

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia pada dasarnya merupakan negara yang kaya akan sumberdaya alam, terutama bahan tambang yang merupakan sumberdaya alam yang tidak dapat diperbaharui. Salah satu contoh sumberdaya alam tersebut yang sangat penting adalah mineral.(Mubdiana et al., 2015)

Mineral merupakan bahan baku dalam industri pertambangan. Mineral-mineral ekonomis yang terdapat bumi ini perlu ditemukan keberadaannya untuk dapat memenuhi kebutuhan nasional utamanya pada bidang perindustrian. Salah satu sumber daya mineral ekonomis yang terdapat di Indonesia adalah nikel (Mubdiana et al., 2015)

Endapan nikel laterit merupakan hasil dari proses pelapukan dan transformasi kimia batuan ultrabasa. Proses ini terjadi melalui interaksi yang berlangsung lama antara batuan induk dengan air dan udara di permukaan, sehingga menghasilkan konsentrasi unsur nikel di lapisan tanah. Endapan nikel laterit umumnya ditemukan di daerah beriklim tropis, karena iklim tersebut mendukung terjadinya pelapukan intensif akibat suhu tinggi dan curah hujan yang besar. Selain iklim, beberapa faktor lain yang memengaruhi pembentukan endapan nikel laterit antara lain topografi, kondisi drainase, aktivitas tektonik, jenis batuan sumber, dan struktur geologi. Proses pelapukan yang berlangsung secara terus-menerus menyebabkan unsur-unsur mudah larut terhanyut, sementara unsur yang tidak larut seperti nikel tertinggal dan terkonsentrasi di zona tertentu. Seiring waktu, endapan ini mengalami proses pengendapan sekunder dan pembentukan horizon laterit yang khas, dengan tingkat kadar nikel yang bervariasi tergantung pada tingkat pelapukan dan komposisi batuan asal (Elias, 2022)

Dalam kegiatan penambangan nikel laterit, estimasi sumber daya diperlukan untuk menghitung potensi endapan sebelum kegiatan penambangan dilakukan. Estimasi ini berperan penting dalam menentukan kuantitas dan kualitas endapan, karena menghasilkan proyeksi yang akurat mengenai sebaran dan kandungan nikel di lapangan. Estimasi yang baik memungkinkan identifikasi nilai ekonomi dari suatu wilayah tambang, sehingga dapat menjadi dasar bagi investor dalam menilai kelayakan investasi dan mengambil keputusan dalam pengalokasian modal di sektor pertambangan. Metode estimasi yang dapat diterapkan adalah metode Inverse Distance Weighting (IDW) dan *Ordinary Kriging* (OK). Metode IDW mengestimasi nilai berdasarkan jarak antar titik sampel, sedangkan *Kriging* memperhitungkan variabilitas spasial dan korelasi antar data untuk menghasilkan estimasi yang lebih akurat .Penelitian ini bertujuan untuk mengaplikasikan metode IDW dan *Kriging* dalam estimasi sumber daya nikel laterit pada Hill X PT. Citra Lampia Mandiri.

1.2 Tujuan dan Manfaat

1.2.1 Tujuan Penelitian

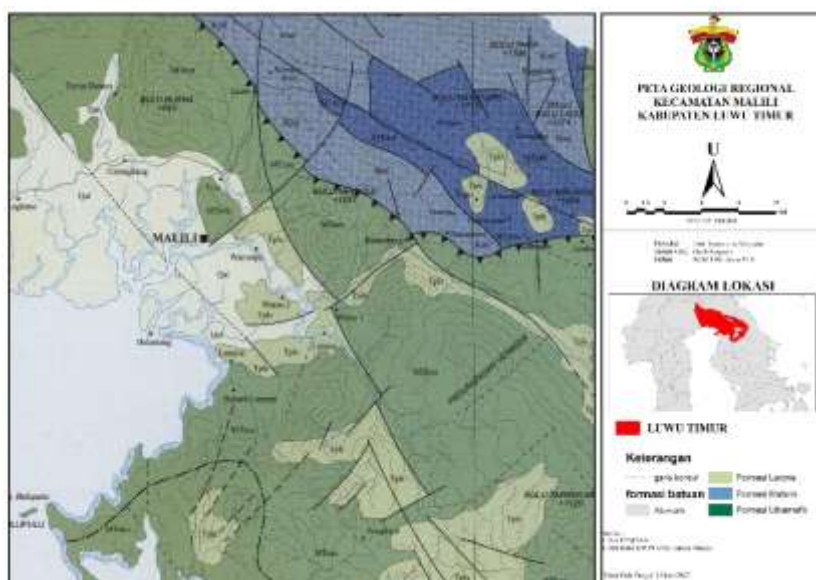
1. Menentukan sumber daya nikel laterit dengan menggunakan metode geostatistik *Inverse Distance weighting* (IDW) dan *Ordinary Kriging* (OK) pada Hill X PT. Citra Lampia Mandiri
2. Mengetahui sebaran endapan nikel laterit di daerah penelitian melalui pemodelan sebaran kadar dalam bentuk blok model berdasarkan data hasil pemboran
3. Menerapkan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dan *Ordinary Kriging* (OK) secara terpadu dalam estimasi sumber daya nikel laterit, sehingga kedua metode saling mendukung untuk menghasilkan estimasi dengan tingkat keyakinan yang lebih tinggi

1.2.2 Manfaat Penelitian

1. Bagi Perusahaan, sebagai bahan pertimbangan dalam memilih metode geostatistik yang paling efektif untuk melakukan estimasi sumber daya nikel laterit pada Hill X PT Citra Lampia Mandiri Luwu Timur
2. Bagi Akademisi, sebagai bahan pembelajaran untuk menambah wawasan dan pemahaman tentang penerapan metode geostatistik dalam estimasi sumber daya nikel laterit pada Hill X PT Citra Lampia Mandiri Luwu Timur

1.3 Landasan Teori

1.3.1 Geologi Regional



Gambar 1. Peta Geologi Lembar Malili (Pusat Survei Geologi, 2025)

Daerah penelitian termasuk dalam Peta Geologi Regional Lembar Malili, yang merupakan bagian dari Mandala Geologi Sulawesi Timur. Secara morfologi, wilayah ini didominasi oleh bentang alam pegunungan, khususnya di bagian tenggara lembar peta, yaitu Pegunungan Verbeek, dengan ketinggian berkisar antara 800 hingga 1.346 meter di atas permukaan laut. Satuan batuan penyusun wilayah ini terdiri atas batuan ofiolit, batuan banchu (melange), dan batu gamping. Stratigrafi daerah penelitian menunjukkan bahwa satuan batuan tertua adalah kompleks ofiolit, yang memanjang dari Pegunungan Balantak di utara hingga Pegunungan Verbeek di tenggara. Kompleks ini terdiri atas batuan ultramafik (MTosu), seperti harzburgit, lherzolit, wehrlit, websterit, serpentinit, dunit, serta batuan mafik seperti gabro dan diabas. Meskipun umur pasti formasi ini belum dapat dipastikan, namun diduga setara dengan umur ofiolit di Lengan Timur Sulawesi, yaitu antara Kapur hingga Awal Tersier.

Di atas satuan ofiolit tersebut terdapat satuan batuan banchu (melange) Wasuponda (Mtmw), yang terbentuk akibat proses subduksi pada Zaman Kapur. Hubungan antara batuan ultramafik dengan Formasi Matano bersifat tektonik dan tidak selaras. Formasi Matano (Kml) selanjutnya terendapkan secara tidak selaras di atasnya. Berdasarkan kandungan fosil foraminifera planktonik seperti *Globotruncana sp.* dan *Heterohelix sp.*, serta keberadaan radiolaria dalam rijang, Formasi Matano diperkirakan berumur Kapur Atas dan diendapkan dalam lingkungan laut dalam. Bagian paling atas stratigrafi wilayah ini terdiri dari endapan aluvium (Ql) yang berumur Kuarter (Herandi et al., 2017)

Berdasarkan pada gambar 1 Peta Geologi Lembar Malili (Pusat Survei Geologi, 2025) satuan batuan yang menyusun wilayah penelitian yakni Wilayah IUP Eksplorasi PT Citra Lampia Mandiri terdiri atas batuan beku kompleks ultrabasa (MTosu). Kompleks ini meliputi jenis batuan seperti harzburgit, lherzolit, wehrlit, websterit, serpentinit, dunit, diabas, dan gabro. Batuan-batuan ini merupakan bagian dari kompleks ofiolit yang umum dijumpai di wilayah Sulawesi Timur. Selain itu, wilayah ini juga tersusun oleh Formasi Larona yang terdiri atas batu pasir, konglomerat, dan batu lempung, dengan sisipan batuan tufaan. Kehadiran formasi ini mencerminkan lingkungan pengendapan yang lebih muda dan bersifat klastik. Struktur geologi yang signifikan di wilayah Sulawesi adalah Sesar Palu-Koro, yang merupakan sesar mendatar aktif dan berperan penting dalam tatanan tektonik regional. Aktivitas sesar ini mempengaruhi pembentukan dan deformasi geologi di sebagian besar wilayah Sulawesi, termasuk area penelitian. (Pusat Survei Geologi, 2025)

1.3.2 Batuan Ultramafic

Batuan ultramafic, yang sering pula disebut sebagai batuan ultrabasa, merupakan batuan induk utama dalam proses pembentukan endapan nikel laterit. Hal ini disebabkan karena batuan ini memiliki kandungan mineral olivin dan piroksen yang tinggi. Batuan ultramafik memiliki kandungan silika (SiO_2) yang rendah, umumnya

kurang dari 45% berat, dan mengandung olivin magnesian (Mg_2SiO_4) dalam jumlah yang signifikan.

