau leaching terhadap unsur-unsur logam jenis chalcophile dan unsur alkali. Zona saprolit juga dicirikan oleh pelapukan mineral seperti feldspar dan ferromagnesian, sementara unsur Si dan Al tetap terakumulasi dalam bentuk mineral lempung seperti kaolinit dan *halloysite* (Adi Maulana, 2017).

Meskipun tidak eksklusif, laterit umumnya berkembang di wilayah beriklim tropis dan subtropis. Endapan ini menyumbang lebih dari 70% total sumber daya nikel di daratan dunia, meskipun produksi tahunan nikel global dari laterit masih kurang dari 30%. Eksploitasi endapan laterit biasanya dilakukan melalui metode penambangan terbuka karena karakteristiknya yang bertonase besar. Inovasi dalam teknologi metalurgi dalam beberapa tahun terakhir telah meningkatkan potensi pemanfaatan sumber daya ini secara ekonomis. Sebagian besar endapan laterit dikembangkan pada batuan ultramafik yang miskin kandungan sulfida. Meski demikian, bagian atasnya berupa regolith, serta adanya sebaran nikel sulfida, menunjukkan bahwa beberapa lokasi memiliki potensi nikel yang tinggi, meskipun belum dimanfaatkan secara khusus untuk sumber daya lateritnya.

### 1. Karakteristik Nikel Laterit

Klasifikasi endapan nikel laterit dibedakan ke dalam beberapa tipe berdasarkan sejumlah faktor seperti jenis batuan induk, kondisi iklim, sistem drainase, riwayat geomorfologi, serta komposisi kimia. Menurut Brand (1998), terdapat tiga tipe utama endapan nikel laterit, yaitu:

- Tipe A: Merupakan endapan silikat nikel yang didominasi oleh silikat Mg-Ni terhidrasi seperti gamierite, dan umumnya terbentuk pada bagian bawah zona saprolit.
- Tipe B: Juga termasuk endapan silikat nikel, namun didominasi oleh lempung tipe smektit seperti nontronit. Tipe ini biasanya dijumpai di bagian atas saprolit atau pada zona pedolit.
- Tipe C: Merupakan endapan oksida, yang didominasi oleh Fe oxyhydroxides seperti goethite, dan biasanya berkembang di batas antara saprolit dan pedolit.

Secara global, endapan silikat Ni tipe A menyumbang sekitar 80% dari total sumber daya nikel laterit. Pada umumnya, endapan nikel laterit terdiri atas kombinasi bijih silikat dan oksida dalam berbagai proporsi. Keberadaan oksida mangan yang diperkaya oleh unsur Co dan Ni diduga terbentuk pada tahap akhir proses pelapukan dan dijumpai di hampir seluruh jenis deposit, meskipun kontribusinya terhadap total kadar nikel relatif kecil.



dari nikel laterit juga mempertimbangkan batuan induk, yang memiliki mineral-mineral pembawa ferromagnetisme, seperti olivin, kromit, dan magnetit, dalam jumlah besar. Mineral-mineral tersebut umumnya terkandung dalam struktur geologi tertentu. Nikel laterit sebagian besar berasal dari batuan ultramafik, khususnya yang kaya akan unsur nikel. Salah satu mineral pembawa nikel adalah peridotit.

Salah satu jenis batuan pembawa nikel lainnya:

- Dunit: Didominasi oleh kandungan olivin lebih dari 90%, dengan kandungan piroksen sekitar 5%.
- *High serpentized*: Mengandung sekitar 85% olivin dan 15% piroksen.
- *Low serpentized*: Memiliki sekitar 65% olivin dan 35% piroksen.
- *Serpentinite*: Terbentuk sebagai hasil dari proses serpentinisasi batuan peridotit akibat pengaruh aktivitas hidrotermal.

## 2. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan nikel laterit

### a. Suhu dan curah hujan

Suhu memiliki peran krusial dalam mempercepat laju pelapukan kimia. Berdasarkan hukum Van't Hoff (dalam Ahmad, 2009), setiap kenaikan suhu sebesar 10°C dapat mempercepat reaksi kimia hingga dua hingga tiga kali lipat. Oleh karena itu, wilayah tropis dengan suhu rata-rata di atas 20°C dianggap sangat mendukung proses pembentukan laterit (Ahmad, 2009).

Selain suhu, curah hujan juga berkontribusi signifikan dalam proses pelapukan kimia. Curah hujan menentukan jumlah air yang meresap ke dalam tanah, yang secara langsung memengaruhi tingkat pencucian (*leaching*). Tingkat curah hujan yang bervariasi akan menghasilkan tipe tanah laterit yang berbeda-beda (Ahmad, 2009). Di wilayah dengan iklim basah-kering yang tidak stabil, proses pencucian cenderung menghasilkan akumulasi magnesium dan silika dalam bentuk smektit atau nontronit. Sebaliknya, pencucian yang berlangsung secara konstan di iklim lembab akan mencegah terbentuknya mineral lempung tersebut.

### b. Topografi

Bentuk lahan dan kemiringan lereng sangat memengaruhi kondisi drainase, baik dalam hal infiltrasi air ke dalam tanah maupun kedalaman muka air tanah. Ahmad (2006) menyatakan bahwa pembentukan tanah laterit lebih optimal pada wilayah dengan topografi yang tidak terlalu curam. Relief dan topografi berperan dalam mengatur tingkat pelapukan serta akumulasi residu.

Selama proses lateritisasi, topografi juga berkontribusi terhadap terbentuknya morfologi unik, melalui pengaruhnya terhadap:

- Perbandingan limpasan dan infiltrasi air hujan ke dalam profil tanah. Pada lereng terjal, sebagian besar air hujan cenderung mengalir di permukaan dan hanya sedikit yang meresap, sehingga dominan terjadi pelapukan fisik dibanding pelapukan kimiawi. Sementara itu, pada lereng landai, infiltrasi air lebih memungkinkan, yang mendorong pelapukan kimia.



efektifitas drainase bawah permukaan. Daerah yang lebih tinggi dan lebih kering memiliki sistem drainase yang lebih baik, sehingga lebih efektif dalam mengurangi material terlarut dibandingkan dengan daerah yang datar atau lembab.

terhadap material pelapukan. Erosi yang tinggi akan terus-menerus menciptakan permukaan baru bagi pelapukan kimiawi namun juga akan mengurangi hasil pelapukan sebelumnya. Oleh karena itu, untuk

menjaga agar laterit tetap bertahan, umumnya diperlukan kemiringan lereng < 20° agar tidak terjadi erosi berlebihan.

Untuk menjaga stabilitas laterit, laju akumulasi residu harus lebih besar dibandingkan laju erosi alami. Hubungan antara topografi dan efisiensi pembentukan atau pemindahan laterit dapat dilihat pada tabel yang menjelaskan pengaruh kualitatif dari berbagai tingkat kemiringan lereng.

**Tabel 2.** Keseimbangan antara pembentukan laterit dan erosi laterit.

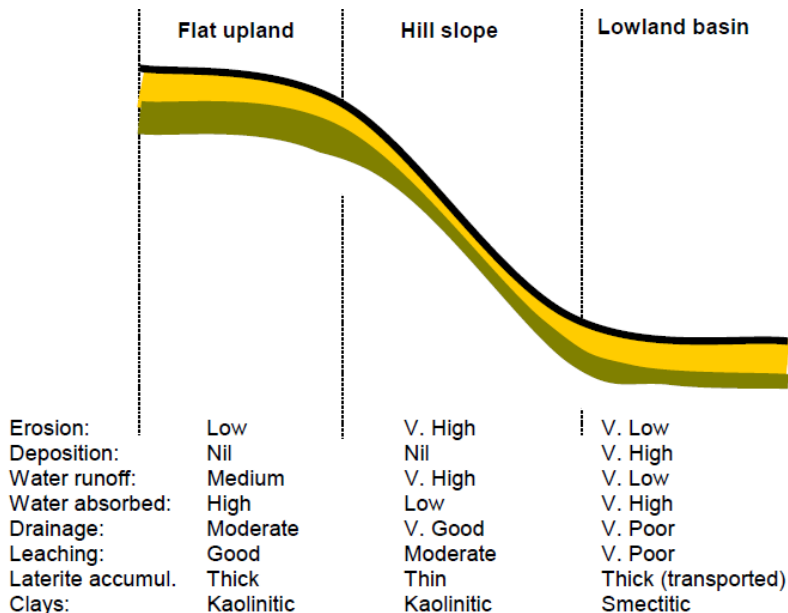
Proses	Dataran atas (datar)	Lereng sangat curam	Lereng landai	Dataran bawah (datar)
Penyerapan air hujan	Tinggi	Sangat sedikit	Sedang	Tinggi
Pengangkutan material terlarut	Sedang	Rendah, karena penyerapan air hujan rendah	Sangat baik	Rendah, karena drainase buruk
Erosi residu	Rendah	Sangat tinggi	Sedang	Sangat rendah
Akumulasi residu in situ	Tinggi, karena pembentukan laterit tinggi dan erosi rendah	Rendah (tingkat pembentukan rendah; tingkat pengangkutan tinggi)	Rendah hingga sedang (tingkat pembentukan tinggi; tingkat pengangkutan sedang)	Tinggi (tingkat pembentukan rendah; tingkat pengangkutan rendah; tingkat pengendapan tinggi)
Akumulasi laterit terangkut	Nihil	Nihil	Pergerakan tanah dapat menebalkan kaki lereng	Sangat signifikan

Sumber: Ahmad (2009).

