

SKRIPSI

PERBANDINGAN ESTIMASI SUMBERDAYA TERUKUR ENDAPAN NIKEL LATERIT ANTARA METODE *INVERSE DISTANCE WEIGHTING* DENGAN METODE *ORDINARY KRIGING* BERDASARKAN PENGARUH PANJANG KOMPOSIT KADAR Ni

(Studi Kasus: *Hill X*, PT Vale Indonesia Tbk, Sulawesi Selatan)

Disusun dan diajukan oleh

DIRGANTO PALAYUKAN

D111181325



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2022**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PERBANDINGAN ESTIMASI SUMBERDAYA TERUKUR ENDAPAN NIKEL
LATERIT ANTARA METODE *INVERSE DISTANCE WEIGHTING*
DENGAN METODE *ORDINARY KRIGING* BERDASARKAN
PENGARUH PANJANG KOMPOSIT KADAR NI**

(Studi Kasus: *Hill X*, PT Vale Indonesia Tbk, Sulawesi Selatan)

Disusun dan diajukan oleh

DIRGANTO PALAYUKAN

D111181325

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 18 November 2022

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan.

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

A.M. Perab. II

Asran Ilyas, ST. MT. Ph.D.

NIP.197303142000121001

Pembimbing Pendamping,

Dr.phil.nat. Sri Widodo, ST. MT.

NIP.197101012010121001

Wakil Dekan

Bidang Akademik dan Kemahasiswaan,



Dr. Amil Ahmad Ilham, S.T., M.IT.

NIP. 197310101998021001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dirganto Palayukan
NIM : D111181325
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Perbandingan estimasi sumberdaya terukur endapan nikel laterit antara metode
Inverse Distance Weighting dengan metode *Ordinary kriging*
berdasarkan pengaruh panjang komposit kadar Ni
(Studi Kasus: *Hill X*, PT Vale Indonesia Tbk, Sulawesi Selatan)

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Skripsi ini hasil karya orang lain maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 28 November 2022

Yang menyatakan



Tanda tangan

Dirganto Palayukan

ABSTRAK

Dalam melakukan penambangan bijih nikel laterit, diperlukan estimasi untuk dapat menghitung sumberdaya sebelum proses penambangan berlangsung. Estimasi sumberdaya berperan penting dalam menentukan kuantitas dan kualitas dari suatu endapan sebab dari hasil estimasi yang baik dan akurat dapat menentukan keuntungan investasi dalam usaha pertambangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui total sumberdaya endapan bijih nikel laterit pada *Hill X* PT Vale Indonesia Tbk, dengan membandingkan metode *Inverse Distance Weighting* dan *Ordinary kriging* berdasarkan pengaruh panjang komposit kadar Ni 1 meter dan 10 meter agar dapat diketahui metode dan panjang komposit yang paling baik digunakan dalam melakukan estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit. Berdasarkan hasil estimasi dari kedua metode dengan menggunakan panjang komposit 1 meter dan 10 meter didapatkan tonase *ore* pada komposit 1 meter dengan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* yaitu 608.056,00 ton dengan rata-rata kadar Ni 1,81 % sedangkan pada metode *Ordinary kriging* total tonase *ore* yaitu 602.173,00 ton dengan rata-rata kadar Ni 1,74 % dan pada komposit 10 meter dengan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* total tonase *ore* yaitu 475.013,00 ton dengan rata-rata kadar Ni 1,68 % sedangkan pada metode *Ordinary kriging* total tonase *ore* yaitu 473.423,00 ton dengan rata-rata kadar Ni 1,66 %. Berdasarkan perbandingan hasil estimasi sumberdaya pada kedua metode tersebut dengan pertimbangan panjang komposit 1 meter dan 10 meter didapatkan tonase material pada komposit 1 meter sebanyak 3.332.163,00 ton sedangkan pada komposit 10 meter di dapatkan tonase material sebanyak 3.315.151,00 ton. Sehingga dapat disimpulkan bahwa panjang komposit 1 meter lebih baik dari panjang komposit 10 meter dikarenakan pada komposit 1 meter semua sampel pada setiap zona masuk pada sampel yang akan diestimasi.

Kata Kunci: Komposit, *Inverse Distance Weighting*, *Ordinary kriging*, estimasi sumberdaya, nikel laterit.

ABSTRACT

In mining laterite nickel ore, estimates are needed to be able to calculate resources before the mining process takes place. Resource estimation plays an important role in determining the quantity and quality of a deposit because a good and accurate estimation result can determine the return on investment in the mining business. This study aims to determine the total resources of laterite nickel ore deposits at Hill X PT Vale Indonesia Tbk, by comparing the Inverse Distance Weighting and Ordinary kriging based on the effect of composite length on Ni. levels 1 meter and 10 meters to know the best methods and composite lengths used in estimating laterite nickel ore resources. Based on the estimation results of the two methods using the composite length of 1 meter and 10 meters, the tonnage of ore in the 1 meter composite using the Inverse Distance Weighting is 608,056.00 tons with an average Ni content of 1.81% while the Ordinary kriging totals tonnage ore is 602,173.00 tons with an average Ni content of 1.74% and 10 meters composite using the Inverse Distance Weighting total tonnage of ore is 475,013.00 tons with an average Ni content of 1.68% while the Ordinary kriging total tonnage of ore is 473,423.00 tons with an average Ni content of 1.66%. Based on the comparison of the results of resource estimates in both methods with consideration of the composite length of 1 meter and 10 meters, the materials tonnage in the 1 meter composite is 3,332,163.00 tons, while for the 10 meter composite, the materials tonnage is 3,315,151.00 tons. So, it can be concluded that the composite length of 1 meter is better than the composite length of 10 meters because in the 1 meter composite all samples in each zone enter the sample to be estimated.

Keywords: Composite, Inverse Distance Weighting, Ordinary kriging, resource estimation, nickel laterite.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang merupakan syarat untuk mendapatkan gelar sarjana (S1).

Keberhasilan dari suatu aktivitas tentu saja tidak lepas dari masalah yang dihadapi selama melaksanakannya, begitupun dalam penyusunan tugas akhir ini, akan tetapi dengan adanya arahan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, maka penyusunan tugas akhir yang berjudul "PERBANDINGAN ESTIMASI SUMBERDAYA TERUKUR ENDAPAN BIJIH NIKEL LATERIT ANTARA METODE *INVERSE DISTANCE WEIGHTING* DENGAN METODE *ORDINARY KRIGING* BERDASARKAN PENGARUH PANJANG KOMPOSIT KADAR Ni" ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis mengucapkan rasa hormat dan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan bantuan, petunjuk dan bimbingan baik secara langsung maupun tidak langsung. Terkhusus kepada PT Vale Indonesia Tbk, selaku perusahaan tempat penulis melaksanakan Tugas Akhir. Bapak Moh. Erwin Syam Noor, ST. Selaku Pembimbing pada saat melakukan penelitian di Perusahaan, Bapak Ronny Luhansa selaku senior *manager longterm planning* di PT Vale Indonesia Tbk, Bapak Suriadin Sazli S.T. yang telah membimbing selama di *mining* harapan. Seluruh Karyawan PT Vale Indonesia Tbk, dan kontraktor khususnya *team Sorowako Project Exploration (SPE)* yang telah membantu selama melaksanakan penelitian. Seluruh dosen Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat dalam bidang teknik pertambangan. Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, MT selaku kepala Laboratorium Eksplorasi Mineral sekaligus menjadi dosen penanggung jawab akademik yang telah banyak meluangkan waktu untuk penulis dalam pembuatan proposal tugas akhir. Bapak Asran Ilyas, S.T., M.T., Ph.D., selaku Pembimbing I dan

Bapak Dr. Phil. nat. Sri Widodo, ST., MT selaku Pembimbing II yang dengan sabar telah meluangkan waktunya untuk mendidik dan mengarahkan penulis dalam penyusunan tugas akhir ini dari awal hingga selesai. Teman-teman TUNNEL 2018 (Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin angkatan 2018) yang senantiasa memberikan dukungan kepada penulis selama melaksanakan perkuliahan dan dalam penyusunan tugas akhir. Anggota Laboratorium Eksplorasi Mineral Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang senantiasa memberikan dukungan kepada penulis dalam penyusunan tugas akhir. Kedua orang tua, bapak Yulianus Palayukan dan Ibu Elis Kala yang telah memberikan motivasi, dukungan, dan do'a sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

Penulis menyadari terdapat kekurangan dan keterbatasan dalam tugas akhir ini sehingga penulis senantiasa mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi penyempurnaan tugas akhir ini. Akhir kata, semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai bekal ilmu pengetahuan bagi penulis dan pembaca.