Secara geologis, batuan *ultramafic* dapat ditemukan sebagai batuan beku *plutonik* yang terbentuk di kerak bumi atau sebagai batuan *metamorf* yang berasal dari bagian atas mantel bumi. Komposisi mineral utamanya meliputi olivin dan piroksen dengan warna dominan gelap saat masih dalam kondisi segar.

Melalui proses pelapukan kimiawi, mineral-mineral primer dalam batuan *ultramafic* mengalami penguraian. Unsur-unsur kimia yang dilepaskan akan terbawa oleh air dan terendapkan di tempat-tempat tertentu. Proses ini berlangsung lambat dan dinamis dalam waktu geologis yang panjang, sehingga terbentuklah profil laterit, yang merupakan hasil akhir dari tahapan laterisasi.

Adapun jenis-jenis batuan *ultramafic* antara lain:

1. Peridotit

Peridotit merupakan jenis batuan ultramafik yang umum dan sering ditemukan sebagai bagian dari kompleks ofiolit. Batuan ini biasanya memperlihatkan tekstur kumulus, terdiri dari sub-jenis seperti harzburgit, lherzolit, wehrlit, dan dunit. Peridotit bersifat holokristalin dengan ukuran kristal menengah hingga kasar dan bentuk kristal anhedral. Komposisi utamanya adalah olivin dan piroksen, dengan mineral aksesoris seperti plagioklas, hornblende, biotit, dan garnet.

2. Dunit

Dunit adalah batuan ultramafik yang hampir sepenuhnya terdiri dari olivin murni (90–100%). Pembentukan dunit terjadi pada kondisi temperatur tinggi, dalam keadaan padat atau hampir padat, saat kristalisasi magma berlangsung. Ketika suhu menurun namun magma belum sepenuhnya membeku, olivin akan bergabung membentuk massa anhedral yang saling berkaitan. Kehadiran dunit menunjukkan bahwa telah terjadi pemisahan komposisi dalam larutan magma, di mana olivin terkonsentrasi secara dominan.

3. Serpentin

Serpentin merupakan hasil dari alterasi hidrotermal terhadap batuan ultrabasa, seperti peridotit dan dunit. Ketika mineral olivin dan piroksen mengalami proses alterasi oleh fluida panas bumi, terbentuklah mineral serpentin. Batuan serpentin umumnya terdiri dari serpentin monomineralik, dan seringkali merupakan hasil proses serpentinisasi terhadap batuan induk seperti dunit atau peridotit. (Puspita et al., 2022)

1.3.3 Serpentinisasi

Serpentinisasi merupakan suatu reaksi hidrasi eksotermis, yaitu proses di mana air bereaksi dengan mineral mafik seperti olivin dan piroksen, menghasilkan mineral

serpentin seperti lizardit, antigorit, dan krisotil. Proses ini mencakup beberapa mekanisme penting, antara lain: masuknya air ke dalam struktur mineral, pelarutan unsur magnesium (Mg) atau penambahan silika (SiO_2), pelepasan unsur besi dari struktur olivin, serta transformasi besi dari bentuk ferro (Fe^{2+}) menjadi ferri (Fe^{3+}) yang kemudian membentuk magnetit berukuran halus. Oleh karena itu, batuan yang telah mengalami serpentinisasi umumnya menunjukkan sifat kemagnetan yang lebih tinggi.

Kehadiran mineral serpentin dalam batuan ultramafik yang menjadi batuan induk pembentuk tanah laterit dapat memberikan pengaruh signifikan terhadap karakteristik tanah laterit yang terbentuk. Batuan ultramafik sendiri biasanya memiliki kandungan Si yang rendah, namun kaya akan unsur Fe, Mg, serta Ni yang berasal dari mantel bumi. Serpentin memainkan peran penting dalam mengendalikan karakteristik kimia dan fisik tanah laterit, terutama dalam kaitannya dengan proses pengkayaan nikel (Ni). Proses serpentinisasi menyebabkan perubahan tekstur, komposisi mineralogi, serta redistribusi unsur-unsur seperti Mg, Ni, dan Fe dari mineral olivin dan piroksen, yang berdampak langsung terhadap kualitas endapan laterit yang terbentuk. (Kurniadi et al., 2018)

1.3.4 Nikel Laterit

Pada saat ini ada dua jenis bijih nikel yang banyak digunakan sebagai bahan baku untuk membuat logam nikel yaitu sulfida dan laterit. Seiring waktu, cadangan bijih nikel sulfida terus berkurang sehingga beberapa produsen nikel mengalihkan perhatiannya ke bijih nikel laterit untuk digunakan sebagai bahan baku nikel (Subagja et al., 2016).

1. Endapan Nikel Laterit

Nikel laterit adalah endapan yang berasal dari proses pelapukan (laterisasi) dari batuan induk (batuan ultramafik) di mana Indonesia merupakan negara beriklim tropis sehingga memungkinkan pelapukan tinggi dapat terjadi. Nikel merupakan salah satu logam *non-ferrous* yang banyak dibutuhkan pada berbagai aplikasi. Nikel memiliki ketahanan terhadap korosi, kekuatan, kelenturan, dan konduktivitas termal dan listrik yang tinggi sehingga sangat baik untuk digunakan pada berbagai keperluan industri maupun teknologi. Penggunaan utama nikel adalah sebagai bahan baku pembuatan baja tahan karat, logam dasar pada paduan berbasis nikel, *superalloy*, baterai, dan komponen-komponen paduan logam yang digunakan pada aplikasi suhu tinggi (Puspita et al., 2022)

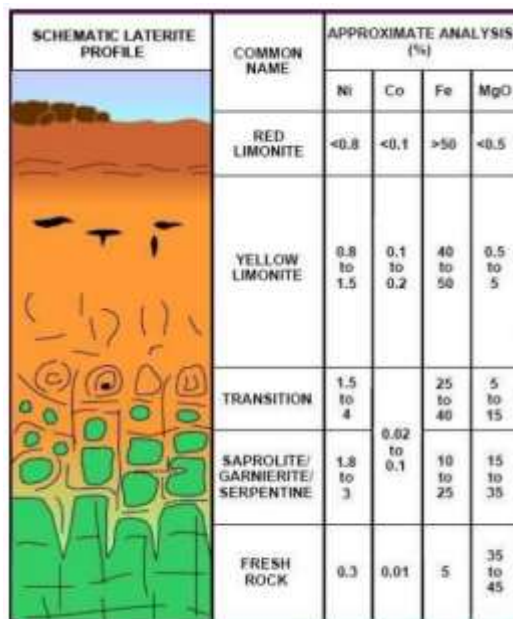
Indonesia adalah salah satu negara yang memiliki endapan bijih nikel laterit dalam jumlah yang cukup besar. Endapan nikel laterit Indonesia tersebar di Sulawesi Selatan, Sulawesi Tenggara, Sulawesi Tengah, Maluku dan Papua. Indonesia merupakan penghasil nikel terbesar ke lima di dunia, sebesar 12% cadangan di dunia. Laterit merupakan hasil proses pelapukan dan pengayaan batuan

mafic/ultramafic di daerah tropis, oleh karena itu komposisi kimia dan mineraloginya berbeda antara satu endapan dengan endapan lainnya (Subagja et al., 2016)

2. Profil Endapan Nikel Laterit

Nikel dalam bijih nikel laterit umumnya berasosiasi dengan oksida besi dan mineral silikat, sebagai hasil dari substitusi isomorfik unsur nikel terhadap besi (Fe) dan magnesium (Mg) dalam struktur kristal mineral. Berdasarkan komposisi kimia dan sifat fisiknya, bijih nikel laterit dapat dibedakan menjadi dua jenis utama, yaitu bijih saprolit (silikat/hidrosilikat) dan bijih limonit (oksida/hidroksida). Laterit terbentuk melalui proses pelapukan intensif batuan ultrabasa di lingkungan beriklim tropis hingga subtropis yang ditandai oleh suhu tinggi dan curah hujan yang tinggi sepanjang tahun. Oleh karena itu, deposit nikel laterit banyak ditemukan di wilayah Indonesia (terutama Sulawesi), serta negara-negara lain seperti New Caledonia, Australia, Kuba, Brasil, Filipina, dan Papua Nugini. Bijih nikel laterit umumnya terdapat pada zona pelapukan dangkal, dengan kedalaman berkisar antara 15 hingga 20 meter di bawah permukaan tanah. Diperkirakan, bijih nikel laterit menyumbang sekitar 60–70% dari total cadangan nikel dunia.