Kondisi optimal untuk terjadinya pelapukan kimia biasanya ditemukan pada wilayah dengan lereng landai hingga bergelombang (*rolling to gently sloping lands*), di mana limpasan air permukaan tidak berlebihan dan drainase bawah permukaan berlangsung secara efektif. Pengayaan nikel secara supergen yang tinggi memerlukan pergerakan air tanah yang membawa larutan nikel menuju ke bawah jika air tanah yang sangat dalam. Sebaliknya, daerah datar yang tinggi umumnya tidak menunjukkan pengayaan nikel signifikan pada zona saprolit. Topografi dan laju pelapukan kimia penting dalam mengontrol ketebalan profil laterit, yang seimbang antara pembentukan lapisan baru di bagian bawah pisan tua di bagian atas (Ahmad, 2009).



Sebagian besar endapan laterit di dunia berkembang pada wilayah yang telah mengalami proses peneplain secara ekstensif. Contoh lokasi tersebut antara lain *Pinares de Mayari, Moa, dan Nicaro* di Kuba, *Goro* di New Caledonia, serta endapan laterit di wilayah *Lakes Area, Sulawesi Tengah*.



**Gambar 7.** Diagram gabungan dari topografi laterit.  
Sumber: Ahmad (2009).

Proses lateritisasi secara umum menyebabkan terbentuknya berbagai bentuk alam khas, sebagaimana dijelaskan dalam (Gambar 8). Beberapa bentuk morfologi yang umum ditemukan pada wilayah laterit meliputi:

- Mesa, yakni bentuk dataran tinggi dengan lapisan laterit datar yang menonjol di atas topografi sekitarnya.
- Pedimen laterit, merupakan dataran landai yang biasanya terletak di antara daerah pegunungan dan cekungan.
- *Iron cap* dan *iron shot*, yaitu bentukan hasil indurasi, berupa endapan residu hidroksida besi yang terbentuk di lingkungan rawa datar.
- Topografi karst, berkembang akibat erosi bawah permukaan oleh air tanah di bawah *iron cap*, yang dapat menyebabkan runtuhnya atap dan membentuk lubang runtuh serta cekungan karst.





**Gambar 8.** Bentanglahan Laterit Sederhana.  
Sumber: Ahmad (2009).

### c. Kondisi pH

Menurut Ahmad (2009), mineral cenderung lebih mudah larut pada lingkungan dengan pH rendah dan berair. Oleh sebab itu, keberadaan air dengan sifat sedikit asam dapat mempercepat terjadinya pelapukan kimiawi pada batuan. Air asam banyak yang terbentuk pada iklim tropis basah melalui hujan asam alami. Adapun kondisi *acidity/basicity* (pH), yaitu :

- pH air tanah memiliki pengaruh yang kuat terhadap larutan berbagai material.
- Nilai pH perairan alami biasanya berada di antara 4 dan 9. Ion hidrogen berasal dari hujan dan juga dari pembusukan bahan organik yang ada di dalam tanah. pH air hujan dapat bervariasi dari 3,0 hingga 9,8 tetapi sebagian besar berada di antara 5,5 dan 6,2. Air murni dalam kesetimbangan dengan CO<sub>2</sub> atmosfer harus memiliki pH 5,7.
- Sebagian besar oksida menunjukkan kelarutan dalam air alami.
- Oksida kalsium, magnesium, natrium dan kalium benar-benar larut dalam air alami.



ium, aluminium, dan besi besi sama sekali tidak larut dalam air

ium, aluminium, dan besi besi sama sekali tidak larut dalam air

anyak oksida tergantung pada pH dan berubah pada tingkat pH tinggi atau lebih rendah (oksida titanium, kalsium, dan *ferrous*

- Alumina tidak larut dalam kisaran pH air tanah yang normal. Namun, pada nilai pH di bawah 4 dan di atas 10, alumina dapat larut.
- Di mana bahan organik yang melimpah tersedia, nilai pH dapat turun di bawah 4. Akar tanaman membawa nilai pH yang sangat rendah, yaitu 4 hingga 2.
- Di mana terdapat banyak mineral dasar yang mengalami pelapukan (olivin, piroksen, nepheline), kondisi pH dapat naik hingga melebihi 9.

#### d. Tektonik

Aktivitas tektonik dapat menyebabkan pengangkatan batuan ultramafik (seperti peridotit dan serpentinit) ke permukaan, yang merupakan batuan sumber utama dalam pembentukan endapan nikel laterit. Tanpa pengangkatan ini, batuan ultramafik mungkin tetap berada di kedalaman dan tidak mengalami pelapukan intensif yang diperlukan untuk laterisasi. Struktur sesar dan rekahan yang terbentuk akibat deformasi tektonik dapat menjadi jalur infiltrasi dan sirkulasi air tanah, yang mempercepat proses pelapukan dan pencucian unsur-unsur tertentu. Ini dapat memengaruhi distribusi vertikal dan horizontal nikel dalam profil laterit.

#### e. Struktur Geologi

Pola sesar dan pelengkungan akibat tektonik membentuk pola aliran sungai dan drainase permukaan, yang pada akhirnya memengaruhi redoks lingkungan, pH, dan kondisi drainase, semua faktor penting dalam kontrol mineralogi dan kadar nikel dalam endapan laterit. Kehadiran sesar dan rekahan menjadikan batuan bersifat permeabel. Adanya kekar serta bidang belahan semakin mempermudah infiltrasi air ke dalam batuan. Air yang masuk ini akan bereaksi dengan mineral penyusun batuan dan memicu proses pelapukan. Oleh karena itu, suatu wilayah dengan intensitas struktur geologi yang tinggi akan menyebabkan batuan di wilayah tersebut lebih rentan mengalami pelapukan. Dengan demikian, keberadaan struktur geologi berperan penting dalam mempercepat pelapukan kimiawi serta proses lateritisasi.

#### f. Jenis Batuan Asal

Menurut Ahmad (2009), laterit Ni-Fe dapat terbentuk pada batuan yang memiliki kandungan mineral ferromagnesian dalam jumlah yang memadai. Oleh karena itu, batuan ultramafik dianggap sebagai batuan yang paling sesuai dalam pembentukan laterit Ni-Fe karena didominasi oleh mineral ferromagnesian dalam proporsi yang tinggi.



#### terit

ad (2009), pelapukan kimiawi pada batuan ultramafik nya fraksinasi unsur-unsur menjadi dua kelompok, yaitu unsur dan unsur yang tidak larut dalam air. Unsur-unsur yang larut proses leaching dan terangkut keluar dari sistem pelapukan, unsur yang tidak larut akan tertinggal, membentuk residu

pengayaan. Pelapukan kimiawi ini kemudian menghasilkan pembentukan profil laterit yang berlapis, di mana laterit yang lebih muda terletak di bagian bawah, dan laterit yang lebih tua berada di bagian atas. Stratifikasi pada profil pelapukan laterit sebagian besar dikontrol oleh keberadaan air, baik karena pergerakan air ke bawah maupun akibat perubahan muka air tanah (*water table*). Oleh karena itu, tanpa peran dan ketersediaan air, stratifikasi dalam profil laterit tidak akan terbentuk.

Secara garis besar, profil laterit dapat dibagi menjadi:

- a. Zona *Ferruginous* di bagian atas
- b. Zona *Intermediate Clay*
- c. Zona Saprolit
- d. Zona *bedrock* di bagian bawah

Zona peralihan sebagian besar dikembangkan di daerah beriklim basah-kering. Selama bertahun-tahun, profil laterit telah dijelaskan oleh para peneliti dengan beberapa cara dan sejumlah terminologi telah digunakan untuk berbagai bagian dari profil. Hal ini menyebabkan kebingungan yang cukup besar di antara para siswa yang tidak sepenuhnya memahami sejarah penelitian laterit dan arti yang tepat dari setiap istilah dalam konteks di mana istilah tersebut digunakan oleh peneliti. Untuk mempermudah, daftar istilah yang umum digunakan tercantum pada tabel berikut ini dengan pilihan istilah yang lebih disukai yang dicetak tebal. Beberapa dari istilah-istilah tersebut diambil dari Tabel A3-1 dari buku CRM Butt dan H. Zeegers, Buku Pegangan Geokimia Eksplorasi:

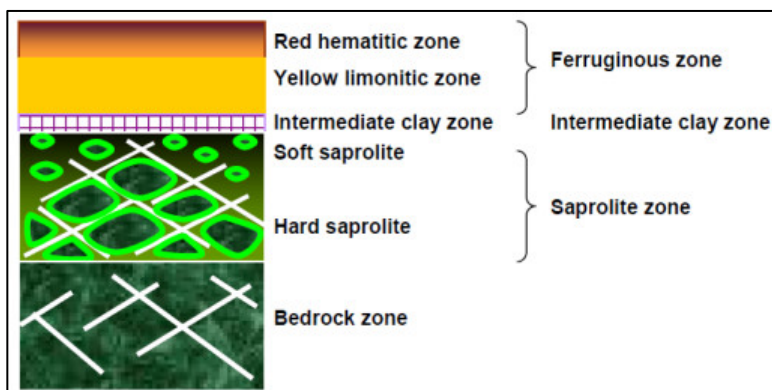
**Tabel 3.** Istilah Umum yang digunakan pada profil laterit.