Makassar, 28 November 2022

Dirganto Palayukan
D111181325

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Tahapan Penelitian	3
1.6 Lokasi Penelitian.....	4
BAB II KONDISI GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBERDAYA	6
2.1 Kondisi Geologi.....	6
2.2 Endapan Nikel Laterit	9
2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral.....	12
2.4 Metode Estimasi Sumberdaya	15
2.5 Variogram dan Semivariogram	21
BAB III METODE PENELITIAN	25
3.1 Sumber Data.....	25

3.2 Pengolahan Data	29
3.3 Bagan Alir Penelitian	37
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	38
4.1 Analisis Statistik.....	38
4.2 Analisis Variogram	40
4.3 Hasil Estimasi Sumberdaya Menggunakan Komposit 1 Meter	46
4.4 Hasil Estimasi Sumberdaya Menggunakan Komposit 10 Meter	48
4.5 Diskusi	52
BAB V PENUTUP	54
5.1 Kesimpulan	54
5.2 Saran	55
DAFTAR PUSTAKA.....	56
LAMPIRAN	57

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta tunjuk lokasi penelitian	5
2.1 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002)	12
2.2 Klasifikasi sumberdaya dan cadangan mineral berdasarkan faktor penguubah dan tingkat pengetahuan dan keyakinan geologi (KCMI, 2017)	14
2.3 Metode estimasi sumberdaya dengan IDW (Idrus, 2007)	17
2.4 Komponen variogram dan semivariogram.....	23
3.1 Data Topografi dalam bentuk DTM	26
3.2 <i>Report</i> database yang telah di <i>import</i>	30
3.3 <i>Drill hole</i>	31
3.4 <i>String top</i> limonit.....	32
3.5 <i>String top</i> saprolit	32
3.6 <i>String bottom</i> saprolit	33
3.7 <i>Digital Terrain Model</i> (DTM) zona <i>top</i> limonit.....	34
3.8 <i>Digital Terrain Model</i> (DTM) zona <i>top</i> saprolit.....	34
3.9 <i>Digital Terrain Model</i> (DTM) zona <i>bottom</i> saprolit	35
3.10 Bagan alir penelitian.....	37
4.1 Histogram kadar Ni pada zona limonit & Saprolit komposit 1 meter	39
4.2 Histogram kadar Ni pada zona limonit & Saprolit komposit 10 meter	40
4.3 Variogram map kadar Ni zona limonit hingga saprolit komposit 1 meter (a) Sumbu mayor dan (b) sumbu semi mayor	41
4.4 Variogram sumbu mayor kadar Ni komposit 1 meter	41
4.5 Variogram sumbu semi mayor kadar Ni pada komposit 1 meter	42

4.6 Variogram sumbu minor kadar Ni pada komposit 1 meter	42
4.7 Variogram map kadar Ni zona limonit hingga saprolit komposit 1 meter (a) Sumbu mayor dan (b) sumbu semi mayor	43
4.8 Variogram sumbu mayor kadar Ni pada komposit 10 meter.....	44
4.9 Variogram sumbu semi mayor kadar Ni pada komposit 10 meter	44
4.10 Variogram sumbu minor kadar Ni pada komposit 10 meter.....	45
4.11 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona limonit estimasi sumberdaya menggunakan metode IDW pada komposit 1 meter	46
4.12 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona saprolit estimasi sumberdaya menggunakan metode IDW pada komposit 1 meter.....	47
4.13 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona limonit estimasi sumberdaya menggunakan metode <i>Ordinary kriging</i> pada komposit 1 meter	47
4.14 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona saprolit estimasi sumberdaya menggunakan metode <i>Ordinary kriging</i> pada komposit 1 meter	48
4.15 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona limonit estimasi sumberdaya menggunakan metode IDW pada komposit 10 meter	49
4.16 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona saprolit estimasi sumberdaya menggunakan metode IDW pada komposit 10 meter	49
4.17 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona limonit estimasi sumberdaya menggunakan metode <i>Ordinary kriging</i> pada komposit 10 meter.....	50
4.18 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> pada zona saprolit estimasi sumberdaya menggunakan metode <i>Ordinary kriging</i> pada komposit 10 meter.....	50

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
3.1 Contoh data <i>assay</i>	27
3.2 Contoh data <i>collar</i>	27
3.3 Contoh data <i>survey</i>	28
3.4 Contoh data geologi.....	29
4.1 Data statistik unsur Ni komposit 1 meter	38
4.2 Data statistik unsur Ni komposit 10 meter	39
4.3 Hasil analisis variogram kadar Ni pada komposit 1 meter	43
4.4 Hasil analisis variogram kadar Ni pada komposit 10 meter	45
4.5 Hasil Estimasi Sumberdaya	51

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A Peta Sebaran Titik Bor	58
B Data <i>Collar</i>	59
C Contoh Data <i>Assay</i>	64
D Kartu Konsultasi Tugas Akhir	67

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel laterit merupakan bahan galian yang mempunyai nilai ekonomis tinggi, karena pada masa sekarang dan masa yang akan datang kebutuhan nikel semakin meningkat. Nikel memiliki banyak kegunaan, antara lain dalam pembuatan baja tahan karat, sebagai bahan pembuatan alat-alat laboratorium (fisika dan kimia), katalis dan lainnya, sehingga menarik sekali untuk diolah. Nikel laterit diperoleh dari endapan yang terbentuk akibat proses oksidasi dan pelapukan batuan ultramafik yang mengandung nikel 0,2 - 0,4%. Jenis-jenis mineral tersebut antara lain olivin, piroksin dan amfibol. Bahan galian ini umumnya ditemukan pada daerah tropis, dikarenakan curah hujan yang mendukung terjadinya pelapukan, selain topografi, drainase, tenaga tektonik dan struktur geologi (Freysinnet *et. al.*, 2005).

Sebelum melakukan penambangan nikel laterit, diperlukan estimasi untuk dapat menghitung sumberdaya sebelum proses penambangan berlangsung. Estimasi sumberdaya berperan penting dalam menentukan kuantitas dan kualitas dari suatu endapan sebab dari hasil estimasi yang baik dan akurat yang sesuai dengan keberadaannya di lapangan dapat menentukan investasi yang akan ditanam oleh investor sebagai penanaman modal dalam usaha pertambangan.

Dalam melakukan estimasi sumberdaya diperlukan metode perhitungan yang sesuai dengan kondisi geologi, ganesa, dan mineralisasi pada suatu daerah yang akan di estimasi. Selama ini, dalam melakukan estimasi sumberdaya PT Vale Indonesia Tbk, dan kebanyakan perusahaan lainnya menggunakan panjang komposit 1 meter dan belum menggunakan panjang komposit lainnya sehingga dalam melakukan estimasi

sumberdaya, panjang komposit 1 meter perlu dibandingkan dengan panjang komposit lainnya seperti panjang komposit yang sesuai dengan tinggi *bench pit* pada perusahaan. Berangkat dari hal ini maka penulis mencoba untuk menghitung sumberdaya endapan nikel laterit pada *Hill X* PT Vale Indonesia Tbk, dengan menggunakan 2 metode yaitu metode *Inverse Distance Weighting (IDW)* dan *Ordinary kriging* berdasarkan pertimbangan pengaruh panjang komposit 1 meter yang merupakan panjang komposit yang umum digunakan selama ini dan panjang komposit 10 meter sesuai dengan tinggi *bench pit* yang digunakan oleh PT Vale Indonesia Tbk. Berdasarkan hasil estimasi sumberdaya bijih nikel dari kedua metode tersebut dengan menggunakan 2 parameter panjang komposit kemudian akan di bandingkan guna mengetahui panjang komposit yang paling cocok digunakan dalam melakukan estimasi sumberdaya khususnya pada daerah penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Estimasi sumberdaya merupakan hal yang sangat penting untuk dilakukan sebelum dilakukannya kegiatan penambangan, karena dari hasil estimasi sumberdaya inilah yang akan di evaluasi untuk menentukan kelanjutan pada tahap selanjutnya. Berdasarkan hal tersebut maka di lakukanlah penelitian perbandingan antara metode *Inverse Distance Weighting* dengan metode *Ordinary kriging* berdasarkan pengaruh panjang komposit 1 meter dan 10 meter dalam menghitung sumberdaya endapan nikel laterit.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan dilaksanakannya penelitian tugas akhir ini adalah:

1. Mengestimasi total sumberdaya terukur endapan bijih nikel laterit dengan

membandingkan metode *Inverse Distance Weighting* dan metode *Ordinary Kriging* berdasarkan pengaruh panjang komposit kadar Ni 1 meter dan 10 meter.