Secara umum, seperti yang terlihat pada gambar 2 deposit nikel laterit dapat dibagi menjadi empat zona utama yaitu zona *ferricrete*, zona limonit, zona saprolit dan *bedrock*. Keempat zona ini memiliki kandungan nikel, besi dan magnesium yang berbeda-beda.



Gambar 2. Ilustrasi profil laterit (Puspita et al., 2022)

- a. Zona *ferricrete*, merupakan bagian paling atas dari deposit nikel laterit yang terdiri dari humus, oksida besi dan sisa organik. Lapisan ini berwarna coklat tua

kehitaman dan bersifat gembur. Kandungan besi pada lapisan ini sangat tinggi (sekitar 60%) dengan komponen mineral utama berupa hematit. Nikel yang terkandung pada zona ini sangat rendah sekitar <0,6%. Biasanya lapisan ini menjadi *overburden* pada saat proses penambangan.

- b. Zona limonit, merupakan zona yang berada di bawah zona *ferricrete* atau top soil yang mana zona ini merupakan hasil pelapukan lebih lanjut dari batuan beku ultramafik. Lapisan ini berwarna merah kecokelatan dan mengandung oksida besi yang umumnya dalam senyawa *goethite* dan *hematite*. Pada zona limonit, kandungan nikelnya berkisar 0,8-1,5%. Sebagian besar nikel berada dalam larutan padat dengan *goethite*. Pada zona ini, kandungan besinya cukup tinggi berkisar antara 40-50%.
- c. Zona saprolit, merupakan zona yang berada di bawah lapisan limonit. Zona saprolit merupakan zona dengan kandungan nikel cukup tinggi. Mineral utama zona ini adalah *serpentine* ($\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) dengan nikel menggantikan Mg untuk membentuk senyawa *garnierite* ($(\text{Mg},\text{In})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$). Kandungan nikel pada zona saprolit berkisar 1,5-3%.
- d. *Bedrock*, merupakan zona paling bawah pada profil laterit. Zona ini terdiri dari bongkahan *periodite* yang berukuran besar yang sudah tidak mengandung mineral ekonomis untuk diolah.

dari keempat zona di atas, saat ini yang ditambang untuk diambil nikelnya adalah zona limonit dan zona saprolit. Bijih limonit dan saprolit memiliki karakter yang berbeda dan bervariasi dari satu tempat dengan tempat lain (Puspita et al., 2022)

3. Genesa Endapan Nikel Laterit

Proses pembentukan nikel laterit dimulai dengan adanya batuan beku ultrabasa sebagai batuan induk. Batuan induk ultrabasa tersusun atas mineral olivin dan piroksen yang mudah mengalami pelapukan kimia. Pelapukan tersebut membuat komposisi kimia dan mineralogi batuan berubah. Unsur nikel dalam batuan beku ultrabasa terdapat pada kristal olivin dan piroksen yang merupakan hasil substitusi atom Fe dan Mg. Proses substitusi unsur ini, Fe dan Mg ini dapat terjadi karena unsur tersebut memiliki radius ion dan muatan ion yang hampir sama.

Faktor yang memengaruhi pembentukan bijih nikel laterit menurut Waheed, 2008 yaitu batuan asal (*bedrock*), topografi, iklim, reagen kimia, vegetasi, waktu dan struktur geologi.

- a. Batuan asal pembawa nikel laterit adalah batuan beku ultrabasa yang secara kimia mengandung kurang dari 45% SiO_2 komposisi utama adalah olivin dan piroksen.
- b. Topografi, sebaran ketebalan endapan residual nikel laterit berhubungan dengan kemiringan lereng yang berkembang di suatu wilayah. Pada kemiringan lereng yang berbeda akan terdistribusi endapan yang geometri ketebalannya juga akan berbeda. Gradien lereng akan memengaruhi proses

pelapukan batuan induk. Pada saat kemiringan lereng curam, maka proses dominan yang bekerja adalah pengikisan batuan (erosi).

- c. Iklim, kondisi iklim yang ekstrim sangat dibutuhkan dalam proses pembentukan nikel laterit. Tingginya intensitas curah hujan dan perubahan temperatur yang signifikan akan memengaruhi proses pelapukan pada batuan dasar.
- d. Reagen kimia dan vegetasi. Reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu proses pelapukan. Pelapukan kimia yang terjadi dapat disebabkan oleh air tanah yang mengandung CO_2 selain itu juga hadirnya asam humus dapat menyebabkan dekomposisi batuan.
- e. Waktu, waktu yang dibutuhkan dalam proses laterisasi tiap ketebalan 1 mm cukup lama sekitar 100 tahun.
- f. Struktur, di mana tingginya intensitas struktur geologi di lapangan ditampilkan dalam patahan, lipatan dan kekar pada batuan.

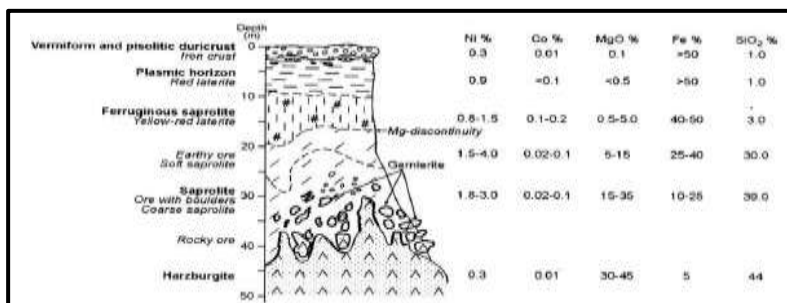
Hadirnya rekahan pada tubuh batuan induk akan membantu proses kimiawi. Rekahan yang terjadi pada batuan, reagen kimia lainnya saat proses pelindian memudahkan air dalam melakukan penetrasi (Harahap & Novitasari, 2022)

1.3.5 Klasifikasi Endapan Nikel Laterit

Secara mineralogi Nikel Laterit dapat dibagi dalam tiga kategori yaitu (Brandl, 1998)

1. *Hydrous Silicate deposits*

Pada endapan tipe *Hydrous Silicate*, seperti yang terlihat pada gambar 3 bagian bawah zona *saprolite* (horizon bijih) didominasi oleh mineral-mineral hydrous Mg-Ni silikat setempat pada zona *saprolite*, urat-urat halus atau box-work dapat terbentuk. Rekahan dan batas-batas antar butir dapat terisi oleh mineral silikat dan mineral yang kaya dengan nikel. Sebagai contoh garnierit dapat memiliki kandungan nikel sampai dengan 40%. (Brandl, 1998)

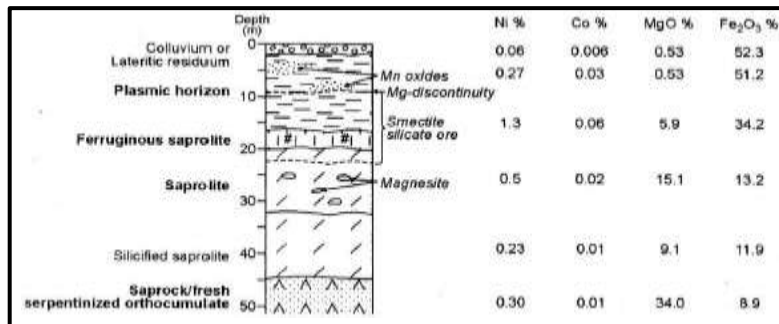


Gambar 3. Profil Nikel Tipe *Hydrous Silicate* (Brandl, 1998)

2. *Clay silicate deposits*

Silika (Si) dari profil laterit, hanya sebagian yang terlindungi oleh air tanah. Silika yang tersisa bersama-sama dengan Fe, Ni, dan Al membentuk mineral lempung

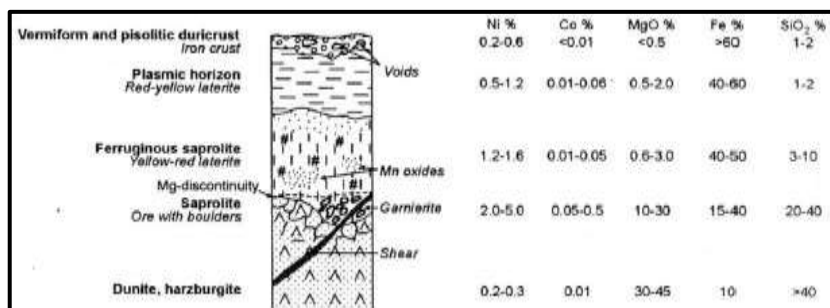
seperti Ni-rich nontronite pada bagian tengah sampai dengan bagian atas zona saprolit. Serpentin yang kaya dengan nikel juga bisa digantikan (teraltrasi) oleh smektit pada bagian yang kontak dengan air tanah sehingga larutan-larutan yang terbentuk menjadi jenuh dengan mineral-mineral lempung ini (gambar 4). Secara umum, kadar nikel rata-rata pada tipe endapan ini lebih rendah dibandingkan dengan tipe Hydrous Silicate.(Brandl, 1998)



