

SKRIPSI

ESTIMASI SUMBERDAYA ENDAPAN BIJIH NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE *INVERSE DISTANCE* *WEIGHTING* DAN *ORDINARY KRIGING*

(Studi Kasus: Blok X, PT Tiran Indonesia, *Site* Lameruru, Kabupaten Konawe Utara,
Provinsi Sulawesi Tenggara)

Disusun dan diajukan oleh:

MUH. FADHIL FAJAR ASRI
D111 18 1019



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ESTIMASI SUMBERDAYA ENDAPAN BIJIH NIKEL LATERIT MENGUNAKAN METODE *INVERSE DISTANCE WEIGHTING* DAN *ORDINARY KRIGING*

(Studi Kasus: Blok X, PT Tiran Indonesia, Site Lameruru, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara)

Disusun dan diajukan oleh

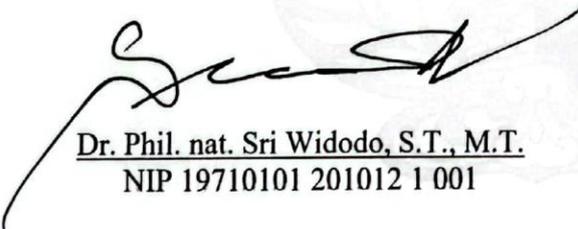
MUH. FADHIL FAJAR ASRI
NIM D111 18 1019

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 19 Oktober 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

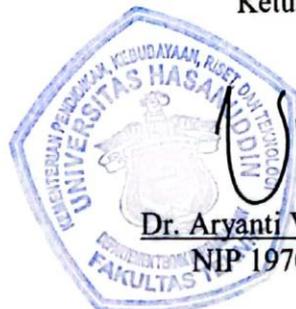
Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,


Dr. Phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T.
NIP 19710101 201012 1 001


Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.
NIP 19660409 199703 1 002

Ketua Program Studi,



Dr. Aryanti Virtanti Anas, S.T., M.T.
NIP 19701005 200801 2 026

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Muh. Fadhil Fajar Asri
NIM : D111 18 1019
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Nikel Laterit Menggunakan Metode *Inverse Distance Weighting* dan *Ordinary Kriging*

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.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 19 Oktober 2023

Yang Menyatakan



Muh. Fadhil Fajar Asri

ABSTRAK

MUH. FADHIL FAJAR ASRI. Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Nikel Laterit Menggunakan Metode *Inverse Distance Weighting* dan *Ordinary Kriging* (Studi Kasus: Blok X, PT Tiran Indonesia, *Site Lameruru*, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara), (dibimbing oleh Dr. Phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T. dan Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.).

Nikel merupakan sumberdaya mineral ekonomis yang perlu ditambang untuk dapat memenuhi kebutuhan dibidang perindustrian. Wilayah Indonesia Timur khususnya daerah Sulawesi Tenggara, terdapat salah satu daerah yang memiliki potensi sumberdaya mineral nikel laterit yaitu di Kabupaten Konawe Utara. Dalam penambangan nikel laterit, diperlukan estimasi untuk menghitung sumberdaya kemudian dilakukan studi kelayakan dengan memperhitungkan faktor pengubah dari sumberdaya menjadi cadangan sebelum proses penambangan berlangsung. Estimasi sumberdaya berperan penting dalam menentukan kuantitas dan kualitas suatu endapan. Ada beberapa metode yang dapat digunakan dalam mengestimasi sumberdaya nikel laterit. Beberapa diantaranya yaitu metode *inverse distance weighting* dan metode *ordinary kriging*. Tujuan dari penelitian ini yaitu melakukan analisis univariat, analisis variogram terhadap titik bor serta menganalisis hasil estimasi sumberdaya nikel laterit pada blok X PT Tiran Indonesia, *Site Lameruru*. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *inverse distance weighting* (IDW) dan metode *ordinary kriging* (OK). Terdapat beberapa aplikasi yang digunakan seperti Microsoft Excel, ArcMap dan Surpac. Hasil analisis univariat didapatkan jumlah sampel 677, nilai minimum 0,21 %, nilai maksimum 3,13 %, *mean* 1,40 % dan *median* 1,20 %. Hasil analisis variogram didapatkan *range* mayor 26,71 m, *range* semimayor 15,99 m, *range* minor 29,57 m. *Anisotropy factors* rasio mayor/semimayor 1,80, rasio mayor/minor 3,23. Hasil estimasi *inverse distance weighting* didapatkan volume *ore* sebesar 460.625 m³, volume *waste* sebesar 381.719 m³, tonase *ore* sebesar 644.875 wmt, tonase *waste* sebesar 534.406 wmt dengan rata-rata kadar 1,32 %. Hasil estimasi *ordinary kriging* didapatkan volume *ore* sebesar 505.938 m³, volume *waste* sebesar 336.406 m³, tonase *ore* sebesar 708.313 wmt, tonase *waste* sebesar 470.969 wmt dengan rata-rata kadar 1,33 %.

Kata Kunci: Analisis Univariat, Analisis Variogram, Estimasi Sumberdaya

ABSTRACT

MUH. FADHIL FAJAR ASRI. *Resource Estimation of Laterite Nickel Ore Deposits Using Inverse Distance Weighting and Ordinary Kriging Methods (Case Study: Block X, PT Tiran Indonesia, Site Lameruru, North Konawe Regency, Southeast Sulawesi Province), (supervised by Dr. Phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T. and Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.).*

Nickel is an economic mineral resource that needs to be mined to meet the needs of the industrial sector. Eastern Indonesia, especially the Southeast Sulawesi region, there is one area that has potential laterite nickel mineral resources, namely in North Konawe Regency. In nickel laterite mining, estimation is needed to calculate resources and then a feasibility study is carried out by taking into account the factors that convert resources into reserves before the mining process takes place. Resource estimation plays an important role in determining the quantity and quality of a deposit. There are several methods that can be used in estimating nickel laterite resources. Some of them are inverse distance weighting method and ordinary kriging method. The purpose of this study is to conduct univariate analysis, variogram analysis of drill points and analyze the results of laterite nickel resource estimation in block X PT Tiran Indonesia, Site Lameruru. The methods used in this research are the inverse distance weighting (IDW) method and the ordinary kriging (OK) method. There are several applications used such as Microsoft Excel, ArcMap and Surpac. The results of univariate analysis obtained the number of samples 677, minimum value 0.21%, maximum value 3.13%, mean 1.40% and median 1.20%. The results of variogram analysis obtained major range 26.71 m, semimajor range 15.99 m, minor range 29.57 m. Anisotropy factors major/semimajor ratio 1.80, major/minor ratio 3.23. The inverse distance weighting estimation results obtained ore volume of 460,625 m³, waste volume of 381,719 m³, ore tonnage of 644,875 wmt, waste tonnage of 534,406 wmt with an average content of 1.32%. Ordinary kriging estimation results obtained ore volume of 505,938 m³, waste volume of 336,406 m³, ore tonnage of 708,313 wmt, waste tonnage of 470,969 wmt with an average grade of 1.33%.

Keywords: Univariate Analysis, Variogram Analysis, Resource Estimation

DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
PERNYATAAN KEASLIAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL.....	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan	2
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	3
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Pembentukan Endapan Nikel Laterit	4
2.2 Geologi Regional	9
2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral	14
2.4 Analisis Geostatistik	16
2.5 Estimasi Sumberdaya.....	23
BAB III METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	30
3.1 Sumber Data	30
3.2 Pengolahan Data	32
3.3 Diagram Alir Penelitian	38
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	40
4.1 Analisis Univariat	40
4.2 Analisis Variogram	42
4.3 Estimasi Sumberdaya.....	46
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	49
5.1 Kesimpulan.....	49
5.2 Saran.....	49
DAFTAR PUSTAKA	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Proses pembentukan endapan nikel laterit (Freyssinet <i>et al</i> , 2005)	5
Gambar 2	Potongan melintang permukaan sebelum dan setelah proses pelapukan nikel (Hernandi <i>et al</i> , 2017)	8
Gambar 3	Geomorfologi pulau sulawesi (Bemmelen, 1949).....	10
Gambar 4	Stratigrafi regional pulau sulawesi (Bemmelen, 1949)	11
Gambar 5	Peta geologi sulawesi tenggara (Surono, 2010)	13
Gambar 6	Hubungan hasil eksplorasi, sumberdaya dan cadangan mineral (KCMI, 2017)	16
Gambar 7	Komponen penyusun variogram (Coombes, 2008).....	17
Gambar 8	Pencarian pasangan data dalam perhitungan variogram eksperimental (Sinclair and Blackwell, 2004).....	18
Gambar 9	Semivariogram eksperimental berdasarkan jarak <i>lag</i> (Sinclair and Blackwell, 2004).....	19
Gambar 10	Semivariogram eksperimental dengan <i>sawtooth</i> dan <i>smooth curve</i> (Sinclair and Blackwell, 2004).....	19
Gambar 11	Contoh model variogram sferis (Bargawa, 2018)	21
Gambar 12	Contoh model variogram eksponensial (Bargawa, 2018).....	22
Gambar 13	Contoh model variogram <i>hole-effect</i> (Bargawa, 2018)	23
Gambar 14	Pembobotan metode <i>invers distance weighting</i> (Bargawa, 2018)	25
Gambar 15	<i>Drill hole</i>	33
Gambar 16	<i>String top limonite</i>	34
Gambar 17	<i>String top saprolite</i>	34
Gambar 18	<i>String bottom saprolite</i>	34
Gambar 19	<i>Digital terrain model</i> zona <i>top limonite</i>	35
Gambar 20	<i>Digital terrain model</i> zona <i>top saprolite</i>	36
Gambar 21	<i>Digital terrain model</i> zona <i>bottom saprolite</i>	36
Gambar 22	Histogram nilai komposit kadar nikel.....	37
Gambar 23	<i>Blockmodel</i>	37
Gambar 24	Diagram alir penelitian	39
Gambar 25	Grafik histogram komposit nikel.....	40
Gambar 26	Grafik variogram mulai dari <i>azimuth</i> 0° hingga 165°	42
Gambar 27	Grafik variogram utama dengan arah 75°	43
Gambar 28	Hasil grafik variogram <i>nugget</i> , <i>sill</i> , dan <i>range</i> mayor arah 75°	43
Gambar 29	Grafik variogram kedua dengan arah 165°	44
Gambar 30	Grafik variogram mayor	45
Gambar 31	Grafik variogram semimayor	45
Gambar 32	Grafik variogram minor	45
Gambar 33	Variogram <i>map</i> hasil akhir	46
Gambar 34	Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> hasil estimasi menggunakan metode <i>inverse distance weighting</i>	47
Gambar 35	Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> hasil estimasi menggunakan metode <i>ordinary kriging</i>	48