2. Menganalisis Panjang komposit yang paling baik digunakan dalam melakukan estimasi sumberdaya terukur endapan nikel laterit dengan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* dan *Ordinary Kriging*.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Bagi perusahaan

Sebagai bahan pertimbangan kepada perusahaan dalam memilih metode dan panjang komposit yang digunakan untuk melakukan estimasi sumberdaya terukur endapan nikel laterit pada *Hill X* PT Vale Indonesia Tbk.

2. Bagi kalangan akademik

Sebagai bahan pembelajaran dalam menambah wawasan mengenai metode estimasi sumberdaya terukur endapan nikel laterit menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* dan *Ordinary Kriging* berdasarkan pengaruh panjang komposit.

1.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian yang dilakukan dalam penyusunan tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Tahap studi literatur

Studi literatur meliputi tahapan pencarian referensi yang berkaitan dengan penelitian. Literatur yang digunakan sebagai bahan pustaka diperoleh dari berbagai sumber antara lain jurnal internasional, *Internasional Mining Book*, *International Mining Magazine*, perpustakaan dan instansi terkait.

2. Tahap perumusan masalah

Perumusan masalah dilakukan untuk menentukan masalah yang akan diteliti dan menjadi batasan dalam melakukan penelitian.

3. Tahap orientasi lapangan dan pengumpulan data

Orientasi lapangan dilakukan di daerah PT Vale Indonesia Tbk, data pendukung penelitian yang didapatkan berupa data sekunder yang sudah ada sebelumnya seperti data pengeboran dalam bentuk *spreadsheet* yang di dalamnya termuat data *assay, collar* dan data topografi.

4. Tahap pengolahan data

Tahapan pengolahan data dilakukan terhadap data yang telah diperoleh dari hasil pengambilan data yang selanjutnya dilakukan analisis menggunakan beberapa perangkat lunak seperti *Microsoft Excel 2019* dan *Surpac 6.3*.

5. Tahap penyusunan laporan tugas akhir

Penyusunan laporan tugas akhir merupakan kegiatan mengumpulkan keseluruhan data yang didapatkan dan disusun dalam bentuk laporan akhir.

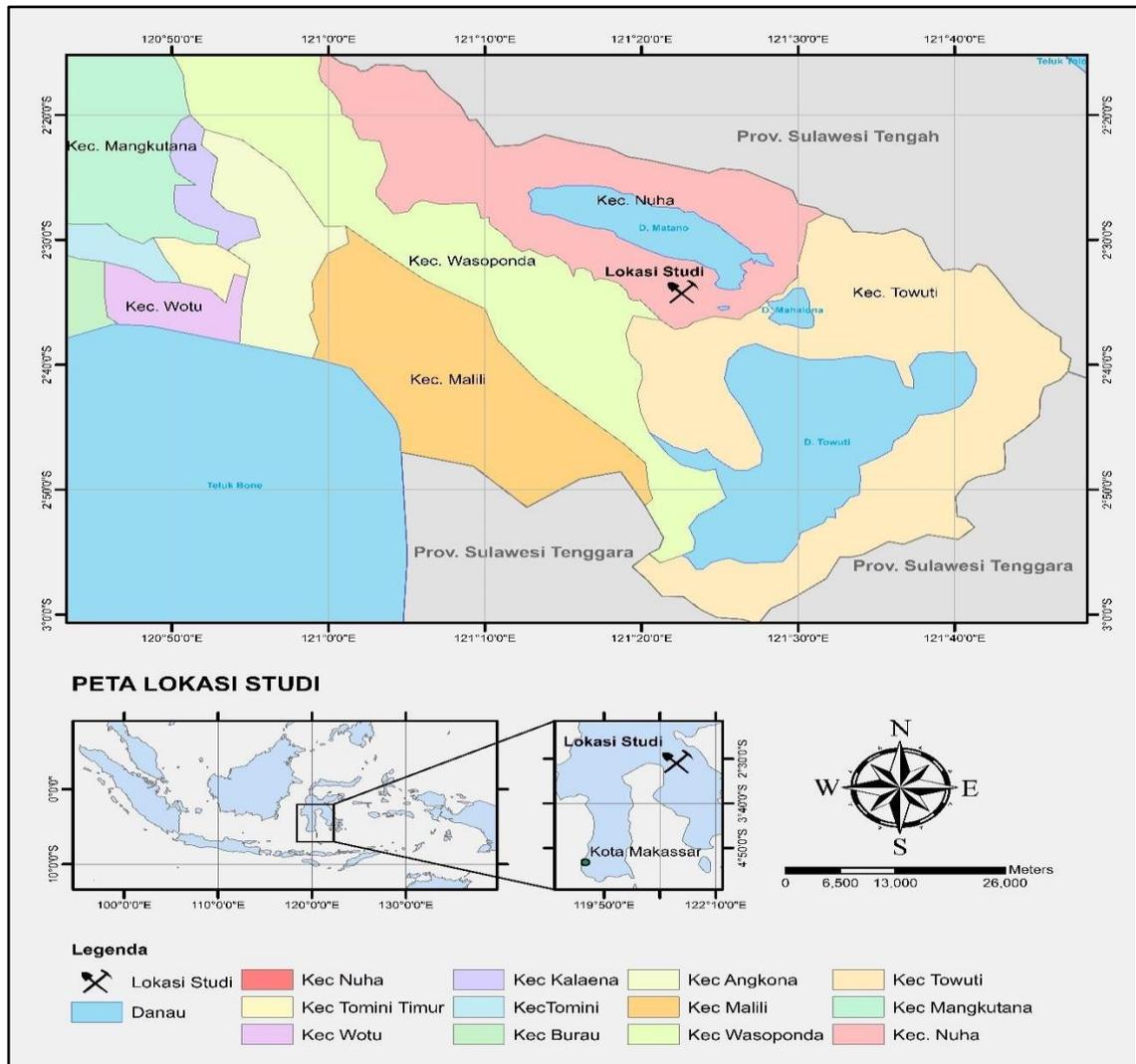
6. Tahap seminar dan penyerahan laporan tugas akhir

Laporan hasil penelitian yang telah disusun akan dipresentasikan dalam seminar hasil. Koreksi dan saran pada saat seminar akan digunakan untuk merevisi kembali laporan yang telah diseminarkan.

1.6 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian yang dilakukan di PT Vale Indonesia Tbk, secara administratif terletak di daerah Sorowako, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.1. Perjalanan ke PT Vale Indonesia Tbk, dapat ditempuh dengan 2 jalur transportasi, yaitu jalur darat dengan menggunakan bus angkutan umum. Perjalanan ini memiliki jarak ± 600 km dengan lama

perjalanan ± 13 jam dari Makassar menuju ke Sorowako dan jalur udara dari bandara Sultan Hasanuddin di Makassar menuju bandara Sorowako menggunakan transportasi udara dengan waktu tempuh 45 menit.



Gambar 1.1 Peta tunjuk lokasi penelitian.

BAB II

KONDISI GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBERDAYA

2.1 Kondisi Geologi

Pembahasan tentang kondisi geologi daerah penelitian dijelaskan dalam beberapa sub bab di bawah ini.