Divisi Primer	Karakteristik	Subdivisi Sekunder	Karakteristik
Lapisan Silika		<i>Silcrete, Siliceous duricrust</i>	
Zona Feruginous	Zona yang diperkaya dengan seskuioksida besi dan aluminium	<i>Iron cap, Iron crust, Iron shot, Ferricrete, Ferricrust, Cuirasse, Canga, Indurated iron crust, Lateritic gravel, Conglomeratic iron crust, Lateritic ironstone, Pisolitic/nodular laterite, Pebbly layer</i>	Pelarutan besi dan pengendapan ulang sebagai material terindurasi (padat atau terfragmentasi)
		Zona Hematit: <i>Laterite rouge</i>	Warna coklat tua ke merah kecoklatan
		Zona Limonit: <i>Laterite jaune</i>	Warna coklat kekuningan



Zona Intermediate	Didominasi oleh kemunculan berbagai jenis lempung	<i>Transition zone, Mottled zone, Clay zone, Plasmic horizon, Arenose horizon, Argiles tachetées</i> (lempung belang)	
Zona Saprolit	Zona batuan terlapuk	Saprolit Lunak: <i>Fine saprolite, Lithomarge, Argile bariolées</i> (bercorak)	Tahap pelapukan batuan yang lebih lanjut
		Saprolit Keras: <i>Coarse saprolite, Saprock, Altération pistache, Arène</i> (berbutir), <i>Grus</i> (granit lapuk)	Tahap pelapukan batuan yang kurang lanjut
Batuan Induk	Zona batuan asli sebelum pelapukan	<i>Fresh bedrock, Unweathered rock, Roche mere</i>	

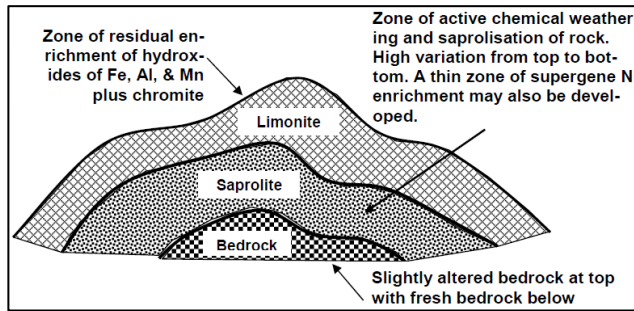
Sumber: Ahmad (2009).



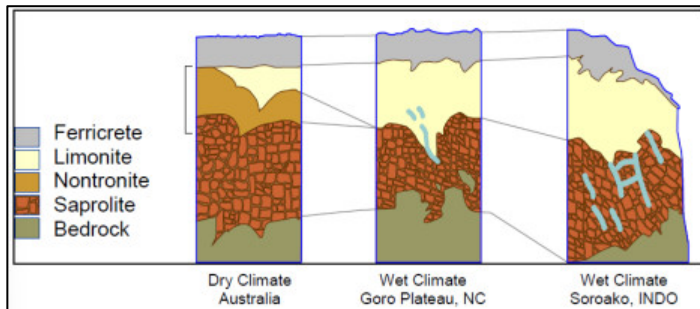
**Gambar 9.** Zona penting dalam profil laterit.

Sumber: Ahmad (2009).





**Gambar 10.** Profil laterit yang disederhanakan pada *hill*.  
 Sumber: Ahmad (2009).



**Gambar 11.** Variasi profil laterit akibat iklim dan topografi.  
 Sumber: Ahmad (2009).

Menurut Ahmad (2009), profil pelapukan laterit dijelaskan secara kronologis berdasarkan urutan perkembangan zona-zona pelapukan, yang menunjukkan proses pembentukan dari bagian bawah ke atas.

Zona batuan dasar:

- Zona ini terdiri dari batuan dasar yang relatif tidak berubah di bagian bawah profil pelapukan.
- Ini adalah zona di mana pelapukan yang baru saja terjadi baru saja dimulai di sepanjang rekahan dan kekar di dalam batuan.
- Batuan mempertahankan kepadatan dan karakternya secara keseluruhan, kecuali pada kekar dan permukaan rekahan.
- Pembagian antara batuan dasar dan saprolit di atasnya mungkin tidak terlalu tajam. Selain itu, pembagiannya tidak pernah berupa garis horizontal tetapi mengikuti kontur dari "front pelapukan" yang menembus lebih dalam di lokasi rekahan dan kekar mayor.



Perubahan batuan dasar di mana proses pelapukan kimiawi paling aktif umumnya terletak di bawah permukaan air, di bagian jenuh dari batuan yang basah secara permanen

- Pengaruh kimiawi dan pelapukan berlangsung di sepanjang kekar dan rekahan pada batuan serta belahan dan rekahan mikro pada kristal
- Saprolisasi di sepanjang permukaan kekar mengarah pada pembentukan "boulders" di dalam zona saprolit
- Bongkahan dapat memiliki kerak saprolit yang signifikan, yang dapat membawa kadar nikel yang baik
- Semua tekstur dan struktur batuan asli terpelihara dengan baik
- Sebagian besar mineral batuan induk juga terawetkan
- Zona ini terdiri dari fragmen batuan dasar, pinggiran bongkahan batu yang tersaprolisis, dan kuarsa dan garnierit yang diendapkan
- Pada peridotit yang tidak diserpentinisasi, saprolisasi terbatas pada permukaan bongkah batu karena batuan segar sangat sulit ditembus oleh larutan air
- Pada peridotit yang tidak diserpentinisasi, batu-batu yang tidak disaprolisis tetap bebas dari nikel
- Pada peridotit yang diserpentinisasi, saprolisasi berlangsung melalui sebagian besar massa batuan pada saat yang sama karena batuan cukup lunak untuk memungkinkan akses ke larutan air
- Pada peridotit serpentinisasi, batu-batu yang tidak disaprolisis mungkin mengandung nikel supergen dalam jumlah yang signifikan.
- Zona saprolit dapat dibagi lebih lanjut menjadi zona bawah yang kasar (berbatu) dan zona atas yang halus (lunak)
- Tingkat porositas umumnya meningkat ke atas di dalam zona saprolit dan mencapai nilai maksimum di dalam zona *intermediate*

#### Zona Smektit atau Nontronit:

- Ini adalah zona peralihan antara limonit bawah dan saprolit atas
- Zona ini mengandung lempung smektit lunak (biasanya Nontronit) dan kristal kuarsa yang keras
- Tekstur dan struktur batuan asli masih terjaga dengan baik di zona yang belum sepenuhnya runtuh ini
- Perkembangan zona peralihan yang berbeda tergantung pada keanehan iklim dan kemunculannya terbatas di dunia. Di daerah hujan lebat sepanjang tahun, silika dan magnesia sepenuhnya dibuang dari sistem dan tidak ada lempung yang terbentuk. Namun, di daerah yang memiliki iklim basah-kering tropis, pelapukan kimiawi mungkin dibatasi dengan hasil bahwa beberapa magnesia dan silika mungkin tetap berada di profil pelapukan dalam bentuk smektit / nontronit.



peralihan dikembangkan, kemunculan gumpalan mangan lebih banyak di bagian atas zona peralihan daripada di bagian bawah zona

Smektit memiliki tingkat porositas maksimum dalam profil

- Selain meningkatnya jumlah ruang antar butir yang dihasilkan oleh *leaching* mineral feromagnesian, rongga-rongga yang sebenarnya mungkin ada dalam berbagai ukuran di mana material telah dibuang melalui saluran air bawah tanah.

Zona Ferruginous: (juga disebut zona “Laterit”, zona Limonit, atau zona Oksida)

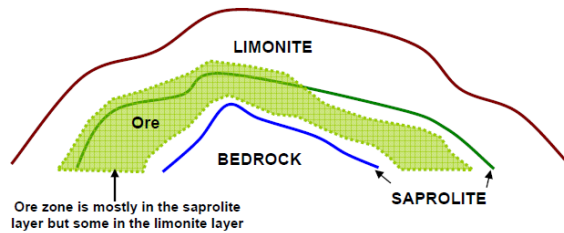
- Ini adalah zona di mana konsentrasi residu dari elemen-elemen yang tidak dapat bergerak telah mencapai nilai maksimum. Semua komponen yang larut secara kimiawi (Ca, Na, K, Mg, Si) dari profil pelapukan telah tercuci dan menyisakan yang pada dasarnya merupakan seskuoksida Fe, Al dan Mn).
- Bagian atas dari zona ferruginous kaya akan goethite sedangkan bagian bawah terdiri dari lebih banyak oksida besi terhidrasi yang umumnya dikelompokkan di bawah “limonit”
- Goethite dapat diremobilisasi dalam kondisi asam dekat permukaan dan dikristalisasi ulang menjadi ferricrete (*iron cap, canga, cuirasse de fer*)
- Mineral yang sangat tidak larut dapat bertahan di zona ini (spinel, magnetit, maghemit, dan talk primer)
- Dasar zona ferruginous diperkaya dengan mangan, kobalt dan nikel dalam bentuk asbesit atau gumpalan mangan. Gumpalan mangan ini biasanya muncul sebagai lapisan permukaan yang sangat tipis pada kekar dan bidang rekahan
- Zona ferruginous mewakili laterit yang telah runtuh karena beratnya sendiri. Dengan demikian, densitas curah kering di zona limonit umumnya lebih tinggi daripada di zona transisi
- Akibat keruntuhan, struktur dan tekstur asli dari batuan tersebut sepenuhnya dilenyapkan
- Beberapa permukaan sambungan dan *silica boxwork* dapat bertahan dari zona saprolit ke dalam zona ferruginous

#### 1.2.4 Ore Laterit

##### 1. Definisi Zona Ore

Di dalam profil laterit, zona *ore* ekonomis ditentukan sebagian besar berdasarkan kadar nikel ekonomis. Dengan demikian, zona *ore* adalah bagian dari profil laterit di mana kadar nikel berada di atas kadar batas yang digunakan untuk *ore* tersebut (pembatasan dan kualifikasi tertentu berlaku untuk ketebalan *ore* minimum dan merupakan *sandwiched waste*) (Ahmad, 2005).