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Contoh data <i>assay</i>	30
Tabel 2	Contoh data <i>collar</i>	31
Tabel 3	Contoh data <i>survey</i>	31
Tabel 4	Contoh data <i>geology</i>	32
Tabel 5	Hasil analisis statistik univariat pada data komposit kadar nikel	41
Tabel 6	Hasil estimasi dengan metode <i>inverse distance weighting</i>	47
Tabel 7	Hasil estimasi dengan metode <i>ordinary kriging</i>	48

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Ha	Hektar
IUP	Izin Usaha Pertambangan
PT	Perseroan Terbatas
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
OK	<i>Ordinary Kriging</i>
KCMI	Komite Cadangan Mineral Indonesia
CO ₂	Karbon dioksida
Mg	Mangan
SiO ₂	Silikon dioksida
Ni	Nikel
Fe	Besi
Cr	Krom
Al	Aluminium
Co	Kobalt
pH	Potential Hydrogen
Ms	Microsoft
GIS	<i>Geographic Information System</i>
SSCT	<i>Southeast Sulawesi Continental Terrain</i>
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimator</i>
CSV	<i>Comma Separated Value</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
CoG	<i>Cut-off Grade</i>
WMT	<i>Wet Metric Ton</i>
DMT	<i>Dry Metric Ton</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Sebaran Titik Bor	54
Lampiran 2 Tabel Data <i>Assay</i>	56
Lampiran 3 Tabel Data <i>Collar</i>	77
Lampiran 4 Tabel Data <i>Survey</i>	79
Lampiran 5 Tabel Data <i>Geology</i>	81

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Pertama-tama penulis panjatkan puji syukur atas kehadiran Allah *Subhanahu Wa Taala*, karena atas berkat rahmat dan hidayahnya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul *Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Nikel Laterit Menggunakan Metode Inverse Distance Weighting dan Ordinary Kriging (Studi Kasus: Blok X, PT Tiran Indonesia, Site Lameruru, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara)*. Shalawat serta salam tidak lupa pula penulis panjatkan kepada baginda Rasulullah *Shallallahu Alaihi Wasallam*, nabi dan rasul *rahmatan lil alamin* yang membungkam seluruh tirani-tirani kebodohan dan membawa alam semesta menuju zaman yang terang benderang.

Skripsi merupakan salah satu syarat pada instansi terkait perguruan tinggi (khususnya program studi Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin) yang wajib ditulis oleh mahasiswa sebagai bagian dari persyaratan akhir pendidikan akademisnya. Skripsi ini memuat informasi terkait kegiatan yang telah dilakukan dan hasil yang telah didapatkan pada saat penelitian berlangsung.

Banyak hal yang telah terjadi selama proses penyusunan skripsi ini dan itu semua tidak lepas dari bantuan berbagai pihak sehingga laporan ini dapat disusun sebaik mungkin. Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. Tiran Indonesia yang telah berkenan memberikan data perusahaan untuk kemudian penulis olah menjadi skripsi.

Penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak Dr. Phil. Nat. Sri Widodo, S.T., M.T., selaku pembimbing utama penulis dan bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M.T., selaku pembimbing pendamping sekaligus kepala Laboratorium Eksplorasi Mineral yang telah mengarahkan penulis selama menyusun skripsi hingga menjadi pembimbing pada saat pelaksanaan seminar hasil. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada bapak Dr. Eng. Ir. Muhammad Ramli, M.T., dan ibu Rizki Amalia, S.T., M.T., yang telah berkenan menjadi penguji penulis pada judul skripsi kali ini.

Kemudian penulis ingin menyampaikan permohonan maaf dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada keluarga dan kedua orang tua penulis, ayahanda Asri B., ibunda Rasmi, S.Pd., serta kepada adinda Futrya Nurfadia Asri dan Muh. Akhdan Farhayugi Asri yang telah memberikan dukungan, semangat dan doa yang tak terhitung jumlahnya kepada penulis. Selanjutnya penulis ingin memberikan terima kasih dan rasa bangga kepada angkatan terkeren dan angkatan tersolid TUNNEL 18 (Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin angkatan 2018) yang telah memberikan usaha, tenaga, pikiran dan dorongan untuk menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada M. Fahmi dan Muh. Alfian Lasefeati atas bantuan tenaga dan pikirannya dalam penyusunan skripsi ini. Terakhir penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Putri Hernanda Zainal karena telah setia menemani dan memberikan semangat serta dorongan kepada penulis dalam menyusun skripsi.

Penulis menyadari terdapat banyak kekurangan dibalik skripsi ini karena sesungguhnya kesempurnaan hanya milik Allah SWT. Maka dari itu, kritik dan saran yang membangun akan penulis terima sebagai bentuk pembelajaran untuk penulis lebih baik lagi kedepannya. Terlepas dari itu, penulis berharap dengan adanya skripsi ini dapat memberikan manfaat untuk lingkungan sekitar. Semoga apa yang telah penulis tuangkan kedalam skripsi ini dan seluruh pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini dapat bernilai ibadah di sisi Allah *Subhanahu Wa Taala*.

Amin ya rabbal alamin.

Gowa, Oktober 2023

Muh. Fadhil Fajar Asri

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Nikel sebagai salah satu sumberdaya mineral ekonomis yang ada di bumi ini perlu ditemukan keberadaannya untuk dapat memenuhi kebutuhan dibidang perindustrian. Nikel mempunyai sifat tahan karat. Dalam keadaan murni nikel bersifat lunak, tetapi jika dipadukan (*alloy*) dengan besi, krom, dan logam lainnya dapat membentuk baja tahan karat yang keras. Perpaduan nikel, krom dan besi menghasilkan baja tahan karat (*stainless steel*) yang banyak diaplikasikan pada peralatan dapur, ornamen-ornamen rumah dan gedung, serta komponen industri (Arifin *et al*, 2015).

Nikel laterit pada umumnya memiliki empat zona lapisan yaitu lapisan *red* limonit, lapisan limonit, lapisan saprolit, dan lapisan *bedrock*. Kadar nikel terendah terdapat pada lapisan limonit, namun pada lapisan limonit mengandung unsur kobal yang tinggi. Kurangnya teknologi dalam pengolahan nikel kadar rendah, sehingga lapisan limonit sering dijadikan sebagai *overburden* dan juga dianggap sebagai pengotor. Potensi dari nikel kadar rendah dan kobal yang dimiliki, seharusnya dapat diolah dengan baik salah satunya dengan cara pemilihan metode dalam pengolahannya sehingga dapat meningkatkan *recovery* (Fan *and* Gerson, 2013).

Saat ini industri pertambangan dihadapkan pada suatu problematika dimana cadangan tambangnya semakin menipis bahkan habis dan mengakibatkan perusahaan harus menghentikan kegiatan penambangan pada suatu daerah. Sumberdaya mineral yang memiliki sifat khusus yaitu *non renewable resources* yang artinya apabila bahan galian tersebut tidak akan terbaharui kembali atau dengan kata lain industri pertambangan adalah industri besar tanpa daur (Elias, 2001).

Wilayah Indonesia Timur khususnya pada daerah Sulawesi Tenggara salah satu daerah yang memiliki potensi sumberdaya mineral berupa endapan nikel laterit yaitu yang terletak di Kabupaten Konawe Utara. Dalam 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 penambangan, cara penambangan yang akan dilakukan, bahkan dalam memperkirakan waktu yang akan dibutuhkan oleh perusahaan dalam melakukan usaha penambangannya sehingga dapat menekan jumlah *cost* serta memberikan keuntungan bagi perusahaan itu sendiri dalam proses penambangan selanjutnya (Mustika, 2015).

Ada beberapa cara atau metode yang dapat digunakan dalam mengestimasi sumberdaya nikel laterit. Beberapa diantaranya yaitu metode *inverse distance weighting* dan metode *kriging*. Metode *kriging* yang digunakan disini adalah *kriging* linier yaitu *ordinary kriging*. Oleh karena maksud di atas maka dilakukanlah penelitian ini untuk mengetahui sumberdaya nikel laterit pada blok X, PT Tiran Indoensia, Site Lameruru, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Penelitian ini juga bermaksud untuk mengetahui penggunaan dan hasil estimasi dari dua metode yakni metode *inverse distance weighting* dan metode *ordinary kriging*.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini sesuai dengan latar belakang di atas yaitu:

1. Bagaimana hasil analisis univariat pada daerah penelitian.
2. Bagaimana hasil analisis variogram pada daerah penelitian.
3. Bagaimana hasil estimasi dengan metode *inverse distance weighting* dan metode *ordinary kriging* pada daerah penelitian.

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Melakukan analisis univariat terhadap titik bor pada daerah penelitian.
2. Melakukan analisis variogram terhadap titik bor pada daerah penelitian.
3. Mengestimasi sumberdaya nikel laterit pada daerah penelitian dan menentukan metode yang paling tepat untuk digunakan.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Perusahaan

Manfaat yang bisa diperoleh bagi perusahaan yaitu sebagai bahan pertimbangan kepada perusahaan dalam memilih metode yang tepat dalam mengestimasi sumberdaya nikel laterit.