Gambar 4. Profil Nikel Tipe *Clay Silicate* (Brandl, 1998)

3. Oxide deposits

Oxide deposit dikenal juga dengan nama endapan *limonite* (gambar 5), dimana nikel berasosiasi dengan Fe-oxyhidroxide, dengan mineral utama geotit. Kadang-kadang juga kaya dengan oksida Mn yang kaya dengan Co Kadar Ni rata-rata pada tipe endapan ini lebih rendah 1.0-1.6%, sehingga memiliki nilai ekonomis yang kurang baik. Pada endapan tipe oxide deposit posisi muka air tanah awal relatif dangkal dan drainasenya tidak terhambat (infiltrasi air lancar) sehingga Ni lebih banyak terakumulasi pada zona *limonite* sampai *saprolite* bagian atas.(Brandl, 1998)



Gambar 5. Profil Nikel Tipe *Oxide Deposits*(Brandl, 1998)

1.3.6 Klasifikasi Sumber Daya Mineral

Sumber daya mineral merupakan konsentrasi atau keterjadian alami dari material yang bernilai ekonomi yang terdapat di atau dekat permukaan bumi. Material tersebut harus memiliki bentuk, kadar, dan jumlah tertentu serta memberikan prospek yang masuk akal untuk diekstraksi secara ekonomis di masa mendatang. Estimasi sumber

daya ini harus didasarkan pada data dan bukti geologi yang dapat dipertanggungjawabkan, termasuk hasil eksplorasi dan pengambilan contoh yang memadai.

Berdasarkan tingkat keyakinan geologi dan kualitas data pendukungnya pada gambar 6, sumber daya mineral dibagi menjadi tiga kategori utama, yaitu sumber daya tereka, tertunjuk, dan terukur.

1. Sumberdaya mineral tereka

Sumber daya mineral tereka merupakan kategori dengan tingkat keyakinan geologi paling rendah. Estimasi dilakukan berdasarkan bukti geologi dan data percontohan yang masih terbatas. Meskipun data tersebut cukup untuk menunjukkan adanya mineralisasi, namun belum dapat memverifikasi secara meyakinkan kemenerusan geologi dan distribusi kadar di antara titik pengamatan.

Kategori ini umumnya mencerminkan tahap awal eksplorasi. Oleh karena itu, penggunaannya dalam studi teknis dan keekonomian harus dilakukan dengan sangat hati-hati. Sumber daya tereka tidak dapat langsung dikonversi menjadi cadangan mineral karena ketidakpastian yang tinggi. Namun demikian, dengan eksplorasi lanjutan, kategori ini dapat ditingkatkan menjadi sumber daya tertunjuk.

2. Sumber daya mineral tertunjuk

Kategori ini memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi dibandingkan sumber daya tereka. Estimasi dilakukan berdasarkan data eksplorasi, percontohan, dan pengujian yang lebih rinci dan andal. Informasi geologi, bentuk tubuh bijih, kadar, dan kerapatan cukup untuk mengasumsikan kemenerusan secara spasial antar titik pengamatan.

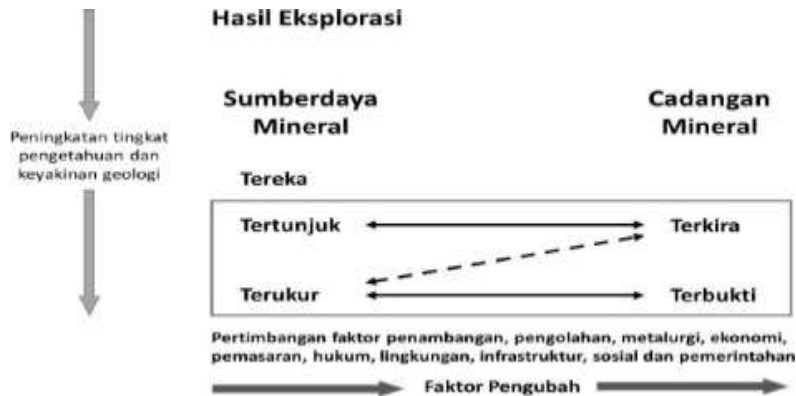
Sumber daya tertunjuk sudah dapat digunakan untuk melakukan studi awal terhadap kelayakan teknis dan ekonomi. Data yang tersedia memungkinkan penerapan parameter modifikasi (modifying factors) secara awal, serta menjadi dasar dalam pengembangan model geologi dan desain tambang. Sumber daya pada kategori ini dapat dikonversi ke dalam bentuk cadangan mineral terkira.

3. Sumber daya mineral terukur

Sumber daya mineral terukur memiliki tingkat keyakinan paling tinggi. Estimasi didasarkan pada data eksplorasi dan pengujian yang sangat detail, serta memiliki keandalan tinggi dalam menggambarkan bentuk, kadar, kerapatan, dan sebaran tubuh bijih. Kemenerusan geologi dan distribusi kadar antar titik pengamatan dapat dipastikan dengan sangat baik.

Karena tingkat keyakinannya yang tinggi, sumber daya terukur dapat digunakan untuk melakukan evaluasi kelayakan ekonomi secara rinci dan mendalam. Kategori ini dapat langsung dikonversi menjadi cadangan mineral terbukti atau terkira, tergantung pada hasil analisis keekonomian dan teknis lanjutan.(KMCI, 2017).

Hubungan umum antara hasil eksplorasi sumber daya dan cadangan dapat dilihat pada gambar di bawah ini



Gambar 6. Hubungan umum antara hasil eksplorasi, sumber daya mineral dan cadangan mineral(KMCI, 2017)

1.3.7 Metode Geostatistik

Metoda geostatistik adalah suatu metode yang digunakan untuk menaksirkan besarnya nilai karakteristik pada titik lokasi yang tidak tersampel berdasarkan data titik tersampel sekitarnya, dengan mempertimbangkan korelasi spasial yang ada dalam data tersebut (Safrudin et al., 2021)

1. *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) secara langsung mengimplementasikan asumsi bahwa objek-objek yang saling berdekatan memiliki kemiripan yang lebih tinggi dibandingkan dengan objek-objek yang berjauhan. Untuk menaksir nilai pada suatu lokasi yang tidak memiliki data pengukuran, metode IDW menggunakan nilai-nilai dari titik data terdekat yang mengelilingi lokasi tersebut. Dalam metode ini, diasumsikan bahwa tingkat kemiripan dan korelasi antara titik yang ditaksir dengan titik-titik data di sekitarnya berbanding terbalik dengan jaraknya. Artinya, semakin dekat suatu titik data, semakin besar bobot atau kontribusinya terhadap nilai estimasi.

Bobot ditentukan berdasarkan fungsi jarak, di mana nilainya menurun seiring meningkatnya jarak dari titik yang ditaksir. Namun demikian, bobot yang diberikan kepada masing-masing titik data hanya bergantung pada jarak antara titik data tersebut dengan titik estimasi yang akan dihitung, dan tidak dipengaruhi oleh posisi relatif antar titik data penaksir.

Faktor penting yang dapat mempengaruhi hasil penaksiran antara lain adalah parameter *power* dan radius di sekitar (*neighboring radius*) atau jumlah data penaksir. Parameter *power* berfungsi untuk mengatur seberapa besar pengaruh jarak

antar titik terhadap pembobotan dalam proses estimasi. Nilai parameter power yang umum digunakan adalah: 1, 2, 3, 4 dan 5.

Persamaan IDW yang digunakan dalam pembobotan adalah sebagai berikut:

$$w_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (1)$$

Untuk menghitung nilai titik yang ditaksir digunakan persamaan berikut:

$$\hat{Z}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i \times w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

dengan,

$\hat{Z}_0$ = Nilai titik yang di taksir

w_i = Faktor bobot dari titik-i

Z_i = Nilai dari titik data ke-i

d_i = Jarak antara titik i dengan titik yang ditaksir

p = Faktor eksponen (*power*) (Purnomo, 2018)

2. Kriging

Kriging merupakan suatu metode analisis data geostatistik yang digunakan untuk menduga besarnya nilai yang mewakili suatu titik yang tidak tersampel berdasarkan titik tersampel yang berada di sekitarnya dengan menggunakan model struktural *semivariogram*. Kriging juga merupakan suatu metode yang digunakan untuk menonjolkan metode khusus yang meminimalkan variansi dari hasil pendugaan .

Jika dilihat secara umum, metode Kriging adalah suatu metode analisis geostatistik untuk menginterpolasi suatu nilai kandungan sebagai contoh kandungan mineral, berdasarkan data sampel yang diambil di tempat-tempat yang tidak beraturan.