**Gambar 12.** Profil Umum Zona Ore Nikel.  
Sumber: Ahmad (2005).

Distribusi nikel di daerah Sorowako dan Petea sedemikian rupa sehingga zona *ore* sebagian besar berada pada lapisan saprolit namun dapat meluas ke lapisan limonit. Jumlah zona limonit yang mengandung konsentrasi nikel yang ekonomis bervariasi dari satu deposit ke deposit lainnya. Deposit Sorowako Blok Barat, Blok Timur dan Petea sangat bervariasi dalam hal proporsi *ore* di zona limonit, dan dalam hal ketebalan *overburden* dan *ore*. Tabel di bawah ini memberikan rata-rata secara umum untuk area-area tersebut:

**Tabel 4.** Perbandingan Profil Ore.

	<b>Sorowako West Block</b>	<b>Sorowako East Block</b>	<b>Petea Block A&amp;B</b>
Rata-rata. Tebal Overburden, m	9.3	11.5	7.2
Rata-rata. Tebal Ore, m	6.2	5.0	4.2
Rata-rata. Strip rasio ( <i>geological</i> )	1.5	2.3	1.7
% Ore pada zona limonit (volume)	28%	7%	9%

Sumber: Ahmad (2005).

Dalam profil laterit yang sama, zona *ore* dapat didefinisikan secara berbeda untuk operasi pirometalurgi dan HPAL karena persyaratan kimia yang berbeda. *Ore* untuk operasi piro secara umum harus memiliki kadar nikel yang lebih tinggi, rasio silika terhadap magnesium yang lebih rendah, dan kandungan besi yang berkisar antara 15 hingga 22%. Kombinasi ini secara ideal dicapai dengan menambang zona saprolit. *Ore* untuk operasi HPAL dapat memiliki kadar nikel yang lebih rendah, harus memiliki kadar kobalt, dan harus memiliki kandungan Mg dan Al yang idealnya dicapai dengan menambang zona limonit. Namun ke smelter mungkin memerlukan beberapa limonit untuk kadar besi yang dibutuhkan sementara *ore feed* ke pabrik HPAL beberapa saprolit untuk mempertahankan kadar nikel yang tinggi yang dapat diterima. Gambar di bawah ini mengilustrasikan



bagaimana berbagai zona dalam profil laterit dapat dioptimalkan untuk operasi piro atau HPAL:

Ni < 1.0%	Overburden – to waste dumps
Ni 1.0 – 1.5% Mg < 4 – 5%	Limonite – to HPAL
High Co zone in limonite & saprolite	Ideally to HPAL; can go to pyro if > 1.5% Ni
Ni > 1.5% Saprolite zone	Top portion can go to HPAL; all can go to pyro

**Gambar 13.** Ilustrasi variasi zona ore.  
Sumber: Ahmad (2005).

Hasil eksplorasi awal di wilayah Sorowako menunjukkan adanya dua jenis batuan dasar berbeda yang menjadi substrat endapan laterit. Di bagian barat Sorowako (Blok Sorowako Barat), endapan laterit berkembang di atas batuan peridotit yang umumnya tidak mengalami proses serpentinisasi, yang dicirikan dengan kehadiran bongkah besar dan keras. Kandungan nikel pada endapan ini umumnya terdapat hanya dalam fraksi halus. Sebaliknya, di bagian timur (Blok Timur Sorowako), endapan laterit terbentuk di atas peridotit yang menunjukkan variasi tingkat serpentinisasi. Ketika tingkat serpentinisasi rendah, karakteristik batuan dasar di Blok Timur cenderung menyerupai Blok Barat. Namun, pada tingkat serpentinisasi yang tinggi, batuan di Blok Timur cenderung memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi pada lapisan ore (Ahmad, 2005).

Terdapat dua tipe ore, yaitu *East ore type* dan *West ore type*, yang masing-masing terbentuk di atas batuan dasar terserpentinisasi dan tidak terserpentinisasi. Kedua tipe ini menunjukkan perbedaan karakteristik yang cukup signifikan. *East ore type* cenderung memiliki kandungan nikel yang lebih tinggi, kadar besi yang lebih tinggi, serta rasio silika terhadap magnesium yang lebih besar dibandingkan dengan *West ore type*. Namun demikian, *West ore type* memiliki tingkat perolehan saringan yang lebih rendah dan menghadirkan tantangan dalam proses penambangan karena sifatnya yang sangat keras dan ukuran bongkah yang besar (Ahmad, 2005).

Baik *East* maupun *West ore type* menunjukkan stratifikasi yang jelas, dengan lapisan limonit berkadar besi tinggi di bagian atas dan zona saprolit di bawahnya, yang selanjutnya diikuti oleh batuan dasar yang tidak mengalami perubahan. Dalam profil laterit ini, zona ore didefinisikan secara spesifik berdasarkan kadar nikel. Bongkah besar ore (dengan kadar nikel di atas *cut-off*) berada di zona saprolit dan limonit. Bongkah ore juga ditemukan pada zona limonit, terutama di wilayah Blok Timur Sorowako. Walaupun ore limonit dan saprolit memiliki perbedaan sifat fisik, keduanya tetap ditambang secara bersamaan tanpa dilakukan pemisahan di lokasi zona tersebut. Namun demikian, *East ore type* dan *West ore type*



*ore type* tetap dipisahkan saat penumpukan di area *wet ore* dan kemudian diklasifikasikan dalam *dry ore storage* di unit pengolahan (Ahmad, 2005).

Ahmad (2005) menyatakan bahwa klasifikasi ore di wilayah Sorowako–Petea didasarkan pada pendekatan yang praktis, dengan tujuan mengoptimalkan pemanfaatan ore, mempermudah kegiatan penambangan, serta meningkatkan efisiensi proses peleburan. Secara umum, beberapa parameter utama digunakan dalam sistem klasifikasi ore ini.

#### a. Jenis batuan ultramafik

Beberapa sifat ore dapat ditelusuri kembali ke jenis batuan dasar ultramafik yang mendasarinya. Di Blok Barat Sorowako, batuan dasarnya sebagian besar adalah harzburgit dengan sesekali muncul batuan dasar dunit olivin tinggi. Dalam kedua kasus tersebut, kandungan olivinya cukup tinggi dan piroksen pada dasarnya adalah ortopiroksen. Di Blok Timur Sorowako, batuan dasarnya didominasi oleh lherzolit dengan kandungan olivin yang lebih rendah dan mengandung orto dan klinopiroksen. Di Petea, batuan dasar umumnya bersifat harzburgit di area penambangan awal di Blok A dan B. Dunit dan peridotit dengan kandungan olivin yang tinggi memiliki konsentrasi awal nikel yang lebih tinggi di batuan dasar, yang dapat berdampak pada kadar nikel akhir dalam profil laterit.

#### b. Derajat serpentinisasi

Secara umum, peridotit Blok Barat tidak terserpentinisasi; peridotit Blok Timur terserpentinisasi pada berbagai tingkatan; dan peridotit Petea sangat terserpentinisasi. Meskipun secara umum tidak terserpentinisasi, peridotit Blok Barat menunjukkan sedikit peningkatan tingkat serpentinisasi dari Tipe 1 ke Tipe 2 dan 3. Secara keseluruhan, tingkat serpentinisasi di Blok Barat Sorowako masih rendah dan tidak kondusif untuk pengayaan nikel pada fraksi batuan berukuran besar. Di Blok Timur Sorowako, peningkatan serpentinisasi mengarah pada peningkatan kemudahan penambangan, pengayaan nikel pada fraksi berbatu, dan ukuran saringan yang lebih tinggi untuk peningkatan ore.

Meskipun sebagian besar wilayah Petea dan sebagian besar wilayah Sorowako *East Block* menunjukkan tingkat serpentinisasi yang sangat tinggi (mendekati 100%), analisis petrografi dengan jelas menunjukkan adanya relik olivin dan piroksen di dalam batuan. Batuan dengan tingkat serpentinisasi yang tinggi ini belum menjadi “serpentin” yang akan mengiringi kehancuran total tekstur relik dan juga membuat massa batuan menjadi kurang rentan terhadap pelapukan laterit.



#### Chemistry: rasio silika terhadap magnesia & kandungan besi

hadap magnesia merupakan dasar utama untuk klasifikasi ore an tipe Timur. *West ore type* yang tidak mengandung material memiliki rasio silika terhadap magnesium yang tinggi 1 bijih tipe Timur yang memiliki komponen fraksi berbatu yang ore type, ukuran fraksi yang lebih besar (seperti -18”) umumnya /M yang lebih rendah dibandingkan dengan ukuran fraksi yang

lebih kecil (seperti bijih -1"). Meskipun kandungan besi tidak digunakan sebagai parameter klasifikasi independen, kandungan besi pada *west ore type* umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan *east ore type*.