2.1.1 Geologi Regional

Pulau Sulawesi terletak di Indonesia bagian tengah yang berada pada pertemuan tiga Lempeng, yaitu Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Eurasia. Pulau Sulawesi disusun oleh empat sabuk litotektonik, yaitu (Machpherson & Hall, 2002):

1. Busur pluto-vulkanik dari selatan hingga utara lengan Pulau Sulawesi,
2. Sabuk Metamorfik di bagian tengah, memanjang dari tengah ke tenggara,
3. Sabuk Ofiolit di bagian timur-tenggara,
4. Banggai-Sula dan Tukang Besi *microcontinent*.

2.1.2 Geologi Lokal

Geologi daerah Sorowako dan sekitarnya sudah dideskripsikan sebelumnya secara umum oleh Brouwer (1934), Van Bemmelen (1949), Soeria Atmadja *et al.* (1974) dan Ahmad (1977). Namun yang secara spesifik membahas tentang geologi deposit nikel laterit adalah Golightly (1979). Golightly membagi geologi daerah Sorowako menjadi tiga bagian, yaitu:

1. Satuan batuan sedimen yang berumur kapur; terdiri dari batu gamping laut dalam dan rijang. Bagian Barat Sorowako dibatasi oleh sesar naik dengan kemiringan ke arah barat.
2. Satuan batuan ultrabasa yang berumur awal tersier umumnya terdiri dari jenis peridotit, sebagian mengalami serpentinisasi dengan derajat yang bervariasi dan

umumnya terdapat di bagian timur. Satuan ini memiliki intrusi-intrusi pegmatit yang bersifat gabroik dan terdapat di bagian utara.

3. Satuan aluvial dan sedimen danau (*lacustrine*) yang berumur Kuartar, umumnya terdapat di bagian utara dekat Desa Sorowako.

Bijih Nikel yang terdapat di bagian tengah dan timur Sulawesi tepatnya di Daerah Sorowako termasuk ke dalam jenis laterit nikel dan bijih nikel silikat (garnierit). Bijih nikel tersebut akibat pelapukan dan pelindian (*leaching*) batuan ultrabasa seperti peridotit dan serpentinit dari rombakan batuan ultrabasa. Penampang lapisan bijih laterit nikel Daerah Sorowako dapat digambarkan sebagai berikut (Ahmad, 2006):

1. Lapisan tanah penutup (*Overburden*)

Lapisan tanah penutup terletak di bagian atas permukaan. Kondisi fisik lunak dan memiliki warna coklat kemerahan hingga gelap dengan kadar air antara 25% sampai 35%, kadar Nikel kecil 1,3% mempunyai ketebalan berkisar antara 1 - 12 meter.

2. Lapisan limonit berkadar menengah (*Medium Grade Limonit*)

Lapisan limonit berkadar menengah terletak di bawah lapisan tanah penutup. Lapisan ini memiliki warna kuning kecoklatan, agak lunak, berkadar air antara 30% - 40%, kadar Nikel 1,5%, Fe 44%, MgO 3%, SiO₂ 2%. Lapisan ini mempunyai ketebalan rata-rata 3 meter.

3. Lapisan bijih (*Ore*)

Lapisan bijih merupakan hasil pelapukan batuan peridotite. Lapisan ini memiliki warna kuning kecoklatan agak kemerahan. Lapisan bijih terletak di bagian bawah dari *medium grade limonit*, dengan ketebalan rata-rata 7 meter. Lapisan bijih terdapat bersama batuan yang keras atau rapuh sebagian saprolit. Kadar Ni 1,85%, Fe 16%, MgO 25%, SiO₂ 35%. Lapisan bijih merupakan lapisan yang bernilai ekonomis untuk ditambang sebagai bijih.

4. Lapisan batuan dasar (*Bedrock/Blue Zone*)

Lapisan ini merupakan batuan peridotit yang tidak atau belum mengalami pelapukan dengan kadar Ni 1,3%. Batuan *bedrock* pada umumnya merupakan bongkah-bongkah massif yang memiliki warna kuning pucat sampai abu-abu kehijauan. Secara lokal batuan dasar ini disebut *blue zone*. Ketebalan dari masing-masing lapisan tidak merata. Hal tersebut tergantung dari relief, umumnya endapan laterit terakumulasi banyak pada bagian bawah bukit dengan relief yang landai.

Sesar besar di daerah ini menyebabkan relief topografi mencapai 600 mdpl dan hingga sekarang masih aktif tererosi. Sejarah tektonik dan geomorfik di kompleks ini sangat penting untuk pembentukan Ni laterit yang bernilai ekonomis (Golightly, 1979). Daerah Sorowako sebagian besar disusun oleh batuan ultramafik yang membentang hingga 10.000 km² di bagian timur Sulawesi serta merupakan host dari endapan Ni laterit (Suratman, 2000).

Penambangan bijih nikel oleh PT Vale Indonesia Tbk di Sorowako terbagi atas empat daerah penambangan, yaitu Blok Barat, Blok Timur, Petea dan Bahodopi. Pembagian ini disebabkan adanya perbedaan batuan yang belum mengalami proses pelapukan atau biasa disebut *boulder* (*sustainability report* PT Vale Indonesia, 2017).

1. Blok Barat (*West Block*)

Blok barat memiliki ketebalan *overburden* rata-rata 7,0 m dengan kandungan nikel rendah 1,2%. Pada lapisan *incremental* limonit saprolit memiliki ketebalan rata-rata 6,6 m dengan kandungan nikel 1,36%. Lapisan limonit *ore* dengan ketebalan rata-rata 3,7 m dengan kandungan Ni 1,7%. Lapisan saprolit *ore* dengan kandungan nikel 2,02% dengan ketebalan rata-rata 7 m. Lapisan bawah adalah *bedrock* yang memiliki warna hijau kebiruan hingga abu-abu kehijauan dengan kandungan Ni 0,3%.

2. Blok Timur (*East Block*)

Ketebalan *overburden* rata-rata 11,7 m memiliki kandungan nikel 1,3%. Lapisan *incremental* limonit saprolit memiliki ketebalan rata-rata 4,9 m dengan kandungan nikel 1,37%. Lapisan limonit *ore* dengan ketebalan rata-rata 3 m dengan kandungan Ni 1,68%. Lapisan saprolit *ore* dengan kandungan nikel 1,87 % dan tebal rata-rata 7,2 m. Lapisan bawah adalah *bedrock* yang berwarna hijau kebiruan hingga abu-abu kehijauan dengan kandungan Ni 0,3%.

3. Petea

Ketebalan *overburden* rata-rata 5 m memiliki kandungan nikel rendah 1.2%. Lapisan *incremental* limonit saprolit dengan ketebalan rata-rata 3.1 m, kandungan nikel 1,4%. Lapisan limonit *ore* dengan ketebalan rata-rata 2,5 m dengan kandungan Ni 1,93%. Lapisan saprolit *ore* dengan kandungan nikel 1,81 % dan tebal rata-rata 7 m.

4. Bahodopi

Ketebalan *overburden* rata-rata 5,2 m dengan kandungan nikel rendah 1.2%. Lapisan *incremental* limonit saprolit memiliki ketebalan rata-rata 3,5 m dengan kandungan nikel 1,36%. Lapisan limonit *ore* dengan ketebalan rata-rata 3,2 m dengan kandungan Ni 1,76%. Lapisan saprolit *ore* dengan kandungan nikel 1,67% dan tebal rata-rata 5,2 m. Lapisan bawah adalah *bedrock* yang berwarna hijau kebiruan hingga abu-abu kehijauan dengan kandungan Ni 0,55%.

2.2 Endapan Nikel Laterit

Nikel laterit merupakan salah satu mineral logam hasil dari proses pelapukan kimia batuan ultramafik yang mengakibatkan pengkayaan unsur Ni, Fe, Mn, dan Co secara residual dan sekunder (Burger, 1996). Nikel laterit dicirikan oleh adanya logam oksida yang berwarna coklat kemerahan mengandung Ni dan Fe (Cahit et al., 2017).