2. Akademik

Manfaat yang bisa diperoleh bagi kalangan akademik yaitu sebagai bahan pembelajaran atau referensi dalam menambah wawasan mengenai estimasi sumberdaya nikel laterit dengan menggunakan metode *inverse distance weighting* dan metode *ordinary kriging*.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Ruang lingkup dari penelitian ini terbatas pada salah satu blok dari IUP PT Tiran Indonesia, *Site Lameruru*, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Pada IUP PT Tiran Indonesia, *Site Lameruru*, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara terdapat blok-blok lain yang tidak dapat dilakukan penelitian dikarenakan tidak adanya data yang diperoleh untuk diteliti ataupun dianalisis. Data bor yang didapatkan akan dilakukan analisis estimasi menggunakan metode *inverse distance weighting* (IDW) dan metode *ordinary kriging* (OK) dengan menggunakan aplikasi *microsoft excel*, *arcgis* dan juga *surpac*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

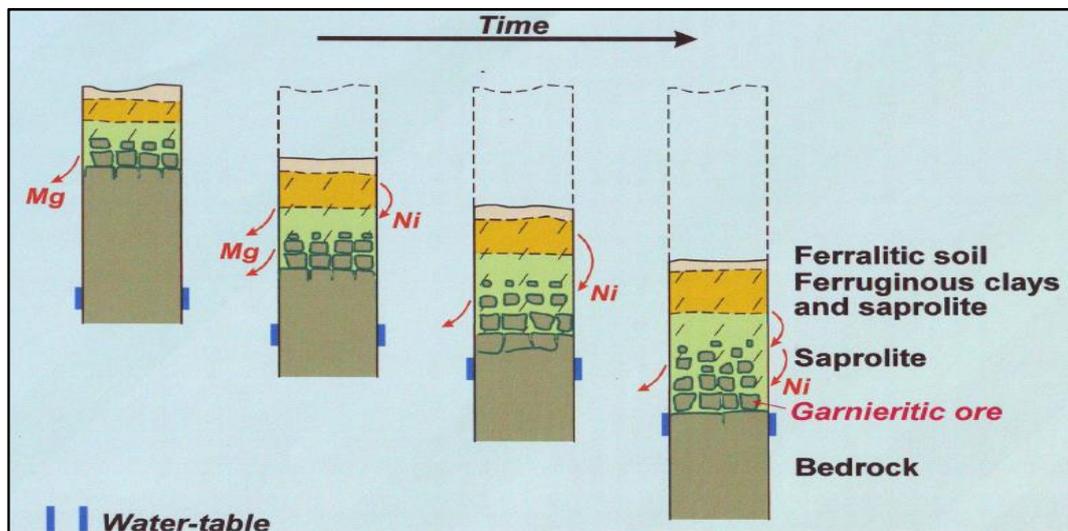
2.1 Pembentukan Endapan Nikel Laterit

Proses konsentrasi nikel pada endapan nikel laterit dimulai dari air permukaan yang mengandung CO₂ dari atmosfer dan terkayakan kembali oleh material-material organik di permukaan meresap ke bawah permukaan tanah sampai pada zona pelindihan, di mana fluktuasi air tanah berlangsung. Akibat fluktuasi ini, air tanah yang kaya akan CO₂ akan kontak dengan zona saprolit yang masih mengandung batuan asal dan melarutkan mineral-mineral yang tidak stabil seperti olivin, serpentin dan piroksin. mg, si dan ni akan larut dan terbawa sesuai dengan aliran air tanah dan akan memberikan mineral-mineral baru pada proses pengendapan kembali (Isjudarto, 2013).

Proses pelapukan dimulai pada batuan ultrabasa (peridotit, dunit, serpentin), di mana pada batuan ini banyak mengandung mineral olivin, magnesium silikat, dan besi silikat yang pada umumnya mengandung kurang lebih 0,30 % nikel. Batuan tersebut sangat mudah dipengaruhi oleh pelapukan lateritik. Air tanah yang kaya akan CO₂ berasal dari udara luar dan tumbuh-tumbuhan akan menghancurkan olivin. Terjadi penguraian olivin, magnesium, besi, nikel dan silika ke dalam larutan, cenderung untuk membentuk suspensi koloid dari partikel-partikel silika yang submikroskopis. Di dalam larutan besi akan bersenyawa dengan oksida dan mengendap sebagai *ferri* hidroksida. Akhirnya endapan ini akan menghilangkan air dengan membentuk mineral-mineral karat, yaitu hematit dan kobalt dalam jumlah kecil, jadi besi oksida mengendap dekat dengan permukaan tanah (Boldt, 1996).

Proses laterisasi adalah proses pencucian pada mineral yang mudah larut dan silika pada profil laterit pada lingkungan yang bersifat asam dan lembab serta membentuk konsentrasi endapan hasil pengkayaan proses laterisasi pada unsur Fe, Cr, Al, Ni dan Co (Nushantara, 2002). Proses pelapukan dan pencucian yang terjadi akan menyebabkan unsur Fe, Cr, Al, Ni dan Co terkayakan di zona limonit dan terikat sebagai mineral-mineral oksida atau hidroksida, seperti limonit, hematit, dan goetit. Umumnya endapan nikel terbentuk pada batuan ultrabasa dengan kandungan Fe di olivin yang tinggi dan nikel berkadar antara 0,2% -0,4% (Isjudarto, 2013).

Berikut merupakan gambar proses pembentukan nikel laterit yang dapat dilihat pada gambar 1. Pelapukan batuan dasar yang kemudian menjadi *ferralitic soil* telah menguraikan mineral nikel dalam batuan. Selanjutnya terdapat *limonite* yang merupakan pelapukan lanjut dari batuan ultrabasa, komposisinya meliputi oksida besi yang dominan, goethit dan magnetit. Selanjutnya *saprolite* yang merupakan zona pengayaan unsur Ni. Terakhir *bedrock* merupakan zona terbawah, tersusun atas bongkahan besar dan blok peridotit (batuan dasar) yang secara umum sudah tidak mengandung mineral ekonomis.



Gambar 1 Proses pembentukan endapan nikel laterit (Freyssinet *et al*, 2005)

2.1.1 Faktor pembentukan nikel laterit

Pembentukan bijih nikel laterit dipengaruhi oleh beberapa faktor. Adapun faktor-faktor yang memengaruhi pembentukan nikel laterit adalah (Ahmad, 2005):

1. Batuan Asal

Adanya batuan asal merupakan syarat utama terbentuknya endapan nikel laterit. Batuan asal dari nikel laterit adalah batuan ultrabasa. Dalam hal ini pada batuan ultrabasa terdapat unsur nikel (Ni) yang paling banyak di antara batuan lainnya. Endapan nikel laterit terbentuk melalui proses pelapukan batuan dasar yang mengandung nikel, seperti serpentin atau dunite.

2. Iklim

Pergantian musim kemarau dan musim penghujan akan menyebabkan terjadinya kenaikan dan penurunan permukaan air tanah sehingga terjadi

proses pemisahan dan akumulasi unsur-unsur. Perbedaan temperatur yang cukup besar akan membantu terjadinya pelapukan mekanis, di mana akan terjadi rekahan-rekahan dalam batuan yang akan mempermudah proses atau reaksi kimia pada batuan.

3. Reagen-Reagen Kimia

Reagen-reagen kimia adalah unsur-unsur dan senyawa-senyawa yang membantu dalam mempercepat proses pelapukan. Air tanah yang mengandung CO₂ memegang peranan penting di dalam proses pelapukan kimia. Asam-asam pada humus menyebabkan dekomposisi batuan dan dapat mengubah *pH* larutan. Asam-asam pada humus berkaitan erat dengan vegetasi yang ada di daerah tersebut. Vegetasi akan mengakibatkan penetrasi air dapat lebih dalam dan lebih mudah mengalir.

4. Topografi

Keadaan topografi setempat akan sangat memengaruhi sirkulasi air beserta reagen-reagen lain. Untuk daerah yang landai, maka air akan bergerak perlahan-lahan sehingga akan mempunyai kesempatan untuk mengadakan penetrasi lebih dalam melalui rekahan-rekahan atau pori-pori batuan. Akumulasi endapan umumnya terdapat pada daerah-daerah yang landai sampai kemiringan sedang, hal ini menerangkan bahwa ketebalan pelapukan mengikuti bentuk topografi. Pada daerah yang curam, secara teoritis, jumlah air yang meluncur (*run off*) lebih banyak daripada air yang meresap sehingga dapat menyebabkan pelapukan kurang intensif.

5. Waktu

Waktu merupakan faktor yang sangat penting dalam proses pelapukan, transportasi, dan konsentrasi endapan pada suatu tempat. Untuk terbentuknya endapan nikel laterit membutuhkan waktu yang lama, mungkin ribuan atau jutaan tahun. Bila waktu pelapukan terlalu muda maka terbentuk endapan yang tipis. Waktu yang cukup lama akan mengakibatkan pelapukan yang cukup intensif karena akumulasi unsur nikel cukup tinggi. Banyak dari faktor tersebut yang saling berhubungan dan karakteristik profil di satu tempat dapat digambarkan sebagai efek gabungan dari semua faktor terpisah yang terjadi melewati waktu, ketimbang didominasi oleh satu faktor saja.

6. Struktur

Struktur geologi dalam pembentukan endapan laterit adalah rekahan (*joint*) dan patahan (*fault*). Adanya rekahan dan patahan ini akan mempermudah rembesan air ke dalam tanah dan mempercepat proses pelapukan terhadap batuan induk. Selain itu rekahan dan patahan dapat pula berfungsi sebagai tempat pengendapan larutan-larutan yang mengandung nikel sebagai vein-vein. Seperti diketahui bahwa jenis batuan beku mempunyai porositas dan permeabilitas yang kecil sekali sehingga penetrasi air sangat sulit, maka dengan adanya rekahan-rekahan tersebut akan memudahkan masuknya air dan proses pelapukan yang terjadi akan lebih intensif.

2.1.2 Lapisan endapan nikel laterit

Endapan nikel laterit jika dilihat secara vertikal dari bawah keatas maka akan terdapat beberapa komponen utama yaitu (Hernandi *et al*, 2017):

1. Batuan dasar (*bedrock*)

Bedrock berada pada bagian bawah profil merupakan batuan batuan ultramafik yang belum mengalami proses pelapukan. Komposisi kimia batuan memiliki kemiripan terhadap komposisi kimia *bedrock* yang tidak teralterasikan. Terdapat struktur *joint* dan *fracture* terjadi seiring terjadinya tekanan *hydrostatic* pada batuan. Sementara sirkulasi air permukaan meresep melalui *joint* dan *fracture*.