#### d. Ukuran fraksi optimal untuk *upgrading*

Karena kandungan nikel yang berbeda pada fraksi halus dan fraksi kasar, *ore laterit* sering kali ditingkatkan melalui penyaringan sederhana. Di Proyek Sorowako, protokol penyaringan berikut ini diikuti untuk berbagai jenis *ore*:

- *West Block Type*:
  - *Wet screening* di dalam tambang hingga -18" pada *grizzly statis*
  - *Wet screening* di tambang hingga -2" pada *vibrating screens*
  - *Dry screening* di pabrik hingga ukuran -1" (-3/4")
- *East Block Type*:
  - *Wet screening* di tambang hingga -18" pada *grizzly statis*
  - *Wet screening* di tambang hingga -6" pada *vibrating screens*
  - *Crushing* fraksi +6-18" di tambang jika *ore grading*
  - *Crushing* +1-6" di pabrik setelah *drying*

Meskipun peningkatan kadar menyebabkan peningkatan kadar nikel pada fraksi yang dipulihkan, namun hal tersebut mengakibatkan hilangnya tonase *run-of-mine*. Perolehan saringan tertinggi terdapat pada jenis *ore* -18" di Blok Timur, diikuti oleh jenis *ore* -6" dan kemudian -1". Beberapa jenis *ore* -1" di Blok Timur menawarkan pilihan dalam penyaringan. Jika kadar nikel ingin dimaksimalkan, bijih harus disaring pada ukuran 1" untuk menghilangkan semua fraksi berbatu dengan kadar rendah. Namun, jika perolehan kembali dari penyaringan ingin dimaksimalkan, bijih dapat disaring pada ukuran 6". Fraksi saringan +1-6" tambahan sedikit lebih rendah pada kadar nikel sehingga dampaknya terhadap kadar menjadi minimal. Namun demikian, prosedur ini memungkinkan pemulihan *screening* ditingkatkan sekitar 15% secara absolut. Satu-satunya kendala pada prosedur penyaringan alternatif tersebut adalah bahwa fraksi +1-6" memiliki kandungan olivin yang rendah (<22%).

#### e. Tingkat kesulitan penambangan (tanpa peledakan)

Tingkat kesulitan penambangan merupakan fungsi dari kekerasan asli dari peridotit yang mendasari dan prevalensi rekahan dan kekar. Secara umum, peridotit Blok Barat yang belum terserpentinisasi sangat keras karena terdiri dari olivin dan piroksen (Kekerasan: 6,5-7,0 untuk olivin; dan 5,0-6,0 untuk piroksen). Peridotit Blok Timur memiliki sejumlah besar serpentin yang merupakan mineral yang relatif lunak (Kekerasan: 2,5-4,0). Dengan demikian, *ore* Petea yang sepenuhnya mengandung

ik.



#### etrasi profil dengan pengeboran auger

22, jenis *ore* Blok Barat ditentukan berdasarkan penetrasi relatif pengeboran auger. Dua ambang batas ditetapkan pada 1,5 m daerah di mana kurang dari 1,5 m saprolit dicapai dengan ditetapkan sebagai WB Tipe-1. Area dengan ketebalan saprolit

antara 1,5 dan 4,5 m pada lubang bor ditetapkan sebagai WB Tipe-2. Area dengan ketebalan saprolit lebih dari 4,5 m pada lubang bor diklasifikasikan sebagai WB Tipe-3. Meskipun merupakan indikator yang sangat penting untuk penetrasi auger dari jenis bijih yang berbeda di Blok Barat, skema seperti itu saat ini tidak digunakan di Sorowako.

### g. Kandungan olivin

Olivin memainkan peran yang merusak *electric furnace* di *process plant* dan penting untuk menjaga agar mineral ini tidak masuk ke dalam *ore* sebisa mungkin. Meskipun kandungan olivin pada *ore* Blok Barat cukup tinggi, namun tidak ada metode praktis yang tersedia untuk menguranginya tanpa menimbulkan biaya yang signifikan. Di Blok Timur, bagaimanapun, kandungan olivin cukup bervariasi dari tingkat yang hampir nol pada peridotit yang sepenuhnya serpentinisasi (seperti di Petea) hingga tingkat yang cukup tinggi pada jenis *ore* dengan kandungan olivin tinggi -1" (seperti di Mahalona). Di mana pun kandungan olivin pada batuan +1-6" melebihi ambang batas penerimaan sekitar 22%, fraksi kasar ini harus disaring. Dengan demikian, bijih Blok Timur berkadar olivin tinggi diperlakukan sama seperti jenis Blok Barat: *wet screening* hingga ukuran -2" atau -6" di tambang yang diikuti dengan *dry screening* hingga ukuran -1" di *process plant*. *Additional screening* ke ukuran fraksi -1" untuk *ore* Blok Timur ini menghasilkan pemulihan *screening* yang lebih rendah dan tekanan pada *dryer kiln* yang harus mengolah lebih banyak material untuk memberi *feed* smelter.

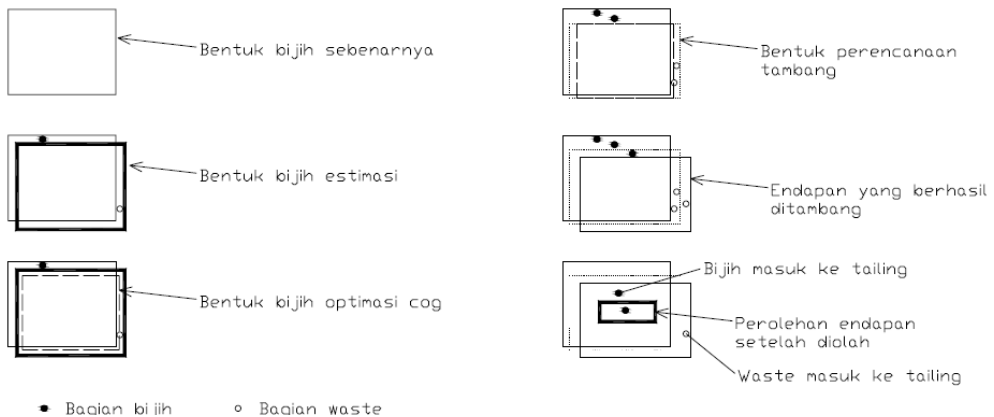
**Tabel 5.** Pembagian Jenis Ore pada Tipe West Block dan East Block.

Parameter	Tipe West Block			Tipe East Block			
	-1" Tipe-1	-1" Tipe-2	-1" Tipe-3	-1" High-Olivin	-1" Low-Olivin	-6"	-18"
Tipe Endapan Ore							
Batuan Dasar	Dominasi Harzburgit serta Dunit			Dominasi Lherzolit			
Derajat Serpentinisasi	Sangat rendah <5%	rendah 5 - 10%	Rendah 10 - 15%	Rendah 10 - 15%	Menengah 15 - 25%	Tinggi 30 - 60%	Sangat tinggi 60 - 100%
Sifat Kemagnetan	Sangat rendah			Rendah		Sangat tinggi	
Rasio SiO <sub>2</sub> /MgO	2.2 - 2.6			1.8 - 2.0	1.6 - 1.8	1.4 - 1.6	
Kandungan Fe	Tinggi: 20-24%			Tinggi: 20-24%		Rendah: 15-18%	
Ukuran alat pemisah	-1"			-1"	-1"	-6"	-18"
Kekerasan bongkah	Sangat-sangat keras	Sangat keras		Menengah	Menengah	Lemah	Lemah
Intensitas rekahan	Sangat rendah	Menengah	Menengah	Menengah	Tinggi	Sangat tinggi	Sangat tinggi
Tingkat kesulitan penambangan	Tinggi	Menengah (+)	Menengah (-)	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
Ketebalan saprolit oleh auger	<1.5 m	1.5 - 4.5 m	>4.5 m	Tidak digunakan			
	menengah	Menengah	Menengah	Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
	Tinggi			Tinggi	Rendah	Rendah	Rendah
	Menengah			Tebal			
	Tebal			Menengah			



### 1.2.5 Dilusi dan Ore Loss

Dilusi merupakan hasil dari pencampuran material *non-ore (waste)* ke dalam material *ore* selama rangkaian aktivitas penambangan, yang menyebabkan peningkatan tonase namun menurunkan kadar rata-rata bijih secara relatif. Proses dilusi ini tidak hanya terbatas pada tahap eksplorasi, tetapi dapat terjadi hingga ke tahapan pengolahan mineral. Visualisasi atau ilustrasi mengenai terjadinya dilusi pada setiap tahapan penambangan dapat dilihat pada Gambar 14.



**Gambar 14.** Dilusi yang terjadi pada setiap tahapan proses penambangan.  
Sumber: Notosiswoyo, dkk (2005).

Menurut Notosiswoyo, dkk (2005), dilusi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu dilusi internal dan dilusi eksternal.

1. Dilusi internal terjadi ketika material dengan kadar rendah berada di dalam tubuh material berkadar tinggi. Secara umum, dilusi internal dibagi menjadi dua bentuk: pertama, dilusi geometri, yaitu kondisi di mana material *low grade* memiliki batas yang jelas terhadap *high grade*, seperti contoh *barren dike* yang menerobos zona *ore*. Kedua, dilusi inheren, yaitu kondisi di mana batas antara material *low grade* dan *high grade* tidak jelas, umumnya disebabkan oleh ukuran blok yang diperbesar dalam proses estimasi untuk membedakan antara *ore* dan *waste*.
2. Dilusi eksternal terjadi jika material berkadar rendah terpisah dari material berkadar tinggi. Kondisi ini bisa terjadi akibat runtuhnya dinding tambang, kendala teknis dalam menentukan batas *ore* di *open pit*, atau kesalahan dalam memisahkan *ore* dan *waste*. Dilusi eksternal juga dapat terjadi saat pembuatan *stope*, terutama jika lebar *ore* lebih kecil dari lebar minimum yang bisa ada endapan yang besar dengan batas *ore-waste* yang pengaruh dilusi eksternal akan cenderung kecil terhadap total tonangan.



(2014), dilusi dalam penambangan mengacu pada kontaminasi kadar lebih rendah dan/atau *waste* dan *backfill materials*. Secara signifikan ke dalam tiga, yaitu *planned*, *unplanned* dan *ore loss*.