Salah satu faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit adalah morfologi, batuan asal dan tingkat pelapukan (Kurniadi et al., 2017). Tingkat pelapukan yang tinggi sangat berperan terhadap proses lateritisasi (Tonggiroh et al., 2012).

Proses terbentuknya nikel laterit dimulai dari proses pelapukan yang intensif pada batuan peridotit (Sundari dan Woro, 2012), selanjutnya infiltrasi air hujan masuk ke dalam zona retakan batuan dan akan melarutkan mineral yang mudah larut pada batuan dasar. Mineral dengan berat jenis tinggi akan tertinggal di permukaan sehingga mengalami pengkayaan residu seperti unsur Ca, Mg, dan Si. Mineral lain yang bersifat *mobile* akan terlarutkan ke bawah dan membentuk suatu zona akumulasi dengan pengkayaan (supergen) seperti Ni, Mn, dan Co (Golightly, 1981).

Profil endapan nikel laterit yang terbentuk dari hasil pelapukan batuan ultrabasa. Profil endapan nikel laterit tersebut secara umum terdiri dari 5 (lima) lapisan, yaitu *Iron cap*, lapisan limonit, transisi, lapisan saprolit dan lapisan *bedrock/Fresh rock* (batuan dasar) seperti yang di tunjukkan pada Gambar 2.1.

1. *Iron cap (Ferric Crust)*

Iron cap merupakan lapisan teratas dalam profil endapan nikel laterit dan berfungsi untuk melindungi lapisan di bawahnya dari bahaya erosi. Lapisan ini dikenal pula sebagai zona tudung besi (*ferruginous duricrust*) karena mengandung konsentrasi besi yang tinggi.

2. Limonit

Bagian ini dibagi menjadi dua lapisan karena terdapat perbedaan kandungan konsentrasi besi. Lapisan bagian atas disebut limonistik sebab walaupun relatif kaya akan oksida besi, lapisan ini tercampur dengan tanah penutup (*top soil*). Sementara lapisan bagian bawah sangat kaya dengan oksida besi. Pengkayaan (*enrichment*) tersebut terjadi akibat proses pelindihan pada pembentukan zona saprolit. Zona limonit merupakan hasil pelapukan lebih lanjut dari batuan beku ultramafik yang

didominasi oleh oksida besi, goetit, dan magnetit. Ketebalan lapisan limonit berkisar antara 8 – 15 m sehingga sering disebut *overburden*.

3. Zona Transisi

Lapisan ini merupakan zona peralihan antara limonit bagian bawah dan saprolit bagian atas. Mengandung mineral *smectite* (*nontronite*). Tekstur batuan induk (*Protolith*) masih terlihat. Ukuran butir cenderung lempung dan *impermeable*.

4. Saprolit

Zona saprolit merupakan zona yang kaya akan nikel sebagai hasil pelapukan dari batuan asal masih terlihat, dari ukuran kerikil hingga bongkah. Komposisi utamanya antara lain besi oksida, serpentin <0,4%, magnesit, dan kuarsa. Zona saprolit memiliki ketebalan rata-rata antara 5-18 meter. Biasanya ditemui rekahan-rekahan yang berisi magnesit ($MgCO_3$), serpentin, onyx (SiO_2), dan garnierite. Zona saprolit dapat dibagi menjadi dua, yaitu (Arif, 2018):

- a) *Sub soft-saprolit*, mengandung fragmen berukuran bongkah kurang dari 25%.
- b) *Sub hard-saprolit*, mengandung fragmen berukuran bongkah lebih dari 50%.

5. *Bedrock/Freshrock*

Zona ini disebut pula dalam istilah *protholith*, yaitu batuan asal yang terletak pada daerah paling dasar dari profil suatu endapan nikel laterit. Zona ini berupa batuan ultrabasa, antara lain *harzburgite*, *peridotit*, atau *dunit* dengan ukuran bongkahan yang besar, lebih dari 75 cm. Umumnya tidak ditemukan-mineral ekonomis pada zona ini.

SCHEMATIC LATERITE PROFILE	COMMON NAME	APPROXIMATE ANALYSIS (%)			
		Ni	Co	Fe	MgO
	RED LIMONITE	<0.8	<0.1	>50	<0.5
	YELLOW LIMONITE	0.8 to 1.5	0.1 to 0.2	40 to 50	0.5 to 5
	TRANSITION	1.5 to 4		25 to 40	5 to 15
	SAPROLITE/ GARNIERITE/ SERPENTINE	1.8 to 3	0.02 to 0.1	10 to 25	15 to 35
	FRESH ROCK	0.3	0.01	5	35 to 45

Gambar 2.1 Profil endapan nikel laterit (Elias, 2002).

2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral

Sumberdaya mineral adalah endapan mineral yang diharapkan dapat dimanfaatkan secara nyata. Sumberdaya mineral dengan keyakinan geologi tertentu dapat berubah menjadi cadangan setelah dilakukan pengkajian kelayakan tambang dan memenuhi kriteria layak tambang. Istilah sumberdaya mineral mencakup mineralisasi, termasuk material buangan dan material sisa, yang telah diidentifikasi dan diestimasi melalui eksplorasi dan pengambilan sampel, dan darinya cadangan mineral dapat ditentukan dengan pertimbangan dan penerapan faktor pengubahnya (KCFI, 2017). Sumberdaya mineral dikelompokkan lagi berdasarkan tingkat keyakinan geologinya, ke dalam kategori terduga, tertunjuk dan terukur.

1. Sumberdaya mineral tereka

Sumberdaya mineral tereka merupakan bagian dari sumberdaya mineral dimana kuantitas dan kualitas kadarnya diestimasi berdasarkan bukti-bukti geologi dan pengambilan conto yang terbatas. Bukti geologi tersebut memadai untuk menunjukkan keterjadiannya tetapi tidak memverifikasi kemenerusan kualitas atau kadar dan kemenerusan geologinya. Sumberdaya mineral tereka memiliki tingkat keyakinan lebih rendah dalam penerapannya dibandingkan dengan sumberdaya mineral tertunjuk dan tidak dapat dikonversi ke cadangan mineral. Sangat beralasan untuk mengharapkan bahwa sebagian besar sumberdaya mineral tereka dapat ditingkatkan menjadi sumberdaya mineral tertunjuk sejalan dengan berlanjutnya eksplorasi.