2. Zona saprolit

Zona saprolit berada diatas batuan dasar (*bedrock*), umumnya *boulder* sebagian atau seluruhnya telah mengalami pelapukan, dimana proses pelapukan tersebut terjadi pada *joint* dan *fracture boulder*. Tekstur atau *fragment* batuan masih dikenali dan proses pelapukan belum berlangsung dengan sempurna. Pada batuan dengan tingkat terserpentinisasi yang tinggi proses pelapukan tidak hanya berlangsung pada *joint* dan *fracture*, tetapi terjadi pada masa batuan keseluruhan yang disebabkan lunaknya batuan yang memungkinkan muka air tanah terlibat sebagai agen pelapukan. Porositas perlapisan pada zona saprolit sedang-baik, sedangkan densitas material relatif rendah.

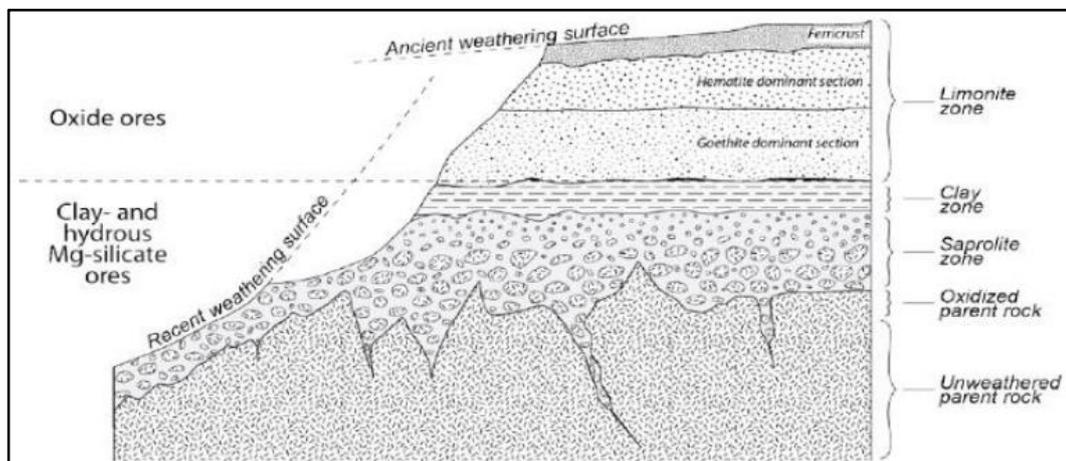
3. Zona limonit

Zona ini berada pada bagian atas profil laterit dan merupakan pembentukan akhir pelapukan batuan ultrabasa serta terkonsentrasinya elemen *non-mobile* yang diakibatkan proses pelindian pada batuan ultrabasa. Lapisan permukaan zona limonit bagian atas tersusun oleh sub zona lapisan *iron capping*, berwarna merah disebut sebagai *red* limonit.

4. *Iron capping*

Iron cap atau tudung besi merupakan lapisan teratas dalam profil endapan nikel laterit dan berfungsi untuk melindungi lapisan di bawahnya dari erosi. Lapisan ini mengandung material organik (humus), memiliki konsentrasi besi yang tinggi, dan berwarna coklat kemerahan hingga kehitaman.

Ketebalan endapan laterit umumnya berkisar dari 10 sampai 40 meter dalam berbagai kasus, serta mengandung lebih dari 1% ni dan kurang dari 0,15%. British Geological Survey (2009) menyatakan kadar kobalt yang ekonomis dalam endapan laterit berkisar antara 0,05-0,15%. Adapun lapisan limonit cenderung mengandung kadar kobalt yang lebih tinggi, sedangkan saprolit mengandung kadar nikel yang lebih tinggi (Hernandi *et al*, 2017).



Gambar 2 Potongan melintang permukaan sebelum dan setelah proses pelapukan nikel (Hernandi *et al*, 2017)

Gambar 2 merupakan zona litologi dari endapan nikel laterit sekaligus memberikan proses pembentukan nikel laterit sebelum terjadi pelapukan dan setelah pelapukan. Hal tersebut ditandai dengan *ore* dari endapan yang mengalami pelapukan karena proses oksidasi dengan pengaruh air tanah.

2.2 Geologi Regional

Pembahasan geologi regional meliputi dari geomorfologi, stratigrafi dan juga struktur geologi.

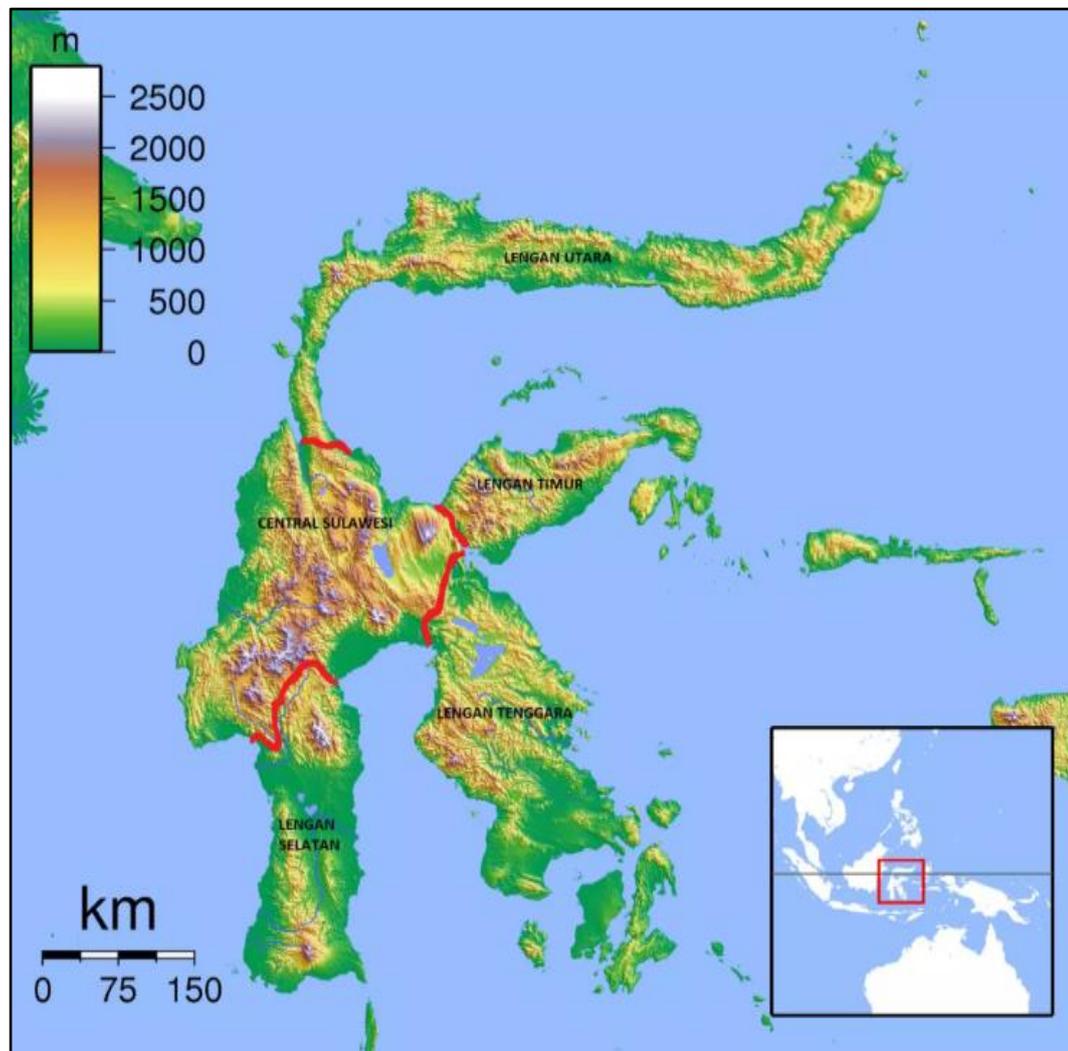
2.2.1 Geomorfologi

Pulau Sulawesi terletak di pertemuan tiga lempeng bumi yang besar, yaitu Lempeng Asia, Australia, dan Pasifik, yang menjadi informasi penting dalam mengungkap tektonik kenozoikum Asia Tenggara (Villeneuve *et al*, 2002). Pulau Sulawesi terletak di batas lempeng aktif pada Lempeng Asia dan setidaknya telah mengalami empat peristiwa tektonik besar pada pertengahan *Cretaceous*, *Oligo- Miocene*, pertengahan *Miocene*, dan awal *Pliocene*. Peristiwa tektonik yang terjadi selama periode geologi mengontrol bentukan muka bumi Pulau Sulawesi hingga saat ini. Bentuk Pulau Sulawesi yang menyerupai “huruf-K” saat ini merepresentasikan empat sabuk litotektonik yang terdiri atas *West Sulawesi Volcano-Plutonic Arc Belt*, *Central Sulawesi Metamorphic Belt*, *East Sulawesi Ophiolite Belt*, dan *continental fragments* dari Banggai-Sula, Tukang Besi, dan Buton (Simandjuntak, 1986).

Berdasarkan sifat geologi regionalnya Pulau Sulawesi dan sekitarnya dapat dibagi menjadi beberapa mandala geologi yakni salah satunya adalah mandala geologi Sulawesi Timur. Mandala ini meliputi lengan Tenggara Sulawesi, Bagian Timur Sulawesi Tengah dan Lengan Timur Sulawesi. Lengan Timur dan Lengan Tenggara Sulawesi tersusun atas batuan malihan, batuan sedimen penutupnya dan ofiolit yang terjadi dari hasil proses pengangkatan (*obduction*) selama Miosen. Sulawesi dan sekitarnya merupakan daerah yang kompleks karena merupakan tempat pertemuan tiga lempeng besar yaitu lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara, lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat dan lempeng Eurasia yang bergerak ke arah selatan-tenggara serta lempeng yang lebih kecil yaitu lempeng Filipina (Simandjuntak, 1986).