*Planned dilution*, juga disebut dilusi primer atau *internal dilution*, terjadi ketika material *low grade*, di bawah *Cut-Off Grade*, terdapat di dalam blok cadangan *ore* yang mengganggu kadar keseluruhannya. Dari perspektif yang berbeda, *unplanned dilution*, juga disebut sebagai dilusi sekunder atau eksternal, terjadi ketika *ore* dengan kadar yang *low grade* atau material *waste* di bagian luar blok cadangan *ore* mengganggu *ore* murni yang diproduksi. *Ore loss* dapat didefinisikan sebagai blok *ore* yang tidak terekstraksi atau tidak terambil (Jang, 2014).

Menurut CIM Council (2019), dilusi adalah material yang berada di bawah kadar atau *cut-off grade* tetapi secara sengaja atau tidak sengaja ditambang dan harus dipertimbangkan dalam estimasi Cadangan Mineral karena akan "mendilusi" estimasi kadar rata-rata dan meningkatkan volume yang ditambang. Pada tambang terbuka, garis besar penambangan ditetapkan di mana penambangan akan dilakukan. Dalam beberapa kasus, garis besar penambangan mencakup material yang berada di bawah kadar atau nilai batas karena material ini tidak dapat disingkirkan secara selektif selama operasi penggalian. Material ini disebut sebagai *internal dilution*.

*External dilution* atau *planned dilution* juga harus dipertimbangkan ketika menyiapkan estimasi Cadangan Mineral. Jenis dilusi ini dihasilkan dari penambangan material buangan yang bercampur dengan material termineralisasi di sepanjang perimeter area yang ditambang pada saat penggalian. Perkiraan jenis material ini juga harus disertakan dalam estimasi tonase dan kadar Cadangan Mineral. *Unplanned dilution* biasanya terjadi sebagai akibat dari pergerakan material di dalam garis penambangan akibat peledakan (CIM Council, 2019).

### 1.2.6 Rekonsiliasi

Menurut Parhizkar et al. (2010) dalam Richard dan Sulemana (2015), rekonsiliasi kadar bijih didefinisikan sebagai suatu perbandingan antara nilai estimasi kadar bijih pada tahap eksplorasi dengan kadar bijih aktual yang diperoleh berdasarkan data dari lubang ledakan. Sementara itu, Riske et al. (2010) dalam sumber yang sama menjelaskan bahwa rekonsiliasi juga mencakup proses identifikasi, analisis, dan pengelolaan perbedaan antara hasil perencanaan dan hasil aktual, dengan tujuan untuk mengevaluasi dan menemukan potensi peningkatan. Peluang-peluang tersebut mencakup pengembangan metode estimasi yang lebih akurat, peningkatan desain, serta penyusunan rencana dan jadwal yang lebih terukur. Selain itu, peningkatan pada teknik penambangan juga diperlukan untuk meminimalkan kehilangan bijih dan dilusi, serta mengidentifikasi strategi dalam meningkatkan *recovery* logam selama proses ekstraksi. Kemampuan dalam mengukur dan



rekonsiliasi ini memungkinkan pihak operator untuk menyusun strategi perbaikan yang komprehensif dalam seluruh aspek nilai

#### siliasi

ungkapkan berbagai teknik rekonsiliasi yang diterapkan oleh tambang. Teknik-teknik ini telah dijelaskan sebagai *Depletion by*

*Mining*; Rekonsiliasi Sumber Daya dengan *grade control*; Rekonsiliasi antara Cadangan Bijih, *grade control*, dan Produksi; serta penggunaan Faktor Rekonsiliasi (*mine call factors*) (Richard dan Sulemana, 2015).

Sebuah tambang dengan catatan rekonsiliasi yang buruk secara konsisten mungkin menghadapi satu atau lebih dari masalah berikut: kompleksitas proses rekonsiliasi yang dianggap tinggi; peralihan tanggung jawab/kesalahan; pelacakan material yang buruk; dan perubahan parameter yang berlebihan untuk memenuhi ekspektasi (Blucher *et al.*, 2002 dalam Richard dan Sulemana, 2015).

## 2. Klasifikasi Rekonsiliasi

Rekonsiliasi kadar bijih dapat dibagi menjadi tiga kategori utama: temporal, spasial, dan fisik (Riske *et al.*, 2010, dalam Richard dan Sulemana, 2015). Pada (Gambar 15), piramida rantai nilai pertambangan menempatkan rekonsiliasi sebagai pemeriksaan realitas antara berbagai lapisan. Gambar tersebut menunjukkan bagaimana klasifikasi rekonsiliasi ini berkaitan dengan berbagai aktivitas dalam rantai nilai pertambangan secara keseluruhan. Piramida dibalik karena jumlah informasi yang tersedia bagi personel pertambangan meningkat seiring naiknya posisi dalam piramida.



**Gambar 15.** Piramida rekonsiliasi.  
Sumber: Richard dan Sulemana (2015).

### a. Rekonsiliasi Temporal

Rekonsiliasi temporal merupakan jenis rekonsiliasi yang paling umum digunakan, yaitu dengan membandingkan kinerja kegiatan operasi pertambangan berdasarkan urutan waktu. Periode yang dikaji dapat mencakup skala waktu seperti *shift*, harian, mingguan, bulanan, hingga tahunan. Karena pendekatannya bersifat waktu, bentuk rekonsiliasi ini tidak secara langsung membandingkan data dari aspek



jangka pendek dapat menunjukkan variasi, namun dianggap merataan dalam periode waktu yang lebih panjang seperti an (Riske *et al.*, 2010). Rekonsiliasi temporal memberikan melakukan pelacakan dan evaluasi data dari waktu ke waktu, akan secara bulanan atau tahunan. Meskipun berbasis waktu, juga dapat digunakan dalam konteks spasial; sebagai contoh,

untuk mengevaluasi kinerja sebuah *stope* bawah tanah atau area tambang terbuka dalam kurun waktu tertentu (Richard dan Sulemana, 2015).

#### b. Rekonsiliasi Spasial

Menurut Riske *et al.* (2010) dalam Richard dan Sulemana (2015), rekonsiliasi spasial didefinisikan sebagai bentuk rekonsiliasi yang bersifat tiga dimensi. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja absolut dengan membandingkan model prediktif terhadap hasil aktual yang diperoleh melalui kegiatan pemetaan dan pengukuran survei. Aspek spasial memiliki pengaruh yang signifikan terhadap hasil rekonsiliasi, khususnya apabila tidak dimasukkan dalam pertimbangan selama aktivitas pertambangan berlangsung. Kondisi ini menjadi sangat penting dalam situasi di mana batas antar jenis material ditentukan berdasarkan kontrol visual terhadap bijih, atau ketika pengambilan data seperti sampling dilakukan langsung selama proses penambangan. Data spasial aktual yang diperoleh kemudian digunakan sebagai dasar perbandingan terhadap interpretasi geologi awal dan model geologi yang telah dibuat sebelumnya.

#### c. Rekonsiliasi Fisik

Rekonsiliasi fisik berkaitan dengan atribut seperti kadar logam, parameter kualitas yang berbeda, dan volume. Perusahaan pertambangan biasanya menggabungkan rekonsiliasi fisik dengan data temporal, yang laporannya biasanya dilakukan dalam periode waktu yang panjang (triwulanan atau tahunan). Namun, seringkali juga berguna untuk membandingkan karakteristik fisik model seperti total logam, dilusi yang direncanakan, dan hasil kualitas antara versi yang berbeda dari model sumber daya dan cadangan (Fouet *et al.*, 2009 dalam Richard dan Sulemana, 2015).

### 3. Kalkulasi Faktor Rekonsiliasi

#### a. Metode Tradisional

Penggunaan faktor perbandingan, yang sering disebut *Mine Call Factors*, untuk rekonsiliasi bukanlah hal baru di industri pertambangan. Faktor-faktor ini telah diterapkan secara luas dalam melakukan rekonsiliasi produksi. Faktor-faktor ini dihitung dengan tujuan untuk mengevaluasi secara terpisah perkiraan model dengan perkiraan kontrol kualitas harian dan perkiraan kualitas bijih proses. Informasi berikut ini diperlukan untuk menghitung faktor-faktor ini dengan sukses (Rossi, 2000 dalam Richard dan Sulemana, 2015): tonase, kadar, dan kandungan logam dari model jangka panjang (blok), model jangka pendek, model kontrol kadar, serta tonase, kadar, dan kandungan logam yang dihasilkan oleh tambang untuk periode tersebut.



ias juga dapat mempertimbangkan tumpukan material antara pengolahan. Pertimbangan juga dapat diberikan pada material n aliran penghancuran dan penggilingan sebelum pengambilan periode perbandingan bulanan dipresentasikan oleh Rossi dan reka mendefinisikan *Mine Call Factors* sebagai berikut:

-  $F_{1t}$ ,  $F_{1f}$  dan  $F_{1f}$ , yang didefinisikan untuk ton, kadar, dan logam masing-masing, didasarkan pada ton, kadar, dan

kandungan logam yang sesuai dari model jangka panjang versus model jangka pendek dan dihitung secara generik sebagai:

$$F_1 = \frac{\text{Short term model}}{\text{Long term model}}$$

- 2) Faktor  $F_2 - F_{2t}$ ,  $F_{2f}$  dan  $F_{2f}$ , yang didefinisikan untuk ton, kadar, dan kandungan logam masing-masing, didasarkan pada ton, kadar, dan kandungan logam yang sesuai dari model kontrol kadar dibandingkan dengan model jangka pendek dan dihitung secara generik sebagai:

$$F_2 = \frac{\text{Grade control model}}{\text{Long term model}}$$

- 3) Faktor  $F_3 - F_{3t}$ ,  $F_{3f}$  dan  $F_{3f}$ , yang didefinisikan untuk ton, kadar, dan kandungan logam masing-masing, didasarkan pada tonase, kadar, dan kandungan logam yang sesuai dari laporan tambang bulanan dibandingkan dengan model kontrol kadar. Terkadang, laporan tambang untuk tonase dan kadar hanya diambil dari model kontrol kadar dan dianggap sebagai material yang dikirim ke pabrik pengolahan. Dalam kasus lain, mereka menggunakan kadar yang disediakan oleh model kontrol kadar sementara tonase yang dilaporkan didasarkan pada penghitungan truk atau pengukuran volumetrik dari kemajuan. Jika berlaku, faktor  $F_3$  dihitung secara generik sebagai:

$$F_3 = \frac{\text{Mine Reported}}{\text{Grade control model}}$$

- 4) Faktor  $F_4 - F_{4t}$ ,  $F_{4f}$  dan  $F_{4f}$ , yang didefinisikan untuk ton, kadar, dan kandungan logam masing-masing, didasarkan pada tonase, tingkat, dan kandungan logam material yang diterima di pabrik dibandingkan dengan yang dilaporkan tambang. Faktor  $F_4$  memberikan ukuran langsung kerugian bijih dan dilusi dalam sistem pengangkutan dan penumpukan. Faktor ini dapat dihitung secara generik sebagai:

$$F_4 = \frac{\text{Received at mill}}{\text{Mine Reported}}$$

## b. Metode Probabilistik

Rekonsiliasi telah diteliti secara mendalam selama bertahun-tahun melampaui penggunaan *traditional mine call factors*. Para peneliti berusaha mengembangkan model probabilistik dimana faktor rekonsiliasi dapat dihitung untuk proses rekonsiliasi.



Model tersebut adalah "Model Probabilistik Parhizkar" (Parhizkar et al dan Sulemana, 2015). Dalam penelitian mereka, Parhizkar menyelidiki faktor-faktor yang terkait dengan perkiraan kadar yang digunakan untuk rekonsiliasi. Faktor-faktor ini diidentifikasi sebagai sumber ketidakpastian sisa umur tambang. Dalam penelitian mereka, faktor-faktor ketidakpastian tersebut ditimbang dan mempertimbangkan meliputi: variabilitas inheren, ketidakpastian sistematis. Variabilitas inheren, yang diwakili oleh efek

nugget, diperhitungkan oleh metode perkiraan (misalnya kriging). Model ini, oleh karena itu, menetapkan faktor koreksi untuk setiap ketidakpastian yang tersisa pada perkiraan kadar untuk menyelaraskannya dengan kadar aktual. Hal ini dinyatakan sebagai:

$$G_a = C_r C_s G_e$$

di mana  $G_a$  dan  $G_e$  mewakili kadar aktual dan estimasi; dan  $C_r$  dan  $C_s$  adalah faktor koreksi untuk kesalahan statistik (acak) dan sistematis masing-masing.

Ketidakpastian statistik (ketidakpastian acak) disebabkan oleh jumlah sampel yang terbatas, sedangkan ketidakpastian sistematis berkaitan dengan kesalahan yang timbul akibat perbedaan antara kondisi in-situ (nyata) dan laboratorium akibat efek skala dan anisotropi (Parhizkar *et al*, 2010 dalam Richard dan Sulemana, 2015).

Setelah pemodelan lebih lanjut, yang mewakili ketidakpastian keseluruhan dari nilai sebenarnya dalam proses rekonsiliasi. Para peneliti mengekspresikan hal ini sebagai:

$$CV_{G_a} \cong \sqrt{\frac{S^2_{G_e}}{G_e^2} + \frac{CV^2_{G_e}}{n} + CV^2_{c_1} + CV^2_{c_2}}$$

di mana  $CV_{G_a}$  adalah ketidakpastian keseluruhan dari nilai sebenarnya (Koefisien variasi nilai sebenarnya);  $\frac{S^2_{G_e}}{G_e^2}$  mewakili variabilitas bawaan dengan  $S^2_{G_e}$  sebagai varians nilai yang diperkirakan, dan  $G_e^2$  sebagai rata-rata nilai yang diperkirakan;  $\frac{CV^2_{G_e}}{n}$  mewakili ketidakpastian acak atau statistik, dengan  $CV^2_{G_e}$  sebagai koefisien variasi untuk nilai perkiraan, dan  $n$  sebagai ukuran sampel;  $CV^2_{c_1}$  dan  $CV^2_{c_2}$ , bersama-sama, mewakili ketidakpastian sistematis (dengan  $CV^2_{c_1}$  dan  $CV^2_{c_2}$  merujuk pada koefisien variasi faktor koreksi untuk efek skala dan anisotropi masing-masing).

Menurut para peneliti, model ini cocok untuk semua jenis deposit. Validitasnya telah diuji menggunakan data nyata dari tambang terbuka besi, dan implementasinya berhasil karena menghasilkan rekonsiliasi yang lebih baik.



## BAB II METODE PENELITIAN

Penelitian ini disusun sebagai panduan pelaksanaan kegiatan penelitian secara menyeluruh. Dengan metode yang sistematis dan terstruktur, diharapkan hasil penelitian sesuai dengan tujuan. Metode yang digunakan berupa observasi dan pengamatan langsung di lapangan, dengan fokus pada parameter yang memengaruhi sistem penyaliran tambang. Penelitian dilakukan melalui beberapa tahapan, yaitu tahap pendahuluan, pengambilan data, analisis data, dan penyusunan laporan.

### 2.1 Tahapan Pendahuluan

Tahap ini mencakup studi literatur untuk mengetahui kondisi geologi daerah penelitian berdasarkan sumber tertulis, termasuk interpretasi awal peta topografi. Selain itu, dilakukan persiapan lapangan, seperti pengadaan peta dasar, peralatan, dan rencana kerja.

### 2.2 Tahapan Pengambilan Data

Pada tahap ini dilakukan pengambilan data berupa:

1. Pengamatan kondisi geologi daerah penelitian dan endapan nikel laterit yang telah dilakukan penambangan.



atan kondisi geologi dan endapan nikel laterit daerah penelitian.



ata elevasi *unmined* di lapangan.

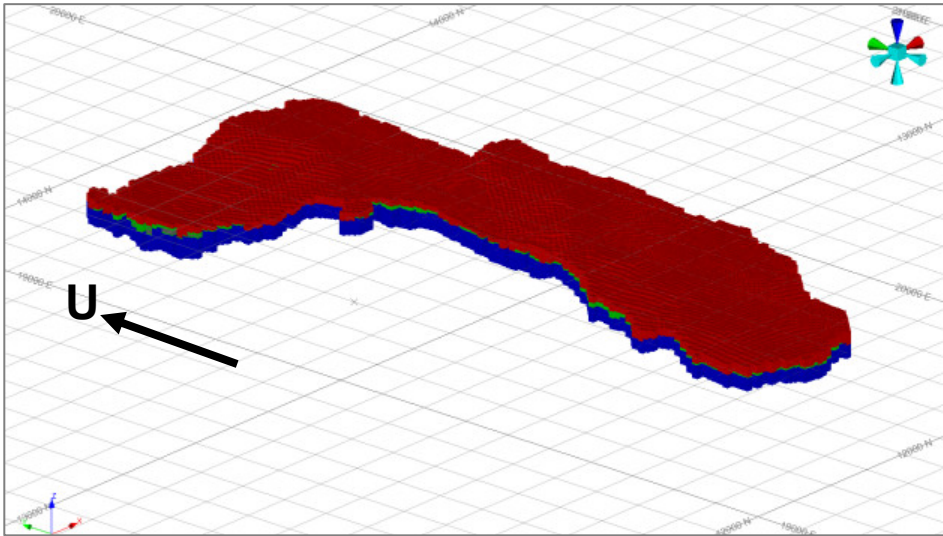


**Gambar 17.** Pengambilan Data Elevasi pada area *Unmined* yang akan dijadikan sebagai area *Disposal*.

3. Pengambilan data sekunder *drillholes* dan blok model daerah penelitian.

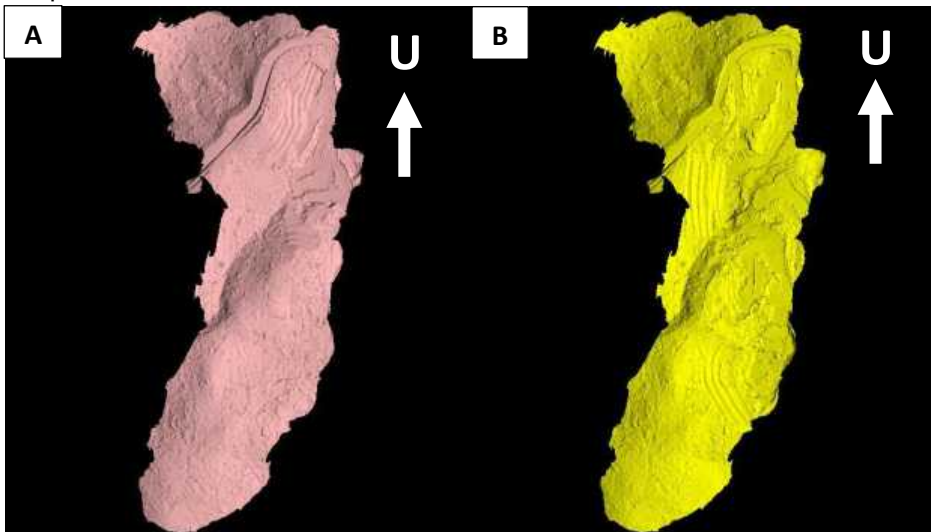
**Gambar 18.** Database *Drillholes* pada daerah penelitian berupa data elevasi tiap material endapan nikel laterit per *drillholes* beserta kandungan kimia per fraksi hingga informasi megaskopis endapan nikel laterit.