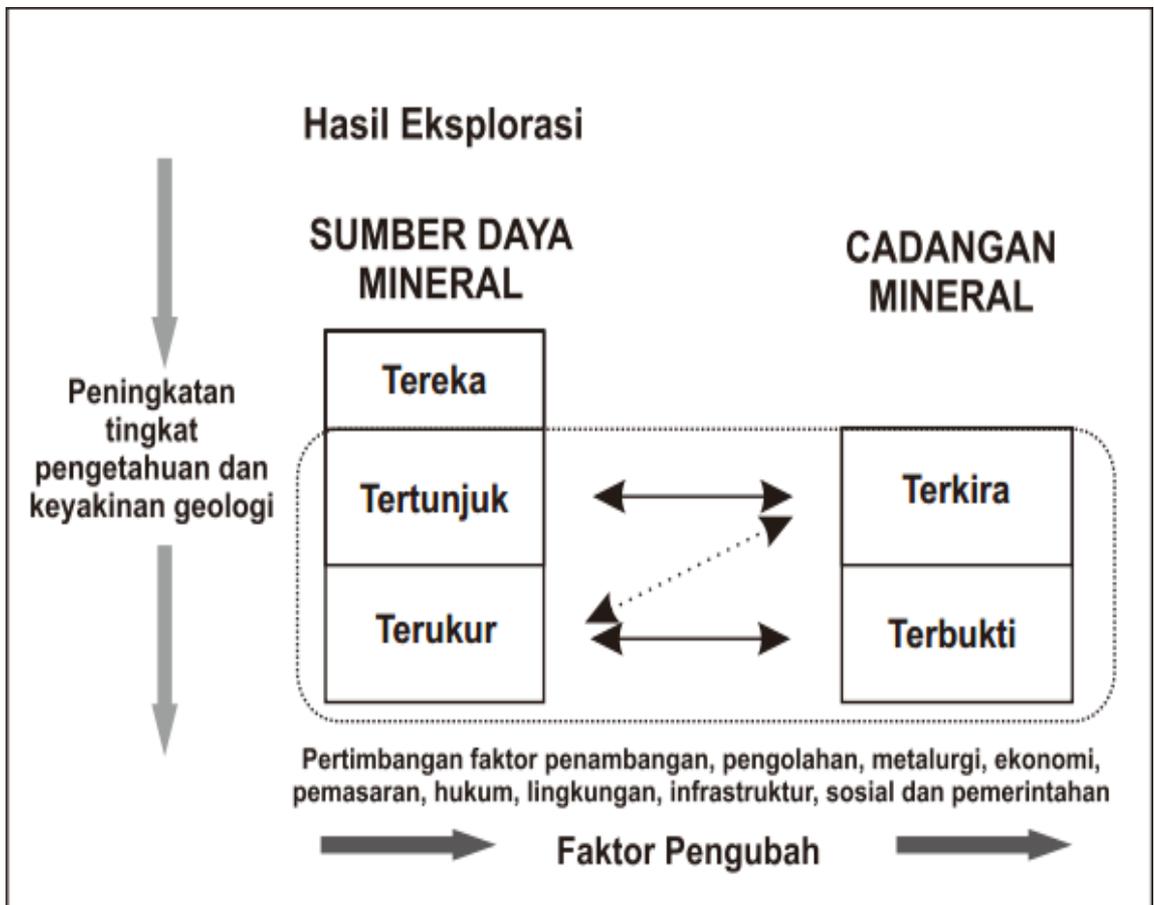
2. Sumberdaya mineral tertunjuk

Sumberdaya mineral tertunjuk merupakan bagian dari sumberdaya mineral di mana kuantitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, dan karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang cukup untuk memungkinkan penerapan faktor-faktor pengubah secara memadai untuk mendukung perencanaan tambang dan evaluasi kelayakan ekonomi cebakan tersebut. Bukti geologi didapatkan dari eksplorasi, pengambilan conto dan pengujian yang cukup detail dan andal, dan memadai untuk mengasumsikan kemenerusan geologi dan kadar atau kualitas di antara titik-titik pengamatan. Sumberdaya mineral tertunjuk memiliki tingkat keyakinan yang lebih rendah penerapannya dibandingkan dengan sumberdaya mineral terukur dan hanya dapat dikonversi ke cadangan mineral terkira.

3. Sumberdaya mineral terukur

Sumberdaya mineral terukur merupakan bagian dari sumberdaya mineral di mana kuantitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang memadai untuk memungkinkan penerapan faktor-faktor pengubah untuk mendukung perencanaan tambang detail dan evaluasi akhir dari

kelayakan ekonomi cebakan tersebut. Bukti geologi didapatkan dari eksplorasi, pengambilan conto dan pengujian yang detail dan andal, dan memadai untuk memastikan kemenerusan geologi dan kadar atau kualitasnya di antara titik-titik pengamatan. Sumberdaya mineral terukur memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi penerapannya dibandingkan dengan sumberdaya mineral tertunjuk ataupun sumberdaya mineral tereka. Sumberdaya mineral terukur dapat dikonversi ke cadangan mineral terbukti atau cadangan mineral terkira (KCMI, 2017). Gambaran perubahan klasifikasi sumberdaya dan cadangan mineral berdasarkan faktor pengubah dan tingkat pengetahuan dan keyakinan geologi dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Klasifikasi sumberdaya dan cadangan mineral berdasarkan faktor pengubah dan tingkat pengetahuan dan keyakinan geologi (KCMI, 2017).

2.4 Metode Estimasi Sumberdaya

Estimasi sumberdaya adalah estimasi potensi dari endapan mineral bijih yang terletak di permukaan bumi untuk mengetahui apakah endapan tersebut layak untuk dilanjutkan ke proses penambangan selanjutnya yaitu perhitungan cadangan. Ada beberapa jenis dari metode estimasi yang dirancang untuk tujuan yang berbeda-beda (Dominy *et al.*, 2002).

Metode yang digunakan dalam melakukan estimasi sumberdaya pada umumnya bergantung pada keadaan geologi endapan, metode eksplorasi, keakuratan data dan nilai koefisien variasi, manfaat serta tujuan estimasi sumberdaya. Pada umumnya metode estimasi yang digunakan untuk endapan nikel laterit terdapat beberapa jenis metode yaitu metode *Inverse Distance Weighting* (IDW), dan metode *kriging*.

1. Metode *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Metode *Inverse Distance Weighted* (IDW) merupakan metode deterministik yang sederhana dengan mempertimbangkan titik disekitarnya (NCGIA, 1997). Asumsi dari metode ini adalah nilai interpolasi akan lebih mirip pada data sampel yang dekat daripada yang lebih jauh. Bobot (*weight*) akan berubah secara linier sesuai dengan jaraknya dengan data sampel. Bobot ini tidak akan dipengaruhi oleh letak dari data sampel. Metode ini biasanya digunakan dalam industri pertambangan karena mudah untuk digunakan. Dalam penaksiran data kadar dilakukan teknik-teknik pembobotan yang ada pada umumnya didasarkan pada:

1. Letak grid yang atau blok yang akan ditaksir terhadap letak data sampel.
2. Kecenderungan penyebaran kualitas data.
3. Orientasi setiap sampel yang menunjukkan hubungan letak ruang antar sampel.
4. Untuk mendapatkan efek penghalusan (pemerataan) data, dilakukan faktor pangkat. Pilihan dari pangkat yang digunakan (titik bor 1, titik bor 2, titik bor 3,

dst) yang berpengaruh terhadap hasil taksiran. Semakin tinggi pangkat yang digunakan, hasilnya semakin mendekati metode *Polygon* sampel terdekat.

5. Dalam metode ini, komputer memeriksa jarak antara sampel dari kumpulan blok dan menolak data yang berada diluar radius tertentu dan ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Annels, 1991).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k} Z_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^k}} \dots\dots\dots (1)$$

dimana,

Z = Kadar taksiran (%)

n = Jumlah data

i = Kadar ke-i (%)

di = Spasi Antar Titik Taksiran dengan Titik ke-i yang Ditaksir (m)

k = Pangkat (*script*)

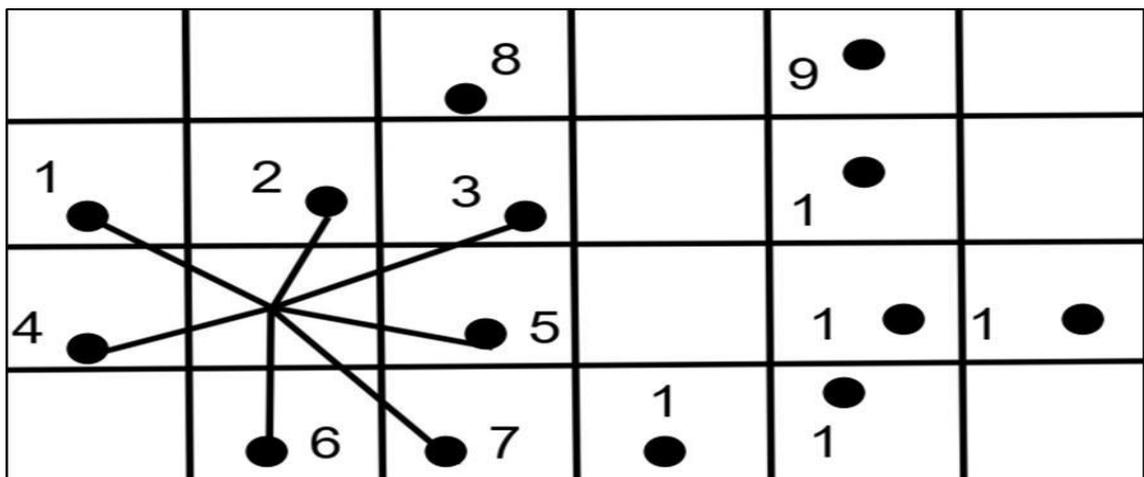
Zi = Kadar awal (%)

Pangkat "k" biasanya bervariasi antara 1, 2, 3, dan seterusnya. Metode ini hanya berlaku ketika sampel dalam area pencarian tertentu dan dilakukan secara berulang-ulang dan biasanya dilakukan dengan komputerisasi (Annels, 1991).