Dalam metode Kriging, terdapat berbagai jenis pendekatan yang dapat digunakan, yang dibedakan berdasarkan diketahui atau tidaknya nilai rata-rata (mean) dari data yang digunakan. Tiga jenis Kriging yang paling umum adalah

a. Simple Kriging

Simple Kriging merupakan salah satu metode dalam Kriging yang mengasumsikan bahwa nilai rata-rata (mean) dari populasi data yang digunakan telah diketahui dan bersifat konstan di seluruh wilayah. Dengan kata lain, pada Simple Kriging, rata-rata dianggap tetap dan tidak berubah di sepanjang area yang dianalisis.

b. Ordinary Kriging

Ordinary Kriging merupakan salah satu metode dalam Kriging yang mengasumsikan bahwa nilai rata-rata (mean) dari populasi data tidak diketahui dan tidak bersifat konstan di seluruh area yang dianalisis. Dalam pendekatan ini, nilai rata-rata dianggap berbeda di setiap lokasi dan tidak ada informasi eksplisit yang tersedia tentang nilai rata-rata tersebut.

c. Universal Kriging

Universal Kriging adalah metode dalam Kriging yang digunakan untuk data spasial yang mengandung tren atau data yang tidak stasioner. Dalam hal ini, "tidak stasioner" berarti bahwa nilai rata-rata dari data berubah secara sistematis di sepanjang wilayah atau area studi, seperti adanya gradien atau pola tertentu yang mempengaruhi distribusi data.. (Rozalia et al., 2016)

3. Ordinary Kriging

Penduga parameter *Ordinary Kriging* $\hat{Z}(s)$ merupakan kombinasi linear. Kombinasi linear adalah penjumlahan hasil kali anggota himpunan pasangan berurutan. Penduga *kriging* $\hat{Z}(s)$ merupakan kombinasi linear dari variabel sampel $\hat{Z}(s_i)$ yang diketahui atau ditulis secara matematis sebagai berikut:

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n w_i Z(s_i) \quad (3)$$

dengan,

- $\hat{Z}(s)$ = nilai pendugaan pada lokasi tidak tersampel
- w_i = koefisien bobot dari $Z(s_i)$, dengan $\sum_{i=1}^n w_i = 1$
- $Z(s_i)$ = nilai pada lokasi tersampel
- n = banyak sampel (Safrudin et al., 2021)

Untuk memperoleh suatu pendugaan $\hat{Z}(s)$ di titik P dari 3 titik observasi yang diketahui yaitu, Z_1, Z_2, Z_3 dengan bobot masing-masing untuk persamaan *Ordinary Kriging* yaitu: w_1, w_2, w_3 . Untuk memperoleh solusi yang diinginkan, diperlukan 3 persamaan simultan berikut dan ditambahkan dengan 1 persamaan persyaratan yaitu, penjumlahan semua bobot adalah sama dengan 1. Sehingga dijabarkan terdapat 4 persamaan sebagai berikut:

$$w_1\gamma(h_{11}) + w_2\gamma(h_{12}) + w_3\gamma(h_{13}) = \gamma(h_{1p}) \quad (4)$$

$$w_1\gamma(h_{21}) + w_2\gamma(h_{22}) + w_3\gamma(h_{23}) = \gamma(h_{2p}) \quad (5)$$

$$w_1\gamma(h_{31}) + w_2\gamma(h_{32}) + w_3\gamma(h_{33}) = \gamma(h_{3p}) \quad (6)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1 \quad (7)$$

Untuk menghasilkan solusi yang memiliki galat penduga minimum ditambahkan suatu variabel *slag* λ pada persamaan (4), (5) dan (6). Dengan demikian, keempat persamaan di atas menjadi:

$$w_1\gamma(h_{11}) + w_2\gamma(h_{12}) + w_3\gamma(h_{13}) + \lambda = \gamma(h_{1p}) \quad (8)$$

$$w_1\gamma(h_{21}) + w_2\gamma(h_{22}) + w_3\gamma(h_{23}) + \lambda = \gamma(h_{2p}) \quad (9)$$

$$w_1\gamma(h_{31}) + w_2\gamma(h_{32}) + w_3\gamma(h_{33}) + \lambda = \gamma(h_{3p}) \quad (10)$$

$$w_1 + w_2 + w_3 + 0 = 1 \quad (11)$$

Sistem persamaan (8), (9), (10) dan (11) dapat ditulis dalam bentuk matriks sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \gamma(h_{13}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \gamma(h_{23}) & 1 \\ \gamma(h_{31}) & \gamma(h_{32}) & \gamma(h_{33}) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \gamma(h_{3p}) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Atau persamaan dapat ditulis sebagai berikut:

$$A w = B \quad (13)$$

Jadi untuk memperoleh w digunakan persamaan berikut (Rozalia et al., 2016):

$$w = A^{-1}B \quad (14)$$

1.3.8 Variogram dan Semivariogram

Variogram merupakan perangkat statistik yang diperlukan untuk melakukan pendugaan pada data spasial, karena jika ada dua buah nilai spasial yang letaknya berdekatan, maka akan relatif bernilai sama dibandingkan dengan dua buah nilai spasial yang letaknya berjauhan. *Variogram* dirumuskan sebagai berikut:

$$2\gamma(h) = E[Z(s) - Z(s + h)]^2 \quad (15)$$

Untuk melakukan pendugaan pada data spasial, digunakan suatu perangkat untuk menggambarkan, memodelkan dan menghitung korelasi spasial antara variabel random $Z(s)$ dan $Z(s + h)$, yang disebut dengan *semivariogram* yang besarnya setengah dari nilai *variogram*. *Semivariogram* dapat di definisikan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[Z(s) - Z(s + h)]^2 \quad (16)$$

dengan:

$\gamma(h)$ = nilai *semivariogram* pada jarak h

E = nilai harapan (ekspektasi)

$Z(s)$ = nilai variabel pada lokasi s

$Z(s + h)$ = nilai variabel pada lokasi lain yang berjarak h dari s (Rozalia et al., 2016)

Semivariogram dibedakan menjadi dua yaitu *semivariogram* eksperimental dan *semivariogram* teoritis. *Semivariogram* eksperimental didapatkan dari data pengamatan yang diplot sebagai fungsi jarak. Sebelum dilakukan perhitungan nilai *semivariogram* eksperimental, terlebih dahulu dihitung jarak antar titik data pengamatan menggunakan prinsip Euclidean dengan menggunakan persamaan berikut:

$$h_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (17)$$

dengan:

- h_{ij} = jarak antara lokasi data ke- i dan lokasi data ke- j
 x_i = titik koordinat absis lokasi data ke- i
 x_j = titik koordinat absis lokasi data ke- j
 y_i = titik koordinat ordinat lokasi data ke- i
 y_j = titik koordinat ordinat lokasi data ke- j
 z_i = titik koordinat elevasi lokasi data ke- i
 z_j = titik koordinat elevasi lokasi data ke- j (Sarita et al., 2024)

Kemudian Untuk mendapatkan *semivariogram eksperimental* digunakan persamaan berikut:

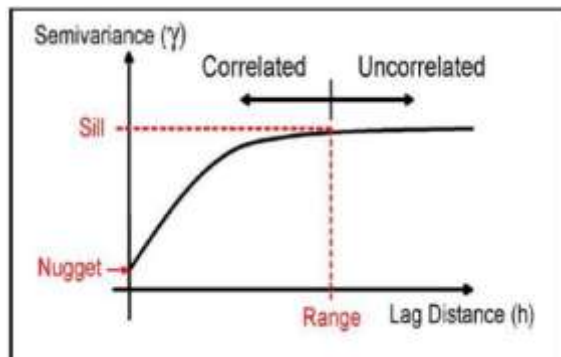
$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2(N(h))} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z_{(S_i+h)} - Z_{(S_i)}]^2 \quad (18)$$

dengan:

- $\hat{\gamma}(h)$ = *semivariogram eksperimental*
 $Z_{(S_i+h)}$ = nilai pengamatan pada titik $S_i + h$
 $Z_{(S_i)}$ = nilai pengamatan pada titik S_i
 $N(h)$ = banyaknya pasangan titik dengan jarak h (Sarita et al., 2024)

Pada *semivariogram eksperimental* (gambar 7) terdapat tiga parameter penting yaitu:

- Sill* (C) merupakan titik di mana nilai tertinggi dari *semivariogram* sehingga cenderung mencapai nilai yang stabil.
- Nugget* (C_0) merupakan nilai yang mendekati titik nol yang menunjukkan kesalahan analisis.
- Range* (a) merupakan nilai dengan jarak paling jauh pada saat mencapai *sill* yang membatasi antara nilai yang berkorelasi spasial dengan nilai yang tidak berkorelasi spasial.