Lokasi penelitian terletak pada *East Sulawesi Ophiolite Belt* dimana batuan ultrabasa berumur Kapur tersingkap di permukaan karena adanya proses subduksi pada Miosen (Golightly, 1979; Suratman, 2000; Ilyas *et al*, 2012). Secara administratif, lokasi penelitian terletak di Kecamatan Lasolo, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Kondisi geologi regional area penelitian

dijelaskan dalam Peta Geologi Regional Lembar Lasusua – Kendari Sulawesi skala 1:150.000 (Rusmana *et al*, 1993).



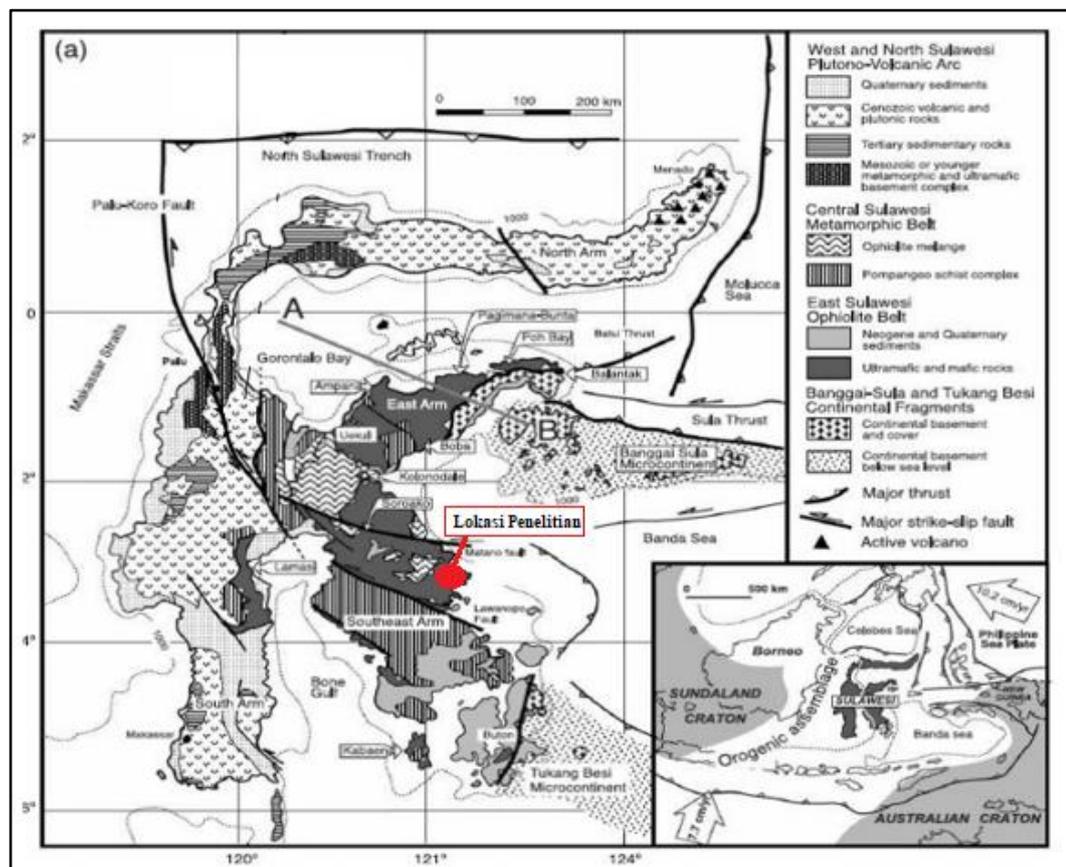
Gambar 3 Geomorfologi pulau Sulawesi (Rusmana *et al*, 1993)

Pada gambar 3 merupakan Pulau Sulawesi, yang mempunyai luas sekitar 172.000 km², dikelilingi oleh laut yang cukup dalam. Sebagian besar daratannya dibentuk oleh pegunungan yang ketinggiannya mencapai 3.440 meter (gunung Latimojong).

2.2.2 Stratigrafi

Menurut peta geologi regional lembar Lasusua, lembar Bungku dan lembar Malili bahwa daerah operasi produksi didominasi oleh kelompok batuan *ultramafic* yang terdiri dari dunit, peridotit, harzburgit, werlit, serpentinit yang disertai retas gabro

dan diduga berumur kapur (Kadarusman *et al*, 2004). Kelompok batuan ultramafik tersebut tertindih secara tidak selaras oleh sedimen kalsilutit dan bersisipan dengan napal serpih, rijang dari formasi selaras diendapan sedimen laut berupa batu gamping kalsilutit dan *colute* Formasi Selodik (Tems) yang berumur Eosen. Pada saat pleistosen diendapkan batuan sedimen yang terdiri dari batu pasir dan batu lempung Formasi Alangga (Qpa) selanjutnya yang paling akhir diendapkan Alluvial (Qa) (Ilyas *et al*, 2012).



Gambar 4 Stratigrafi regional pulau sulawesi (Bemmelen, 1949)

Pada gambar 4 merupakan pembagian stratigrafi regional pulau sulawesi yang terdiri dari beberapa formasi batuan sesuai daerah masing-masing.

Berdasarkan Peta Geologi Lembar Lasusua – Kendari Sulawesi skala 1:250.000 yang dikeluarkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (1993), secara umum bahwa stratigrafi Konawe Utara terdiri atas Sembilan formasi batuan sebagai berikut (penjelasan dari formasi batuan tertua ke termuda) (Rusmana *et al*, 1993):

1. Batuan Ofiolit (Ku), tersusun atas peridotit, harzburgit, dunit, gabro, dan serpentinit.
2. Batuan Malihan Paleozoikum (Pzm), tersusun atas sekis, *gneiss*, filit, kuarsit, batusabak, dan sedikit *marble*.
3. Pualam Paleozoikum (Pzmm), tersusun atas *marble* dan *foliated limestone*.
4. Formasi Tolaka (TRJt), tersusun atas kalsilitit, batugamping, batupasir, serpih, napal, dan batusabak.
5. Formasi Meluhu (TRJm), tersusun atas batupasir, kuarsit, serpih hitam, serpih merah, filit, batusabak, batugamping, dan batulanau.
6. Formasi Matano (Km), tersusun atas kalsilitit bersisipan serpih dan rijang.
7. Formasi Salodik (Tems), tersusun atas kalsilitit, batugamping oolit.
8. Formasi Pandua (Tmpp), tersusun atas konglomerat, batupasir, dan batulempung.
9. Aluvium (Qa), tersusun atas kerikil, kerakal, pasir, dan lempung.

2.2.3 Struktur geologi

Struktur geologi di Sulawesi didominasi oleh arah barat laut tenggara yang berupa sesar mendatar sinistral dan sesar naik Sesar Palu Koro memotong Sulawesi bagian barat dan tengah, menerus ke bagian utarahingga ke Palung Sulawesi Utara yang merupakan batas tepi benua di Laut Sulawesi. Jalur Sesar Palu Koro merupakan sesar mendatar sinistral dengan pergeseran lebih dari 750 km (Tjia, 1973; Sukanto, 1975), arah gerak sesuai dengan jalur Sesar Matano dan jalur Sesar Sorong. Sesar Sadang yang terletak di bagian barat dan sejajar dengan Sesar Palu berada pada lengan Selatan Sulawesi, lembah Sungai Sadang dan Sungai Masupu yang sistemnya dikontrol oleh sesar mendatar (Hamilton, 1979).

Batuan kompleks ofiolit dan sedimen pelagis di Lengan Timur dan Tenggara Sulawesi dinamakan Sabuk Ofiolit Sulawesi Timur. Sabuk ini terdiri atas batuan-batuan mafik dan ultramafik disertai batuan sedimen pelagis dan melange di beberapa tempat. Batuan ultramafik dominan di Lengan Tenggara, tetapi batuan mafiknya dominan lebih jauh ke utara, terutama di sepanjang pantai utara Lengan Tenggara Sulawesi. Sekuens ofiolit yang lengkap terdapat di Lengan Timur, meliputi batuan mafik dan ultramafik, *pillow lava* dan batuan sedimen pelagis yang

didominasi *limestone* laut dalam serta interkalasi rijang berlapis. Berdasarkan data geokimia sabuk Ofiolit Sulawesi Timur ini diperkirakan berasal dari *mid-oceanic ridge* (Surono, 2010).

Continental terrain Sulawesi Tenggara (*The Southeast Sulawesi continental terrain* = SSCT) menempati area yang luas di Lengan Tenggara Sulawesi, sedangkan sabuk ofiolit terbatas hanya pada bagian utara lengan tenggara Sulawesi. SSCT berbatasan dengan Sesar Lawanopo di sebelah timur laut dan Sesar Kolaka di sebelah barat daya. Dataran ini dipisahkan dari Dataran Buton oleh sesar mendatar, dimana pada ujung timur terdapat deretan ofiolit yang lebih tua. SSCT memiliki batuan dasar metamorf tingkat rendah dengan sedikit campuran *aplitic*, karbonat klastik berumur Mesozoikum dan *limestone* berumur Paleogen. Deretan sedimen klastik tersebut mencakup formasi Meluhu di akhir *Triassic* dan unit *limestone* yang berumur Paleogen mencakup formasi Tamborasi dan formasi Tampakura (Surono, 2010).



Gambar 5 Peta geologi lembar lasusua-kendari sulawesi (Rusmana, 2010)

Pada gambar 5 menunjukkan peta geologi bersistem lembar lasusua-kendari Sulawesi yang menunjukkan persebaran sesar (*fault*), patahan (*thrust*) dan beberapa formasi batuan pada daerah tersebut.

Batuan dasar metamorf tingkat rendah membentuk komponen utama lengan Tenggara Sulawesi. Batuan metamorf tua terkait dengan proses penguburan, sedangkan batuan metamorf muda disebabkan oleh patahan dalam skala besar ketika continental terrain Sulawesi Tenggara bertabrakan dengan sabuk ofiolit, Batuan metamorf ini diterobos oleh aplite dan ditindih oleh lava kuarsa-latite terutama di sepanjang pantai barat Teluk Bone (Surono, 2010).