Kelebihan dari metode interpolasi IDW ini adalah karakteristik interpolasi dapat dikontrol dengan membatasi titik-titik masukan yang digunakan dalam proses interpolasi. Titik-titik yang terletak jauh dari titik sampel dan yang diperkirakan memiliki korelasi spasial yang kecil atau bahkan tidak memiliki korelasi spasial dapat dihapus dari perhitungan. Titik-titik yang digunakan dapat ditentukan berdasarkan jarak yang ingin diinterpolasi. Kelemahan dari interpolasi IDW adalah tidak dapat mengestimasi nilai diatas nilai maksimum dan dibawah nilai minimum dari titik-titik sampel (Pramono, 2008)

Kekurangan dari metode IDW adalah nilai hasil interpolasi terbatas pada nilai yang ada pada data sampel. Pengaruh dari data sampel terhadap hasil interpolasi disebut sebagai isotropic. Dengan kata lain, karena metode ini menggunakan rata-rata dari data sampel sehingga nilainya tidak bisa lebih kecil dari minimum atau lebih besar dari data sampel. Jadi, puncak bukit atau lembah terdalam tidak dapat ditampilkan dari hasil interpolasi model ini (Watson & Philip, 1985).

Data di dekat blok memperoleh bobot lebih besar, sedangkan data jauh dari blok bobotnya lebih kecil. Bobot ini berbanding terbalik dengan jarak data dari blok yang ditaksir. Metode ini hanya memperlihatkan jarak dan belum memperlihatkan efek pengelompokan data, sehingga data dengan jarak yang sama namun mempunyai sebaran yang berbeda masih akan memberikan hasil yang sama sehingga tidak memberikan korelasi ruang antara titik data dengan titik data yang lain. Metode IDW yang digunakan yaitu di mana kadar dibagikan pada blok-blok terdekat dengan jarak tertentu untuk tiap titik pengambilan sampel seperti pada Gambar berikut ini:



Gambar 2.3 Metode estimasi sumberdaya dengan IDW (Idrus, 2007).

2. Metode Kriging

Interpolasi kriging dapat digolongkan dalam interpolasi stokastik. Interpolasi stokastik menawarkan penilaian kesalahan dengan nilai prediksi dengan mengasumsikan

kesalahan acak. Metode kriging merupakan estimasi stochastic mirip dengan IDW yang menggunakan kombinasi linear dari bobot untuk memperkirakan nilai di antara sampel data. Metode ini dikembangkan oleh D.L. Krige untuk memperkirakan nilai dari bahan tambang. Asumsi dari model ini adalah jarak dan orientasi antara sampel data menunjukkan korelasi spasial.

Metode kriging mempunyai keunggulan dan kelemahan menurut Lagueche (2006), keunggulannya yaitu kemampuan untuk mengidentifikasi variansi dari nilai yang diestimasi sehingga tingkat presisi dari hasil estimasi dapat diketahui. Metode kriging tetap dapat digunakan meskipun tidak ditemukan korelasi spasial antar data. Kelemahan kriging yaitu mengasumsikan data menyebar normal sementara kebanyakan data lapangan tidak memenuhi kondisi tersebut. Selain itu, semivariogram yang dihitung untuk suatu himpunan data tidak berlaku untuk himpunan data lainnya. Dengan demikian estimasi semivariogram akan sulit bila titik sampel yang digunakan tidak mencukupi.

Tiga pokok dalam estimasi kriging yang bergantung pada model dengan sifat acak yaitu simple kriging, ordinary kriging, dan universal kriging (Bohling, 2005; Goovaerts, 1998).

a. *Simple Kriging*

Simple kriging merupakan metode kriging dengan asumsi bahwa rata-rata (mean) dari populasi telah diketahui dan bernilai konstan. Pengolahan dari metode simple kriging adalah dengan cara data spasial yang akan diduga dipartisi menjadi beberapa bagian.

b. *Ordinary kriging*

Ordinary kriging merupakan metode yang diasumsikan rata-rata (mean) dari populasi tidak diketahui, dan pada data spasial tersebut tidak mengandung *trend*.

Selain tidak mengandung trend, data yang digunakan juga tidak mengandung pencilan.

c. *Universal Kriging*

Universal kriging merupakan metode kriging yang dapat diaplikasikan pada data spasial yang mengandung trend atau data yang tidak stasioner.

3. *Ordinary kriging*

Ordinary kriging dikenal sebagai teknik kriging linear karena menggunakan kombinasi linier terbobot dari data yang tersedia untuk proses estimasi (Isaaks and Srivastava, 1989). Metode *Ordinary kriging* merupakan metode Kriging yang menghasilkan estimator yang bersifat BLUE. Hal tersebut berarti mempunyai variansi terkecil dibanding estimator lain. Data yang digunakan pada metode *Ordinary kriging* merupakan data spasial dengan rata-rata populasi tidak diketahui dan di asumsi bersifat stasioner.

Bobot *ordinary kriging* memenuhi sifat tak bias dengan $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ dengan n adalah jumlah sampel yang diketahui. Parameter tambahan *m* merupakan *Lag range multiplier* yang digunakan untuk meminimalkan galat *kriging*. Nilai bobot *ordinary kriging* dapat diperoleh melalui persamaan berikut:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(s_1, s_1) & \gamma(s_1, s_2) & \dots & \gamma(s_1, s_n) & 1 \\ \gamma(s_2, s_1) & \gamma(s_2, s_2) & \dots & \gamma(s_2, s_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(s_n, s_1) & \gamma(s_n, s_2) & \dots & \gamma(s_n, s_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(s_1, s_0) \\ \gamma(s_2, s_0) \\ \vdots \\ \gamma(s_n, s_0) \\ 1 \end{pmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

dimana,

$\lambda_{(1,2,\dots,n)}$: vektor pembobot ke s_i

γ : semivariogram antara titik $(s_{1,\dots,n}, s_{1,\dots,n})$ yang terdapat pada jarak sebesar h

Ordinary kriging berhubungan dengan prediksi spasial dengan 2 asumsi (Cressie, 1990), yaitu:

1. Asumsi Model

$$Z(s) = \mu + e(s), \quad s \in R \text{ dan } \mu \text{ tidak diketahui} \dots\dots\dots(3)$$

2. Asumsi Prediksi

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s) \text{ dengan } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \dots\dots\dots(4)$$

dimana,

$Z(s)$: peubah acak bebas

μ : ekspektasi peubah acak $Z(s)$

$e(s)$: nilai *error* pada $Z(s)$

R : bilangan *real*

N : banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi

Karena koefisien dari hasil penjumlahan prediksi linier adalah 1 dan memiliki syarat tak bias maka $E\hat{Z}(s) = \mu = E Z(s) = Z(s)$, untuk setiap $\mu \in R$ dan karena $Z(s)$ merupakan suatu konstanta maka $E Z(s) = Z(s)$ terdapat *estimator error* $e(s)$, pada setiap lokasi merupakan perbedaan antara nilai estimasi $\hat{Z}(s)$ dengan nilai sebenarnya $Z(s)$ yang dinyatakan sebagai berikut:

$$e(s) = \hat{Z}(s) - Z(s) \dots\dots\dots (5)$$

dimana,

$e(s)$: estimator *error*

$\hat{Z}(s)$: nilai estimasi

$Z(s)$: nilai sebenarnya

Dengan $E e(s) = 0$. Selisih $\hat{Z}(s) - Z(s)$ disebut dengan galat estimasi atau bias.