**Gambar 19.** Kenampakan Blok Model pada daerah penelitian yang dibuat untuk perhitungan cadangan dalam perencanaan penambangan.

4. Pengambilan data sekunder topografi mingguan saat penambangan daerah penelitian.



**Gambar 20.** Data topografi daerah penelitian dalam bentuk triangulasi dengan (A) Topografi data awal (Februari 2024) dan (B) Topografi data akhir (Mei 2025).



data produksi aktual penambangan yang telah direkapitulasi siliasi dari Desember 2023 hingga Mei 2025, namun yang a penelitian ini terhitung pada Februari 2024 hingga Mei 2025.



2. Analisis pengaruh distribusi kimia dan *pinnacle* endapan nikel laterit terhadap sebaran bijih
  - Analisis distribusi kimia endapan nikel laterit pada elemen Ni, Fe, SiO<sub>2</sub>/MgO, distribusi ini yang ditampilkan hanya sebaran *ore* dengan kadar diatas *Cut-Off grade* menggunakan *software ArcGIS Pro*.
  - Analisis distribusi potensi *pinnacle* endapan nikel laterit, dianalisis berdasarkan kriteria jika suatu *holes* atau blok model secara vertikal memiliki *waste*, maka potensi *pinnacle* dihitung berdasarkan elevasi *topo collar* dikurangi elevasi *top waste*, namun jika tidak memiliki *waste* maka potensi *pinnacle* dihitung berdasarkan tebal *overburden* dan *ore* yang distribusinya divisualisasikan menggunakan *software ArcGIS Pro*. Hal ini dilakukan untuk melakukan identifikasi dalam kesulitan penambangan.
  - Analisis produk endapan nikel laterit, dikategorikan berdasarkan materialnya seperti *overburden*, *ore*, *waste*, dan *bluezone* yang distribusinya divisualisasikan menggunakan *software ArcGIS Pro*. *Overburden* dikategorikan pada lapisan yang berada diatas *ore* dan memiliki kadar (Ni < 1,5%). *Ore* dikategorikan pada lapisan yang berada di bawah *overburden* dan di atas *bluezone* yang memiliki kadar (Ni > 1,5%), terkadang dijumpai *waste* pada pertengahan lapisan *ore* ini. *Ore* dapat di kategorikan menjadi dua berdasarkan zona lateritnya, jika *ore* berada pada zona limonit maka disebut *limonite ore*, dan jika *ore* berada pada zona saprolit maka disebut *saprolite ore*. *Waste* dikategorikan untuk lapisan yang memiliki kadar (Ni < 1,5%) namun berada di dalam interval lapisan *ore* atau lapisan dengan kadar (Ni > 1,5%) namun interval < 2 meter. Distribusi produk endapan nikel laterit ini akan mempengaruhi pada proses selektif penambangan.
3. Analisis sebaran risiko potensi dilusi
  - Analisis sebaran risiko potensi dilusi dilakukan untuk mengidentifikasi cakupan area berisiko rendah, tinggi, maupun sangat tinggi pada daerah penelitian, sehingga mampu diberikan rekomendasi penempatan alat gali sesuai dengan risiko potensi dilusi yang tersebar. Klasifikasi yang digunakan dalam kategori risiko menggunakan klasifikasi yang digunakan di PT. "X".

**Tabel 7.** Klasifikasi parameter penentuan tingkat dilusi PT. "X"

Risk Parameter	Level of Ore Dilution and Ore Loss in Mining			Weight	Level of Risk			Weight x Risk level		
	High	Moderate	Low		High risk	Moderate	Low risk	High risk	Moderate	Low risk
n	2 - 7 m	>7 m		50	3	2	1	150	100	50
n	2 - 5 m	<2 m		20	3	2	1	60	40	20
%	8 - 16%	<8%		15	3	2	1	45	30	15
n	5 - 10 m	>10 m		15	3	2	1	45	30	15
				<b>100</b>				<b>300</b>	<b>200</b>	<b>100</b>



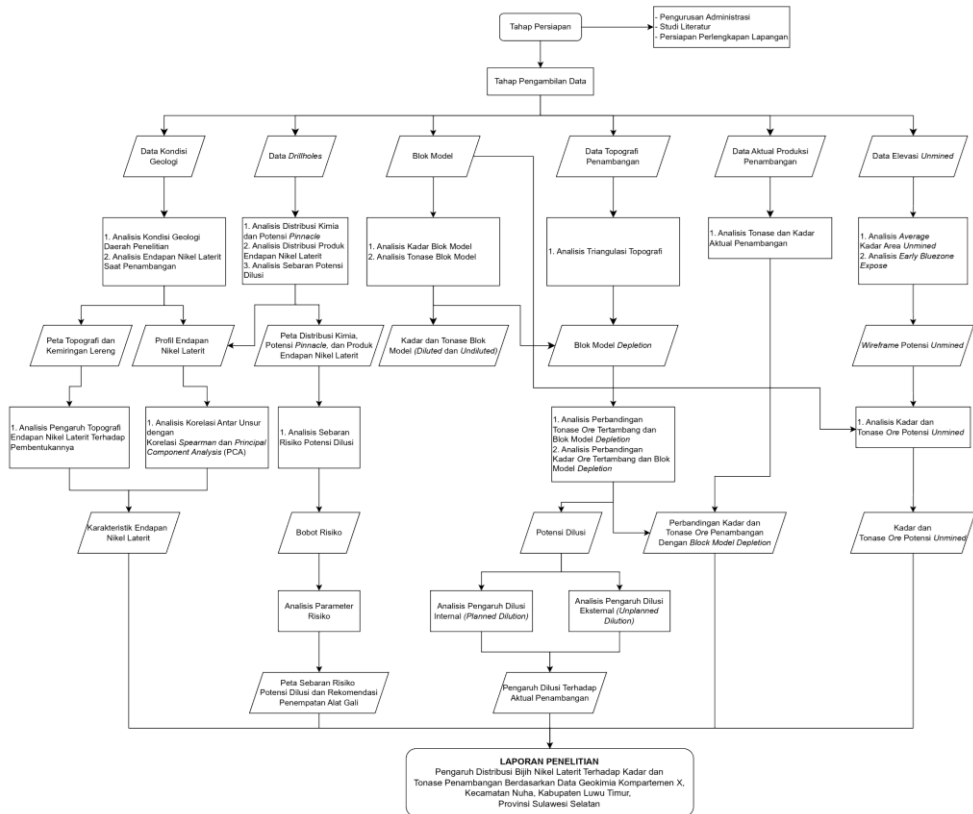
4. Analisis perbandingan blok model dan aktual penambangan
  - Analisis kadar dan tonase blok model dilakukan dengan kalkulasi volume *cell* blok model dan densitas produk endapan nikel laterit menggunakan *software Datamine Studio RM* dan *Microsoft Excel 2019*, yang dianalisis secara *undiluted* (perhitungan hanya *ore*) dan *diluted* (perhitungan *ore* dan *waste*).
  - Analisis perbandingan kadar dan tonase blok model terhadap aktual penambangan menggunakan *Microsoft Excel 2019* dan *Maptek Vulcan*. Dilakukan pemotongan blok model menggunakan triangulasi topografi kemudian dilakukan perhitungan *reserve* yang tertambang untuk menghasilkan tonase dan kadar blok model tertambang sehingga nantinya dapat dibandingkan dengan aktual produksi pada penambangan. Perbandingan dilakukan dengan membandingkan *actual production* dan *block model depletion*. Kemudian dilakukan analisis *relative difference* pada tonase dan kadarnya.
  - Analisis potensi *unmined*, data didapatkan berdasarkan *unmined* yang terjadi secara aktual penambangan yang dilakukan ketika elevasi pada *bluezone* naik dan lebih tinggi dari *wireframe* perencanaan. Sehingga dilakukan pendekatan analisis *early bluezone expose* dengan melihat rata-rata kadar Fe yang *unmined*. Dan pengecekan data *drillholes* dan foto *corebox* untuk memvalidasi *unmined* yang terjadi pada area tersebut menggunakan visualisasi dengan *software Datamine Studio RM*.
5. Analisis pengaruh dilusi terhadap aktual penambangan
  - Analisis pengaruh dilusi internal (*Planned Dilution*), dilakukan dengan analisis *internal waste* yang tertambang saat pemotongan blok model dengan triangulasi *topography* dan juga menganalisis distribusi *waste* daerah penelitian untuk memberikan potensi dilusi internal keseluruhan.
  - Analisis pengaruh dilusi eksternal (*Unplanned Dilution*), dilakukan dengan analisis material yang berpotensi masuk pada area pengambilan *ore*.

Berdasarkan analisis karakteristik endapan nikel laterit, pengaruh distribusi kimia dan *pinnacle*, sebaran risiko potensi dilusi, perbandingan blok model dan aktual penambangan, serta pengaruh dilusi terhadap aktual penambangan yang akan menentukan terkait pengaruh distribusi bijih nikel laterit terhadap kadar dan tonase penambangan pada daerah penelitian. Penelitian ini dibantu menggunakan beberapa *software* diantaranya *ArcGIS Pro*, *Datamine Studio RM*, *Maptek Vulcan 2021* dan *Jamovi*.



#### Penyusunan Laporan

Penelitian dirangkum dalam bentuk laporan tertulis. Laporan ini akan memberikan penjelasan mengenai pengaruh distribusi bijih nikel laterit terhadap tonase penambangan, yang selanjutnya dipresentasikan dalam



Gambar 22. Diagram Alir Penelitian.