2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral

Sumberdaya mineral adalah konsentrasi natural mineral pada keadaan *in-situ* di dalam suatu batas bentuk geologis. Karakteristik geologi (kuantitas, kadar, dan kontinuitas) sebagian diketahui, diperkirakan, atau ditafsirkan dari bukti berbasis luas dan pengetahuan regional. Kehadiran mineralisasi disimpulkan tanpa verifikasi komprehensif dan konsep *cut-off*. Penekanan utama adalah pendataan estimasi sumberdaya dengan keyakinan yang rendah dibuat selama tahap awal eksplorasi atau disekitar batas konsentrasi ekonomi yang diketahui. Bukti didasarkan pada pengambilan sampel pada skala yang luas. Kelangsungan ekonomi masih bersifat prematur pada tahap awal dan diharapkan untuk dikembangkan setelah tahap eksplorasi lanjutan. Bentuk, kuantitas, dan kadar menunjukkan minat intrinsik di masa depan dan prospek yang masuk akal untuk ekstraksi yang pada akhirnya menguntungkan (Haldar, 2018).

Sumberdaya mineral adalah suatu konsentrasi atau keterjadian dari material yang memiliki nilai ekonomi pada atau di atas kerak bumi, dengan bentuk, kualitas dan kuantitas tertentu yang memiliki keprospekan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis. Aspek yang perlu diketahui dalam sumberdaya mineral yaitu lokasi, kuantitas, kadar, karakteristik geologi, dan kemenerusan, sehingga dapat dilakukan estimasi atau intepretasi berdasar bukti-bukti dan pengetahuan geologi yang spesifik, termasuk pengambilan contohnya. Sumberdaya mineral dikelompokkan lagi berdasar tingkat keyakinan geologinya, kedalam kategori tereka, tertunjuk dan terukur (KCMI, 2017).

Klasifikasi sumberdaya diklasifikasikan berdasarkan tingkat keyakinan geologi dan terdiri menjadi tiga jenis, yaitu (KCMI, 2017):

1. Sumberdaya mineral tereka

Sumberdaya mineral tereka yaitu kuantitas dan kualitas kadarnya diestimasi berdasarkan bukti-bukti geologi dan pengambilan contoh 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.

2. Sumberdaya mineral tertunjuk

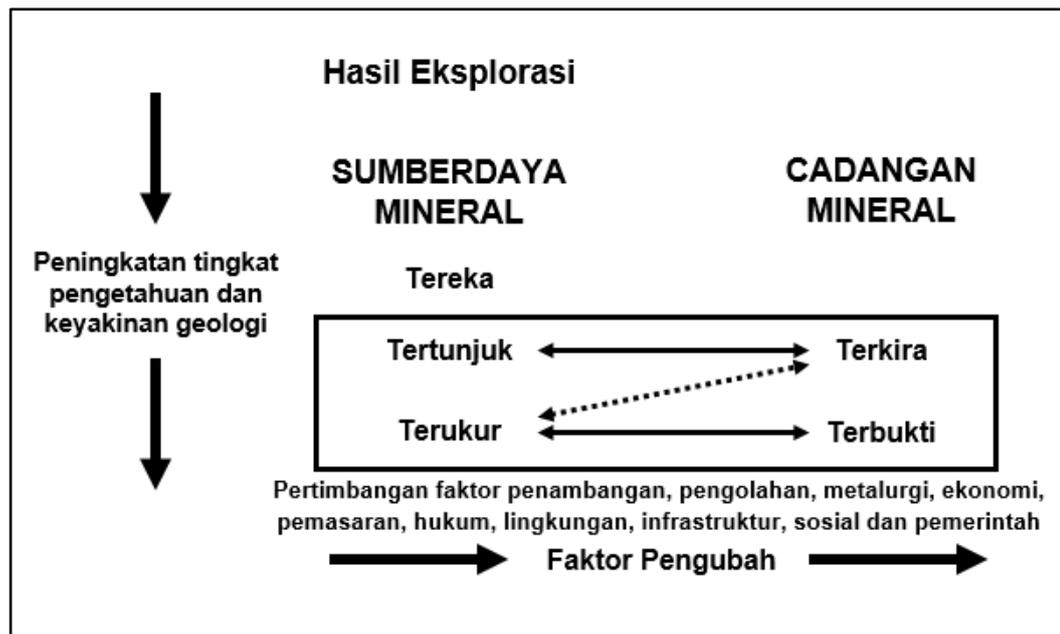
Sumberdaya mineral tertunjuk yaitu kuantitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, dan karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang cukup untuk memungkinkan penerapan faktor-faktor pengubah secara memadai untuk mendukung perencanaan tambang dan evaluasi kelayakan ekonomi cebakan tersebut. Bukti geologi didapatkan dari eksplorasi, pengambilan contoh dan pengujian yang cukup detail dan andal, dan memadai untuk mengasumsikan kemenerusan geologi dan kadar atau kualitas diantara titik-titik pengamatan.

3. Sumberdaya mineral terukur

Sumberdaya mineral terukur yaitu 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 contoh dan pengujian yang detail dan andal, dan memadai untuk memastikan kemenerusan geologi dan kadar atau kualitasnya diantara 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. Tingkat keyakinan

dalam estimasi harus memadai untuk memungkinkan penerapan parameter keteknikan dan keekonomian, dan memungkinkan dilakukannya suatu evaluasi kelayakan ekonomi yang memiliki tingkat kepastian lebih tinggi dibandingkan dengan evaluasi yang berdasarkan atas sumberdaya Mineral Tertunjuk. Keterkaitan antara hasil eksplorasi, sumberdaya mineral dan cadangan mineral yang dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6 Hubungan hasil eksplorasi, sumberdaya dan cadangan mineral
(KCFI, 2017)

2.4 Analisis Geostatistik

Dalam industri mineral, geostatistik telah banyak digunakan dalam mengestimasi sumberdaya mineral dan batubara. Geostatistik pada dasarnya merupakan penerapan dari konsep variabel terregional yang dapat digunakan dalam mengukur korelasi antar data geologi yang tersebar secara spasial (Ramadhan *et al*, 2021). Fenomena geologi seperti kadar unsur dan ketebalan merupakan variabel terregional di mana nilai suatu sampel memiliki hubungan keruangan dengan sampel lainnya. Sebagai suatu variabel terregional, sampel-sampel yang terletak berdekatan akan memiliki hubungan keruangan yang semakin besar sehingga akan memiliki nilai yang mirip namun tidak identik. Korelasi spasial antar data sampel dapat dilakukan melalui analisis dan pemodelan variogram (Matheron, 1963).

2.4.1 Variogram dan semivariogram

Analisis geostatistik terkait hubungan spasial antar data terregional dapat dilakukan dengan variogram. Variogram merupakan grafik variansi terhadap jarak (*lag*), sedangkan setengah kuantitas dari variogram disebut sebagai semivariogram. Perhitungan variogram dilakukan dengan algoritma dari perbedaan rata-rata antar dua titik conto dalam jarak tertentu. Semakin dekat jarak antar data, maka penaksiran data sampel akan memiliki kecenderungan semakin mirip dibandingkan dengan data yang memiliki jarak lebih jauh. Variogram dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Cressie, 1993):

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2\} \quad (1)$$

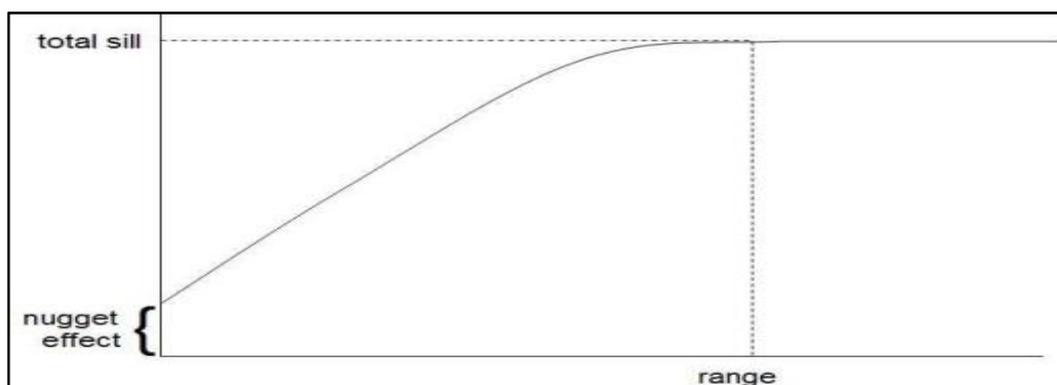
Dimana,

$2\gamma(h)$ = variogram

$Z(x_i)$ = nilai kadar pada lokasi x_i

$Z(x_{i+h})$ = nilai kadar pada lokasi $x_i + h$

Setengah dari variogram dapat didefinisikan sebagai semivariogram " $\gamma(h)$ ". Terdapat beberapa komponen penyusun variogram dan semivariogram seperti *nugget effect*, *sill*, dan *range* yang dapat dilihat pada gambar 7 (Coombes, 2008).



Gambar 7 Komponen penyusun variogram (Coombes, 2008)

Komponen penyusun variogram pada gambar 7 meliputi (Coombes, 2008):

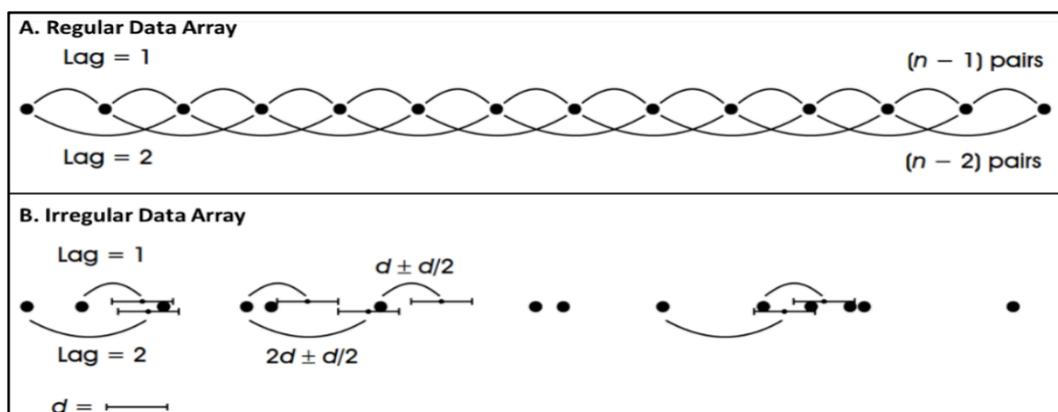
1. *Nugget effect*, merupakan perbedaan yang khas antar data sampel dengan sampel yang berdekatan. *Nugget effect* merepresentasikan komponen acak dari suatu data yang ditunjukkan oleh nilai perpotongan struktur variogram pada saat $lag = 0$ (Sinclair and Blackwell, 2004). Rasio *nugget effect* terhadap

sill seringkali disebut sebagai *nugget effect relative* dan biasanya dinyatakan dalam satuan persen (Isaaks *and* Srivastava, 1989).