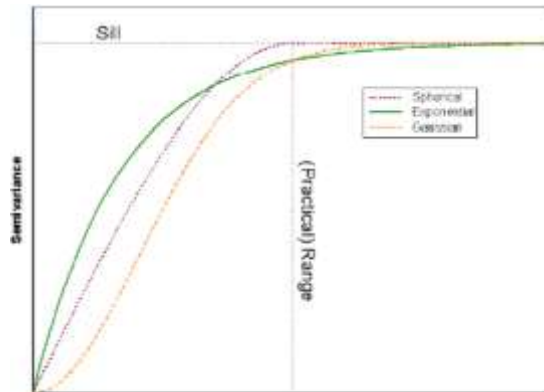


Gambar 7. *Semivariogram Eksperimental* (Sarita et al., 2024)

Setelah diperoleh nilai *semivariogram eksperimental*, maka diperhitungkan parameter-parameter untuk perhitungan *semivariogram teoritis*.

Semivariogram teoritis (gambar 8) adalah *semivariogram* dengan kurva yang mendekati kurva *semivariogram eksperimental* yang sebelumnya telah didapatkan.

Semivariogram teoritis terdiri dari beberapa model yang digunakan sebagai pembandingan dari *semivariogram eksperimental*, di antaranya:



Gambar 8. Model *Semivariogram Teoritis* (Sarita et al., 2024)

1. Model *Spherical*

Model ini paling sering digunakan dalam aplikasi geostatistik. Nilai semivariogram meningkat seiring bertambahnya jarak hingga mencapai nilai maksimum (*sill*), kemudian menjadi konstan. Model ini menggambarkan hubungan spasial yang cukup kuat pada jarak dekat dan menurun pada jarak yang lebih jauh. Model semivariogram *spherical*, dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & \text{untuk } h \leq a \\ C_0 + C & \text{untuk } h > a \end{cases} \quad (19)$$

2. Model *Eksponensial*

Model *eksponensial* menunjukkan peningkatan semivariogram yang cepat pada jarak pendek, kemudian naik secara perlahan mendekati nilai maksimum (*sill*) secara asimtotik. Model ini cocok untuk data yang menunjukkan korelasi spasial jangka pendek dengan transisi yang bertahap dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{3h}{a} \right) \right] \quad (20)$$

3. Model *Gaussian*

Model *Gaussian* memiliki bentuk kurva yang sangat halus dan parabolis pada jarak pendek. Model ini mencerminkan korelasi spasial yang sangat tinggi pada jarak sangat dekat, lalu menurun perlahan seiring bertambahnya jarak. Model *Gaussain* dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{3h^2}{a^2} \right) \right] \quad (21)$$

dengan,

h = jarak lokasi sampel.

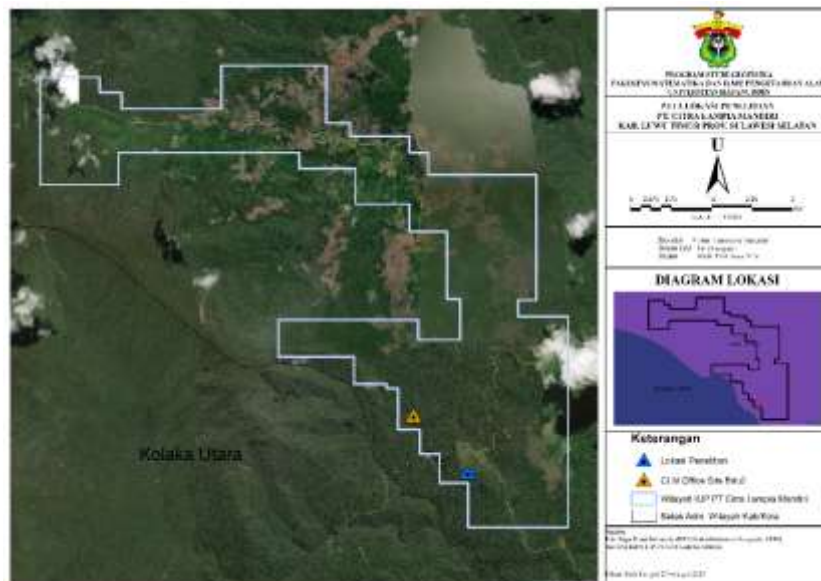
$C_0 + C$ = *sill* nilai semivariogram untuk jarak pada saat besarnya konstan.

h = *range* yaitu jarak pada saat nilai semivariogram mencapai *sill* (Rozalia et al., 2016)

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan pada wilayah Izin Usaha Pertambangan (IUP) PT Citra Lampia Mandiri Luwu Timur (gambar 9) yang dilaksanakan dari tanggal 6 Januari 2025 sampai dengan 1 Maret 2025.



Gambar 9. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Sumber Data

1. Data Topografi

Data topografi (Tabel 1) memuat informasi tentang ketinggian suatu area, yang diperoleh dari penginderaan jauh menggunakan teknologi Lidar. Setelah diproses, data ini dikonversi menjadi *Digital Terrain Model* (DTM), yang merupakan model digital tiga dimensi dari permukaan bumi. Pada penelitian ini, data topografi digunakan sebagai batas atas untuk pemodelan geologi.

Tabel 1. Data topografi

Kode Warna	Northing (m)	Easting (m)	Elevasi (m)	Kode
2	9686705	299049.4	340.86	D
2	9686703	298998.2	349.429	D
2	9686703	298946.6	350.935	D
2	9686701	298903.9	355.223	D
2	9686750	298895.8	363.579	D

2. Data Collar

Data *collar* merupakan kumpulan informasi tentang koordinat dan kedalaman lubang bor. Data ini memungkinkan perangkat lunak menampilkan titik bor sesuai dengan lokasi sebenarnya. Pada penelitian ini, data *collar* mencakup 35 titik bor

Tabel 2. Data collar

Hole ID	X (m)	Y (m)	Z (m)	Depth (m)
AK-001	567890.12	9023456.78	350	30
AK-002	567895.35	9023461.98	375	25
AK-003	567899.56	9023470.45	320	28
AK-004	567890.45	9023480.30	380	30
AK-005	567902.15	9023492.67	340	29

Tabel 2 merupakan format data collar pada aplikasi MS. Excel. yang telah di olah. Informasi yang disajikan pada tabel tersebut yaitu seperti disajikan seperti nama Hole ID (lubang bor), koordinat lintang (Y), koordinat bujur (X), ketinggian (Z) dan kedalaman dari lubang bor

3. Data Assay

Data *assay* memuat informasi tentang kadar dari setiap titik bor, dengan analisis yang dilakukan pada setiap lapisan setebal satu meter. Data ini juga berisi parameter seperti *from*, *to*, serta detail karakteristik tiap lapisan. Selain itu, data *assay* digunakan untuk menentukan jenis lapisan endapan nikel laterit. Dalam penelitian ini, terdapat 627 data *assay* yang berasal dari 35 titik bor.

Tabel 3. Data assay

Hole ID	Depth From (m)	Depth To (m)	Ni (%)	Fe (%)	Co (%)	Mn (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)	Al ₂ O ₃ (%)
AK-001	0	1	1.20	3.5	0.10	0.05	50.0	2.5	10.0
AK-001	1	2	1.25	3.6	0.11	0.06	49.8	2.6	10.2
AK-001	2	3	1.30	3.7	0.12	0.06	49.5	2.7	10.3
AK-001	3	4	1.35	3.8	0.13	0.07	49.2	2.8	10.5
AK-001	4	5	1.40	3.9	0.14	0.08	48.8	2.9	10.7

Tabel 3 merupakan format data assay pada aplikasi MS. Excel. yang telah di olah. Informasi yang disajikan pada tabel tersebut yaitu seperti nama Hole ID (lubang bor), kedalaman awal, kedalaman akhir, persentase kadar nikel, besi, cobalt, mangan, silikon dioksida, magnesium oksida dan aluminium oksida.

4. Data Survey

Data *survey* berisi informasi tentang kedalaman maksimum, *azimuth*, dan *dip* dari tiap titik bor. Pada endapan nikel laterit, pengeboran dilakukan secara tegak lurus dengan nilai *azimuth* 0° dan *dip* -90° untuk menyesuaikan dengan struktur berlapisnya. Jumlah data *survey* dalam penelitian ini mencapai 35 titik

Tabel 4. Data survey

Hole ID	Total Depth (m)	Dip (°)	Azimuth (°)
AK-001	30	-90	0
AK-002	25	-90	0
AK-003	28	-90	0
AK-004	35	-90	0
AK-005	32	-90	0

Tabel 4 merupakan format data Survey pada aplikasi MS. Excel. yang telah diolah. Informasi yang disajikan pada tabel tersebut yaitu seperti disajikan seperti nama Hole ID (lubang bor), kedalaman maksimal, kemiringan (Dip), dan sudut Horizontal (Azimut) pada setiap lubang bor.