Bobot $\lambda_i, i=1,2,\dots,n$ ditentukan berdasarkan kriteria:

1. Tak bias: $[\hat{Z}(s) - Z(s)] = 0$

2. Variansi: $\text{var}[\hat{Z}(s) - Z(s)]$ minimum

Dengan menggunakan persamaan (10) dapat dibuktikan bahwa $\hat{Z}(s)$ merupakan *estimator* tak bias yaitu:

$$E e(s) = E \hat{Z}(s) - E Z(s) \dots\dots\dots (6)$$

dengan $E e(s) = 0$, maka diperoleh:

$$E \hat{Z}(s) = Z(s) \dots\dots\dots (7)$$

2.5 Variogram dan Semi variogram

Variogram adalah grafik variansi terhadap jarak (*lag*) sedangkan semi variogram adalah setengah kuantitas dari variogram (Cressie, 1993). Variogram menentukan ukuran dari variansi yang digunakan untuk menentukan jarak dimana nilai-nilai data pengamatan menjadi tidak ada korelasinya. Estimasi variogram memiliki peran yang penting, misalnya dalam penentuan nilai-nilai optimal dari bobot setiap sampel. Cara yang paling alami untuk membandingkan dua nilai, $Z(x)$ dan $Z(x+h)$ pada dua poin x dan $x+h$ pada nilai yang mutlak seharusnya mempertimbangkan nilai rata-rata $[Z(x) - Z(x+h)]$ (Cressie, 1993).

2.5.1 Variogram eksperimental

Variogram eksperimental adalah variogram yang diperoleh dari data yang diamati. Variogram didefinisikan sebagai berikut:

$$2\gamma(h) = E[Z(x) - Z(x+h)]^2 \dots\dots\dots (8)$$

2.5.2 Semi variogram eksperimental

Semi variogram eksperimental adalah nilai dugaan yang diperoleh dari penarikan sampel di lapangan. Variogram eksperimental dibuat berdasarkan nilai korelasi spasial antara dua buah variabel yang dipisahkan oleh suatu jarak (h) tertentu. Semi variogram eksperimental dirumuskan sebagai berikut:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \dots\dots\dots (9)$$

dimana,

- $\gamma(h)$: Semi variogram eksperimental
- x_i : Lokasi titik sampel
- $Z(x_i)$: Nilai observasi pada lokasi x_i
- h : Jarak antara dua titik sampel
- x_i+h : Pasangan titik sampel yang berjarak h
- $N(h)$: Banyak pasangan data yang memiliki jarak h .

Setelah diperoleh nilai semi variogram eksperimental, maka dapat dihitung parameter-parameter yang akan digunakan untuk perhitungan semi variogram teoritis. Beberapa parameter yang digunakan untuk mencari nilai dalam semi variogram teoritis adalah *nugget effect*, *sill*, dan *range*.

1. *Range*

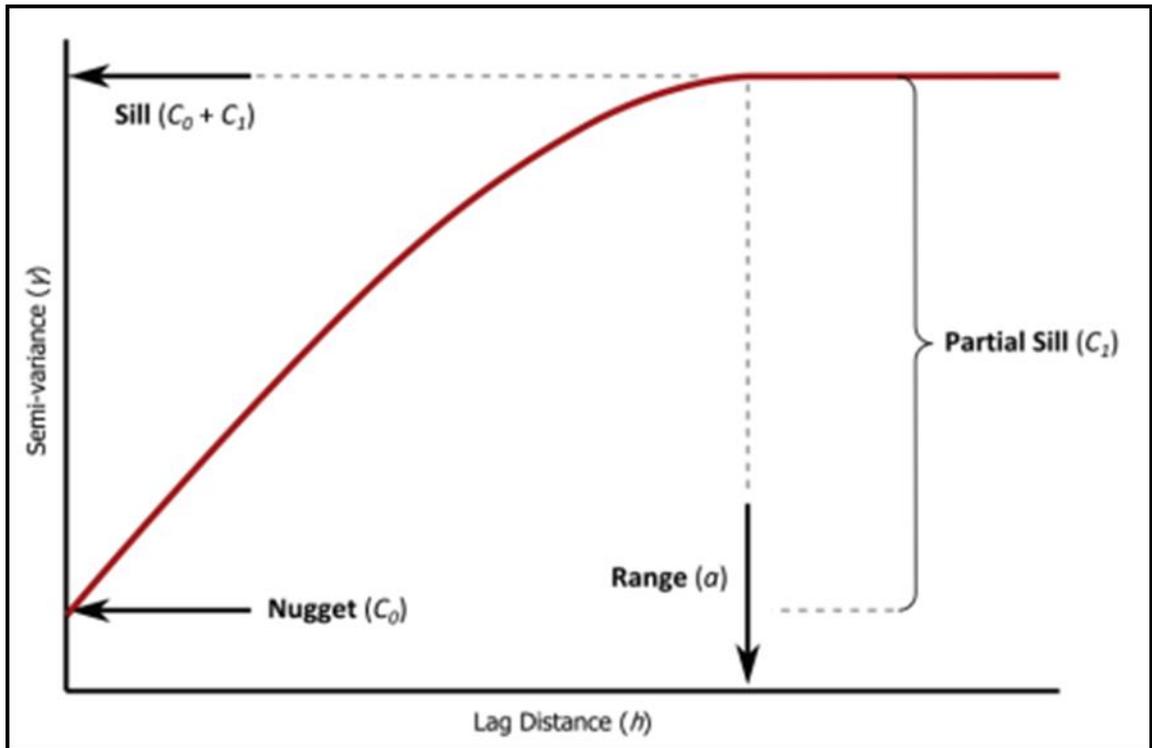
Range adalah jarak dimana variogram merupakan sebuah dataran tinggi (Isaaks and Srivastava, 1989). Jarak yang dimaksud adalah variogram harus mencapai nilai *sill*.

2. *Sill*

Sill adalah masa stabil suatu variogram dalam mencapai *range*. Variogram menjadi suatu wilayah yang datar yaitu ragamnya tidak mengalami suatu kenaikan (Isaaks and Srivastava, 1989).

3. *Nugget Effect*

Kediskontinuan pada pusat variogram terhadap garis vertikal yang melompat dari nilai 0 pada pusat nilai variogram dengan pemisahan jarak terkecil disebut dengan *nugget effect* (Isaaks and Srivastava, 1989).



Gambar 2.4 Komponen Variogram dan Semivariogram.

Setelah memperoleh nilai dari ketiga parameter di atas, selanjutnya dilakukan perhitungan nilai semivariogram teoritis. Nilai yang diperoleh dari semivariogram teoritis akan digunakan untuk membandingkan nilai antara semivariogram eksperimental dengan teoritis. Selanjutnya dipilih model mana yang memiliki nilai paling kecil, yang nantinya akan digunakan untuk melakukan pendugaan data spasial. Berikut adalah beberapa model semivariogram teoritis yang digunakan sebagai pembandingan (Micromine, 2014):

1. Model *Spherical (Sph)* adalah bentuk linear dengan kecepatan perubahan *slope* untuk mencapai *sill*. Model *spherical* digunakan dalam estimasi kualitas kadar.

$$y(h) = \begin{cases} C_0 + C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] & h \leq a \\ C_0 + C & \text{dan untuk } h > a \end{cases} \dots\dots\dots (10)$$

dimana,

h : Jarak lokasi sampel

C_0+C : *Sill*, yaitu nilai semivariogram untuk jarak pada saat besarnya konstan
 a : *Range*, yaitu jarak pada saat nilai semivariogram mencapai *sill*.

2. Model *Exponential (Exp)* adalah model yang memiliki lengkungan lebih besar dibandingkan dengan model *spherical* dan menunjukkan perubahan *slope* secara bertahap hingga mencapai *sill*. Model *exponential* digunakan dalam estimasi kualitas kadar.

$$\gamma(h)=C_0+C\left[1-\exp\left(-\frac{3h}{a}\right)\right] \dots\dots\dots(11)$$

3. Model *Gaussian (Gaus)* merupakan model yang berbentuk parabolik yang secara bertahap perubahan *slope* akan mencapai *sill*. Model *Gaussian* digunakan untuk perhitungan kontaminasi air dan udara.

$$\gamma(h)=C_0+C\left[1-\exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right)\right] \dots\dots\dots (12)$$

4. *Linear (Lin)* dan *General Linear (Gen Lin)* merupakan model yang tidak mencapai *sill*. *General Linear* digunakan untuk elevasi topografi dan ketebalan *seam* batubara.