2. *Sill*, merepresentasikan ukuran di mana ketika peningkatan pemisahan (jarak) antar sampel akan menyebabkan perbedaan sampel yang semakin tinggi hingga mencapai kondisi di mana perubahan jarak sampel tidak mempengaruhi perbedaan sampel, melainkan sama dengan varians populasinya.
3. *Range*, merepresentasikan jarak sampel di mana sampel data tidak saling berkorelasi secara spasial. Jarak *range* didapatkan ketika variogram telah mencapai total *sill*.

2.4.2 Variogram eksperimental

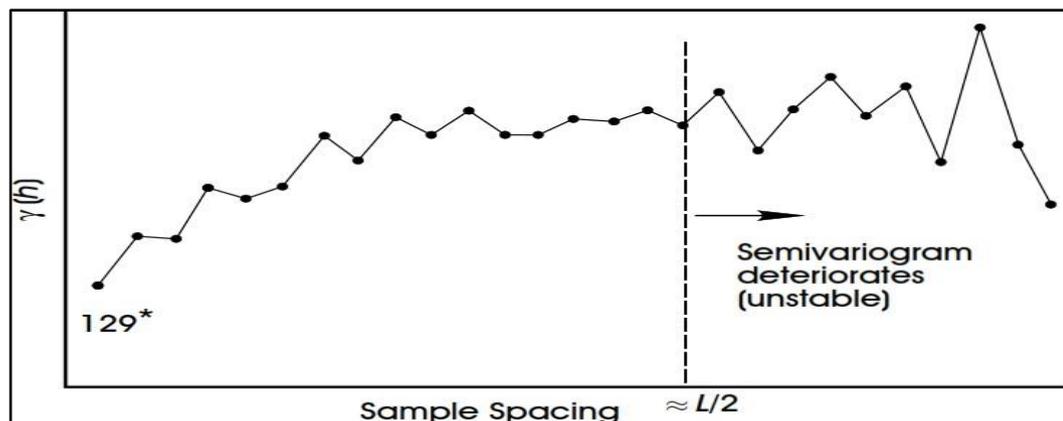
Variogram eksperimental diperoleh dari pengukuran data di lapangan yang merepresentasikan ukuran korelasi spasial antar data sampel yang terpisah oleh suatu jarak tertentu. Pembangunan variogram eksperimental dilakukan dengan pencarian pasangan data dalam variogram berdasarkan *lag* (h) tertentu. Pada susunan data yang tidak seragam (*irregular*), pasangan data dapat dikumpulkan pada jarak tertentu (h) yang seragam dengan nilai toleransi tertentu seperti yang diilustrasikan pada gambar 8 (Sinclair *and* Blackwell, 2004).



Gambar 8 Pencarian pasangan data dalam perhitungan variogram eksperimental (Sinclair *and* Blackwell, 2004)

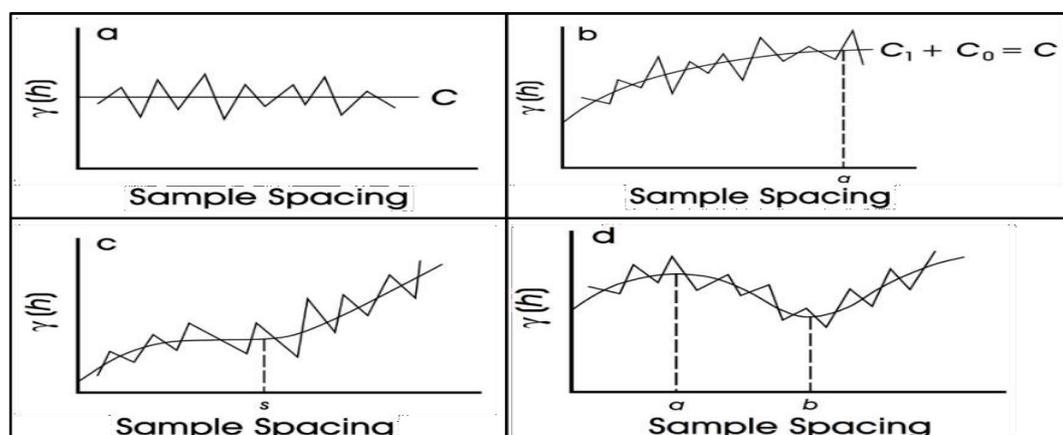
Hasil dari perhitungan variogram kemudian diplot dalam grafik hubungan antara jarak antar pasangan data (h) dan variogram $\gamma(h)$. Semivariogram eksperimental umumnya ditampilkan dengan pola grafik yang bergerigi (*sawtooth*)

tergantung pada jumlah data yang digunakan seperti yang terlihat pada gambar 9. Ketika jumlah data melimpah, semivariogram eksperimental umumnya menunjukkan fluktuasi variogram yang lebih kecil dan menerus. Secara umum, $\gamma(h)$ akan meningkat seiring dengan peningkatan jarak *lag* (Sinclair and Blackwell, 2004).



Gambar 9 Semivariogram eksperimental berdasarkan jarak *lag* (Sinclair and Blackwell, 2004)

Semivariogram merupakan fungsi perbedaan pada pasangan data yang dapat digunakan untuk mengetahui aspek stasioneritas data terutama terhadap jarak maksimum di mana kestasioneran data dapat diasumsikan (*quasi-stationerity*). Contoh ideal dari semivariogram eksperimental yang menampilkan struktur bergerigi (*sawtooth curve*) dan *smooth curve* ditunjukkan oleh gambar 10 (Sinclair and Blackwell, 2004).



Gambar 10 Semivariogram eksperimental dengan *sawtooth* dan *smooth curve* (Sinclair and Blackwell, 2004)

Berdasarkan pada gambar 10 diatas, gambar (a) merupakan *pure nugget effect*, gambar (b) merupakan pola umum semivariogram, gambar (c) merupakan semivariogram eksperimental parabolik dengan stasioner lokal hingga jarak s , gambar (d) merupakan *hole effect* dengan karakter siklus distribusi spasial variable (Sinclair and Blackwell, 2004).

2.4.3 Variogram model teoritis

Variogram model teoritis merupakan model variogram yang diekspresikan dalam suatu model matematis dan dijadikan sebagai acuan dalam melakukan *fitting* variogram sesuai dengan pola data variogram eksperimental. *Nugget*, *sill* dan *range* diinterpretasikan melalui proses *fitting* pada variogram eksperimental berdasarkan variogram model teoritis (Matheron, 1963). Variogram eksperimental dihitung dari data sampel untuk menghitung variansi dispersi dan variansi estimasi. Tidak semua fungsi dapat menggunakan model variogram, karena variansi dispersi dan variansi estimasi yang dihitung berdasarkan variogram harus bernilai positif. Terdapat beberapa model variogram teoritis yang meliputi (Bargawa, 2018):

1. Model variogram sferis

Model variogram sferis merupakan model variogram yang paling sering digunakan dalam bidang aplikasi mineral. Model sferis dicirikan dengan dua komponen utama yaitu komponen acak murni yang biasa disebut sebagai *nugget effect* (C_0) dan komponen struktur yang dicirikan dengan *range* (a) dari fungsi autokorelasi. Model tersebut diberikan pada persamaan berikut:

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

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad h \geq a \quad (3)$$

Dimana,

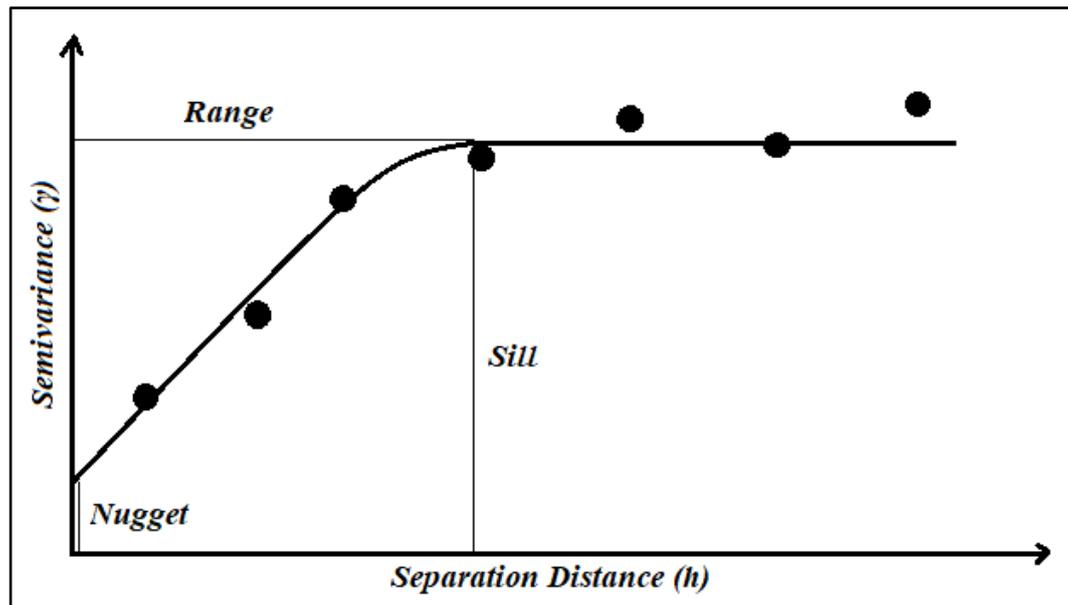
$\gamma(h)$ = variogram

C_0 = *nugget*

C = selisih nilai *sill* dan *nugget*

a = *range* variogram

h = jarak



Gambar 11 Contoh model variogram sferis (Bargawa, 2018)

Gambar 11 memperlihatkan contoh sederhana model variogram sferis dicocokkan dengan variogram eksperimental. Pada saat garis mendatar variogram dan dipotongkan pada (h) disebut *range* variogram. Jika jarak lebih dari nilai (h) maka sampel tidak memiliki korelasi lagi. Nilai *sill* merupakan nilai maksimum variogram dan umumnya sama dengan variansi data yang digunakan untuk menghitung variogram. *Nugget* (C_0), yaitu nilai pada jarak yang pendek terjadi variansi yang besar dan dianggap sebagai komponen acak. Nilai (C) adalah selisih dari nilai *sill* dan *nugget* (Bargawa, 2018).