5. Data Geologi

Data geologi berisi informasi mengenai jenis zona dalam endapan nikel laterit. Proses penentuan litologi dilakukan dengan interval kedalaman satu meter. Endapan ini terdiri dari tiga lapisan utama, yaitu *limonite*, *saprolite*, dan *bedrock*

Tabel 5. Data geologi

Hole ID	Depth From (m)	Depth To (m)	Layer
AK-001	0	1	LIM
AK-001	1	2	LIM
AK-001	2	3	LIM
AK-001	3	4	SAP
AK-001	4	5	SAP

Tabel 5 merupakan format data Geologi pada aplikasi MS. Excel. yang telah di olah. Informasi yang disajikan pada tabel tersebut yaitu seperti disajikan seperti nama Hole ID (lubang bor), kedalaman awal, kedalaman akhir, dan jenis litologi yang di analisis setiap 1 meter pada setiap lubang bor.

2.3 Pengolahan Data

1. Validasi Data

Proses validasi data sebelum melanjutkan ke tahap estimasi sangat penting untuk memastikan bahwa data yang digunakan akurat dan dapat diandalkan. Dalam konteks ini, validasi bertujuan untuk memverifikasi pengklasifikasian lapisan batuan,

seperti limonit, saprolit, dan bedrock, dengan menggunakan data mineral acuan, seperti Fe (besi), MgO (magnesium oksida), dan SiO₂ (silika) dengan persentase yang ditunjukkan pada tabel 6

Tabel 6. Presentase Mineral Acuan pada Tiap Lapisan

Layer	Fe (%)	MgO (%)	SiO ₂ (%)
<i>Limonite</i>	> 35	< 5	< 10
<i>Saprolite</i>	10 – 35	5 – 30	10 – 40
<i>Bedrock</i>	< 10	> 30	> 40

2. Pembuatan *Database*

Pembuatan *Database* (gambar 10) merupakan langkah awal sebelum melakukan estimasi sumber daya yang diawali dengan penyusunan data *assay*, *collar*, *survei*, dan *geologi* yang dibuat dengan bantuan *software MS. Excel 2019* dengan format *comma separated value* (CSV). Data data tersebut dibuat dalam tabel secara teratur, sistematis dan dilakukan dengan teliti untuk mempermudah proses pengolahan data dan untuk mengurangi terjadinya *error* pada saat dilakukan *import* data pada *software surpac 6.3*



```

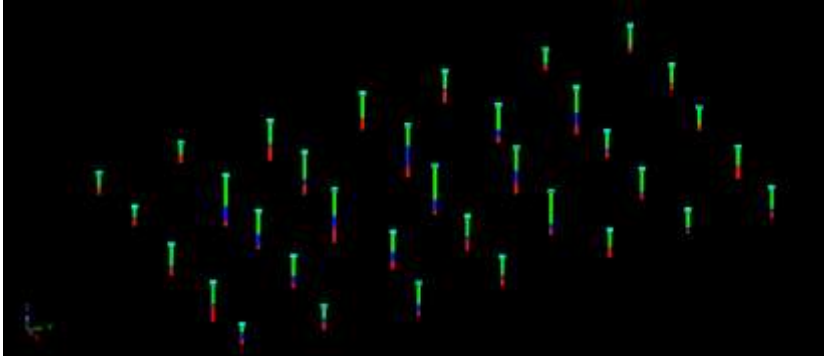
*geologi_database - Notepad
File Edit Format View Help
Database Management - Database Load Report Feb 18, 2025
Date : 18-Feb-25
Database : geologi_database
Format_file : geologi_database.dsc
=====
Loading Table : collar from file Data Collar.csv
=====
35 records were inserted.
0 records were updated.
0 records were rejected.
Loading Table : survey from file Data Survey.csv
=====
35 records were inserted.
0 records were updated.
0 records were rejected.
Loading Table : assay from file Data Assay.csv
=====
627 records were inserted.
0 records were updated.
0 records were rejected.
Performing sample overlap checks
no overlapping samples were found
Loading Table : geologi from file Data Geologi.csv
=====
627 records were inserted.
0 records were updated.
0 records were rejected.
Performing sample overlap checks
no overlapping samples were found
Page 1 of 1

```

Gambar 10. Report database yang telah di *import*

3. Display Drillhole

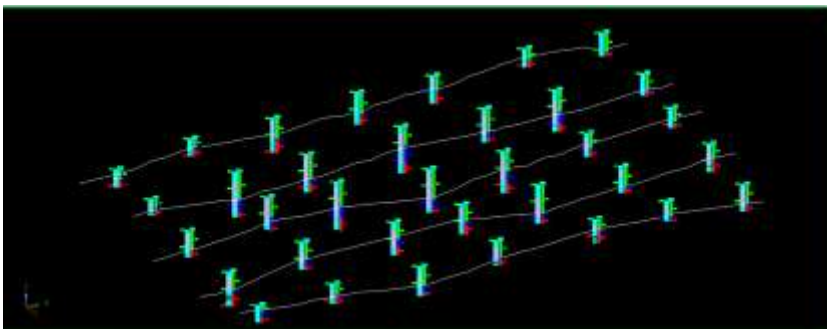
Display drill hole merupakan langkah yang dilakukan setelah *input database*. *Drill hole* yang akan ditampilkan terlebih dahulu akan diatur pewarnaannya dari setiap zona laterit yaitu limonit yang berwarna hijau, saprolit yang berwarna biru dan bedrock yang berwarna merah seperti terlihat pada gambar 11



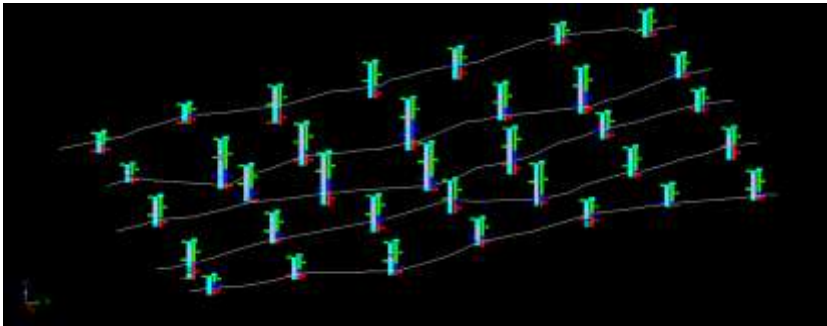
Gambar 11. *Display Drill Hole*

4. Pembuatan String

Pembuatan string bertujuan untuk menghubungkan antara titik bor yang memiliki perlapisan yang sama. *String* berbentuk garis yang akan menghubungkan setiap zona yang akan dibuatkan string. Pada penelitian ini terdapat 2 jenis string yang digunakan yaitu string untuk limonit dan string untuk saprolit. String yang dibuat untuk zona limonit adalah string dari *bottom limonit* (gambar 12), sedangkan untuk zona saprolit adalah *string bottom* saprolit (gambar 13).



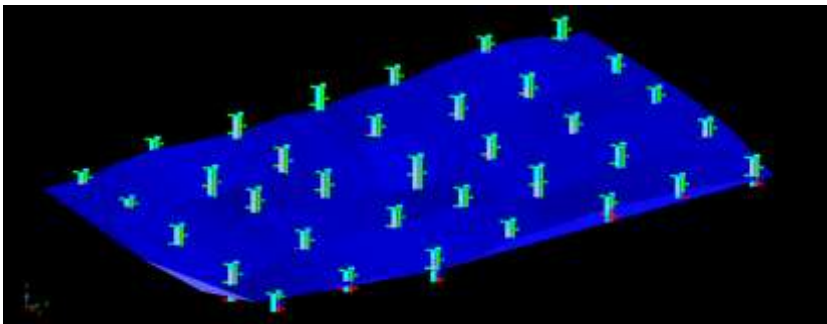
Gambar 12. *String Bottom Limonite*



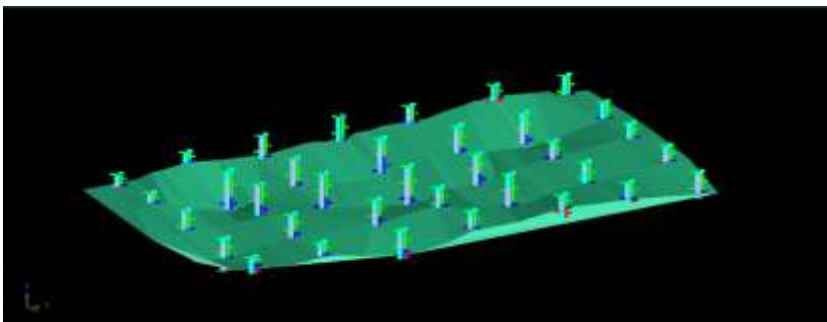
Gambar 13. *String Bottom Saprolite*

5. Pembuatan *Digital Terrain Model* (DTM)

Pembuatan *digital terrain model* bertujuan untuk membuat bidang solid atau bentuk 3D dari *string* yang telah dibuat pada setiap lapisan yaitu *bottom* limonit seperti yang ditunjukkan pada gambar 14 dan *bottom* saprolit seperti yang ditunjukkan pada gambar 15. Setelah pembuatan DTM dari setiap lapisan maka DTM tersebut akan digabungkan menjadi satu solid dengan batas atas topografi dan batas bawah *bottom* saprolit sehingga volumenya dapat dihitung. Selain untuk membuat solid pada setiap lapisan DTM juga berfungsi untuk membuat *constraint* pada setiap lapisan. *Constraint* adalah kombinasi logis dari satu atau lebih objek spasial pada blok yang dipilih.



Gambar 14. *DTM Bottom Limonite*



Gambar 15. *DTM Bottom Saprolite*

6. Pembuatan Komposit

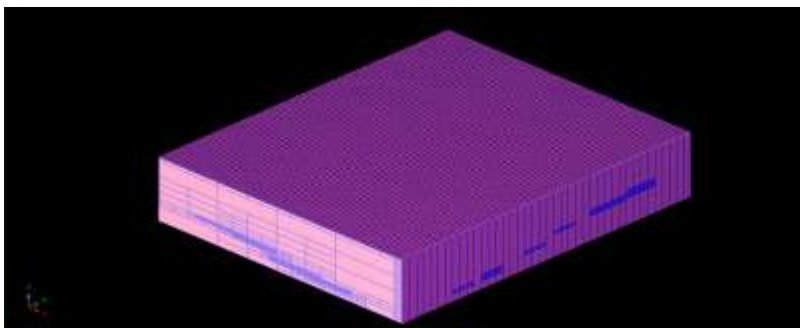
Setelah pembuatan *string* pada setiap zona maka akan dilakukanlah komposit terhadap nilai *assay* (kadar) dari hasil *extract* sampel *string* yang telah dibuat. Tujuan dilakukannya komposit yaitu merata-ratakan nilai kadar terutama jika terdapat nilai interval sampel yang tidak seragam yang mana pada umumnya rata-rata interval sampel *assay* yaitu setiap 1 meter namun kadangkala ada interval sampel *assay* yang kurang dari (*loss*) atau lebih (*swelling*) dari 1 meter. Oleh karena itu untuk meminimalisir bias nilai *assay* terutama nilai yang sangat tinggi dengan interval sampel yang pendek perlu dilakukan komposit.

7. Analisis statistik hasil komposit

Data *assay* yang memuat nilai kadar akan dilakukan analisis statistik untuk memperoleh parameter-parameter statistik yang dimiliki oleh data *assay* yang digunakan. Tujuan dilakukan analisis statistik ini yaitu untuk mengetahui pada sebaran data dan bentuk histogramnya. Untuk keperluan analisis geostatistik, maka bentuk histogram kurva sebaran normal akan lebih baik. Hasil dari analisis statistik hasil komposit lubang bor ini akan menghasilkan data-data statistik seperti nilai maksimum, nilai minimum, nilai rata-rata, standar deviasi dan data statistik lainnya.

8. Pembuatan Blok Model

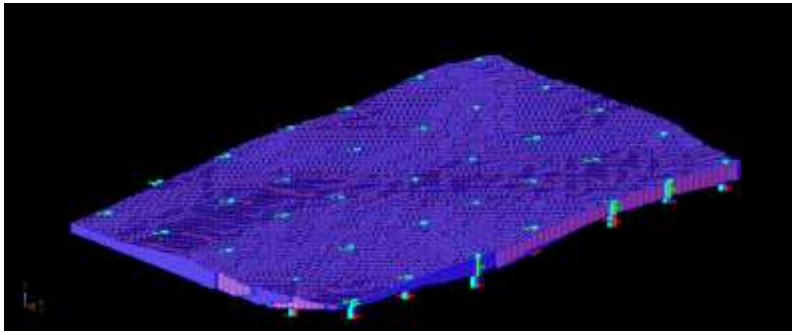
Pembuatan blok model dilakukan untuk mempermudah dalam proses estimasi sumber daya dengan membagi bagian-bagian dari model endapan menjadi blok-blok dengan ukuran tertentu (gambar 16). Ukuran model blok yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan ukuran blok 5m x 5m x 1m dengan satuan meter kubik sesuai dengan panjang komposit yang digunakan yaitu 1 meter dengan sub-blok ukuran 2.5m x 2.5m x 0.5m.



Gambar 16. Pembuatan Blok Model

9. Pembuatan *Constrain*

Pembuatan *Constrain* (gambar 17) dilakukan untuk membatasi blok model yang telah dibuat sebelumnya menyesuaikan dengan batas atas dan bawah dari zona yang ingin dilakukan estimasi sumber dayanya.

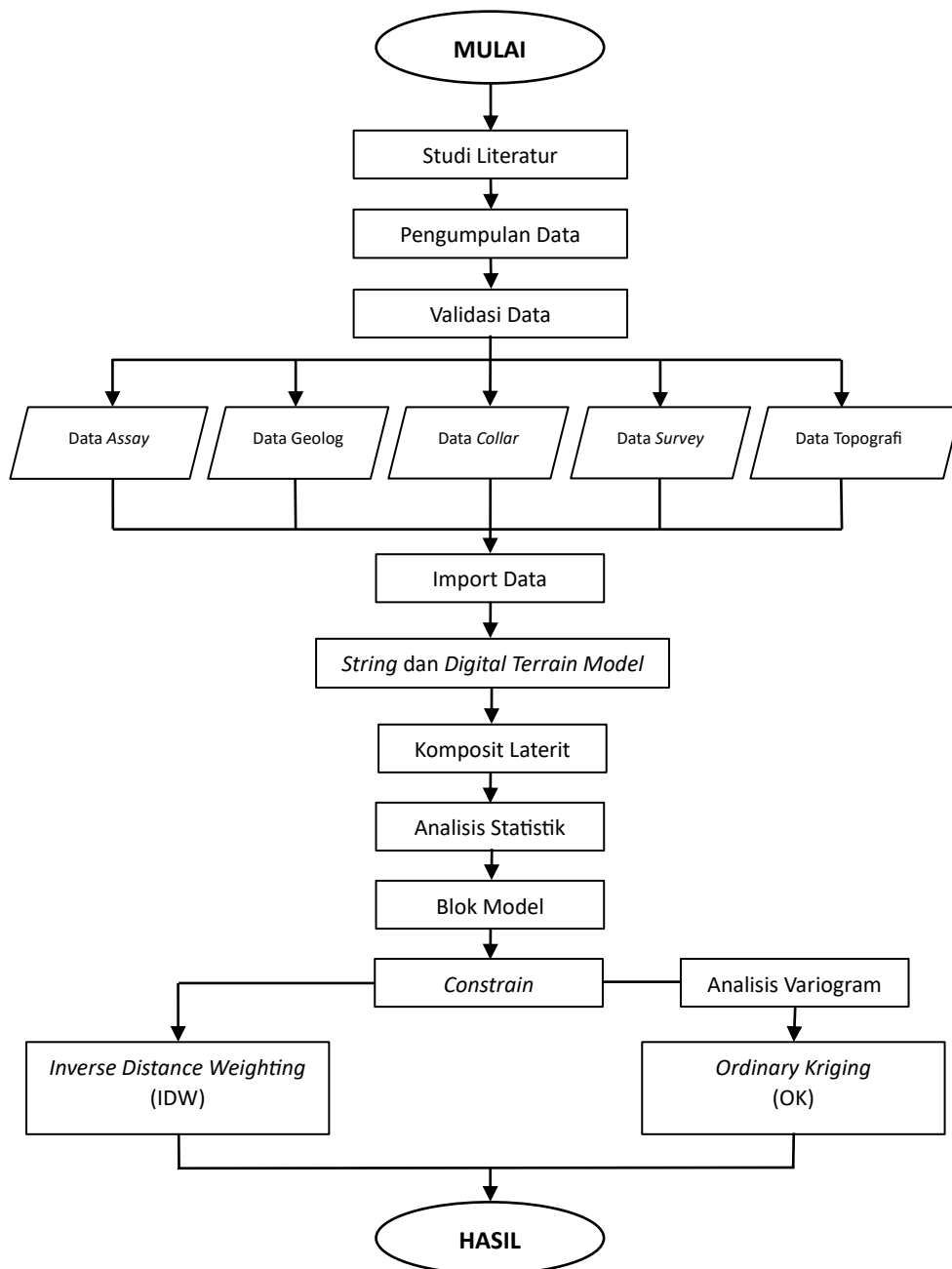


Gambar 17. Pembuatan *Constrain*

10. Analisis *Variogram*

Analisis *variogram* dilakukan terhadap data yang telah dianalisis statistik. Nilai yang akan diperoleh dari analisis *variogram* pada data kadar yaitu nilai *range*, *sill*, *nugget*, dan aspek *anisotrophy*. Data yang didapatkan dari hasil analisis *variogram* tersebut menjadi dasar korelasi *spatial* dari data kadar yang akan digunakan saat estimasi kadar unsur ini menggunakan metode *Ordinary Kriging*.

2.4 Bagan Alir



Gambar 18. Bagan Alir Penelitian