2. Model variogram eksponensial

Model lain yang umum digunakan adalah model eksponensial. Model ini, seperti halnya model variogram, digunakan untuk model variogram yang mempunyai struktur transisi. Persamaan untuk model eksponensial diberikan pada persamaan berikut:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right] \quad h < a \quad (4)$$

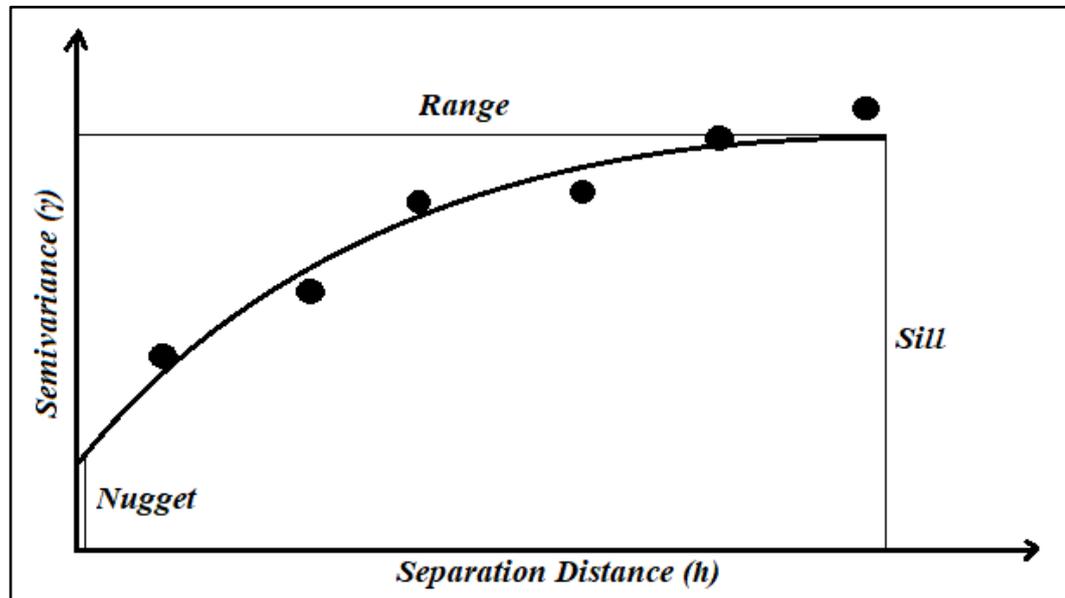
Dimana,

$\gamma(h)$ = variogram

C_0 = *nugget*

C = selisih nilai *sill* dan *nugget*

- e = nilai konstanta
 α = *range* variogram
 h = jarak



Gambar 12 Contoh model variogram eksponensial (Bargawa, 2018)

Gambar 12 memperlihatkan contoh model variogram eksponensial. Model variogram eksponensial mendekati *sill* asimtotik dan nilai *sill* mempunyai jarak $3a$ (Bargawa, 2018).

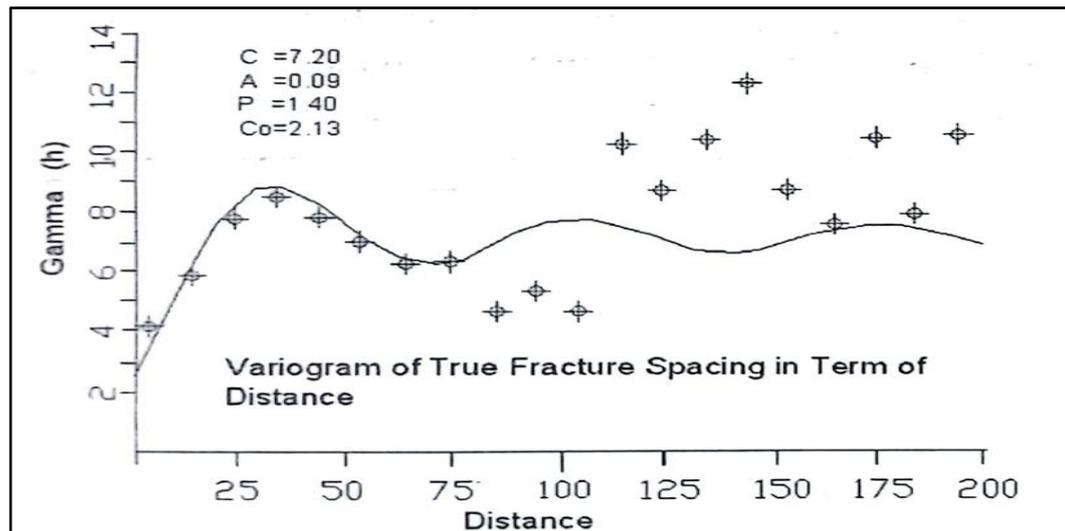
3. Model variogram *hole-effect*

Model ini telah digunakan untuk merepresentasikan perilaku periodik seperti zona kadar rendah dan zona kadar tinggi. Model *hole-effect* memiliki persamaan:

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \frac{\sin(ah+p)}{ah+p} \right] \quad (5)$$

Dimana,

- $\gamma(h)$ = variogram
 C_0 = *nugget*
 C = selisih nilai *sill* dan *nugget*
 a = *range* variogram
 h = jarak
 p = parameter model



Gambar 13 Contoh model variogram *hole-effect* (Bargawa, 2018)

Gambar 13 memperlihatkan model *hole-effect* yang dicocokkan ke dalam variogram eksperimental dari fraksi rekahan (Bargawa, 2018).

2.5 Estimasi Sumberdaya

Estimasi sumberdaya adalah estimasi dari bijih endapan mineral yang mana bagian dari perhitungan cadangan yang merupakan hal yang paling vital sebelum dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu perhitungan cadangan yang mana akan dievaluasi apakah endapan mineral tersebut layak untuk dilanjutkan ke tahap eksplorasi selanjutnya (Rafsanjani *et al*, 2016). Estimasi sumberdaya mineral merupakan proses terintegrasi dan sistematis yang dilakukan untuk memperkirakan distribusi spasial kadar dan volume suatu area dengan batas nilai kadar tertentu (Sinclair *and* Blackwell, 2004). Estimasi sumberdaya mineral dilakukan berdasarkan data hasil observasi dan *sampling* selama kegiatan eksplorasi dilakukan. Kegiatan mengestimasi sumberdaya mineral menjadi dasar dalam kegiatan pertambangan, sehingga menjadi penting untuk mendapatkan hasil estimasi yang akurat dan mencegah adanya ekspektasi finansial yang keliru (Rossi, 2014).

Estimasi sumberdaya membutuhkan pertimbangan detail sejumlah masalah kritis. Secara keseluruhan masalah terkait sedemikian rupa sehingga kualitas sumberdaya dapat merepresentasikan daya standar perkiraan dari suatu perusahaan. Ketika salah satu faktornya tidak diperhatikan maka akan mempengaruhi hasil

perkiraan sumberdaya yang dilakukan. Kualitas perkiraan sumberdaya mineral tergantung pada data yang tersedia dan kompleksitas geologi. Namun, perkiraan sumberdaya juga sangat kuat bergantung pada keseluruhan keterampilan teknis dan pengalaman staf tambang, bagaimana masalah yang dihadapi diselesaikan, tingkat perhatian terhadap detail pada setiap tahap, pengungkapan terbuka asumsi dasar beserta pembenarannya, dan kualitas dokumentasi untuk setiap Langkah (Rossi, 2014).

Metode untuk estimasi sumberdaya umumnya bergantung pada keadaan geologi endapan, metode eksplorasi, keakuratan data dan nilai koefisien variasi, manfaat serta tujuan estimasi sumberdaya. Dalam mengestimasi sumberdaya atau pemodelan umumnya terdapat beberapa metode. Estimasi sumberdaya bisa menggunakan metode seperti *inverse distance weighting* (IDW), *polygon*, *nearest neighbour poin* (NNP), *kriging* dan *co-kriging*.

2.5.1 Inverse distance weighting

Metode IDW (*Inverse Distance Weighting*) merupakan suatu cara penaksiran yang telah memperhitungkan adanya jarak, merupakan kombinasi linear atau rata-rata pembobotan (*weighting average*) dari titik-titik data yang ada disekitarnya. Dalam penaksiran data kadar dilakukan teknik-teknik pembobotan yang ada pada umumnya didasarkan pada letak grid atau blok yang akan ditaksir terhadap letak data sampel dan kecenderungan penyebaran kualitas data (Zibuka, 2016). Metode ini merupakan suatu cara penaksiran yang telah memperhitungkan adanya hubungan letak ruang (jarak), merupakan kombinasi linier atau harga rata-rata tertimbang (*weighting average*) dari titik-titik data yang ada di sekitarnya (Notosiswoyo, 2000). Prinsip dasar metode ini adalah menentukan bobot conto sebagai fungsi dari jarak conto terhadap blok yang ditaksir (Bargawa, 2018).

$$Z^* = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad (6)$$

Dimana,

Z^* = kadar yang ditaksir

w_i = bobot conto

z_i = kadar conto

Pembobotan inverse distance weighting dapat dikelompokkan sebagai berikut (berlaku untuk $n > 0$) (Bargawa, 2018):

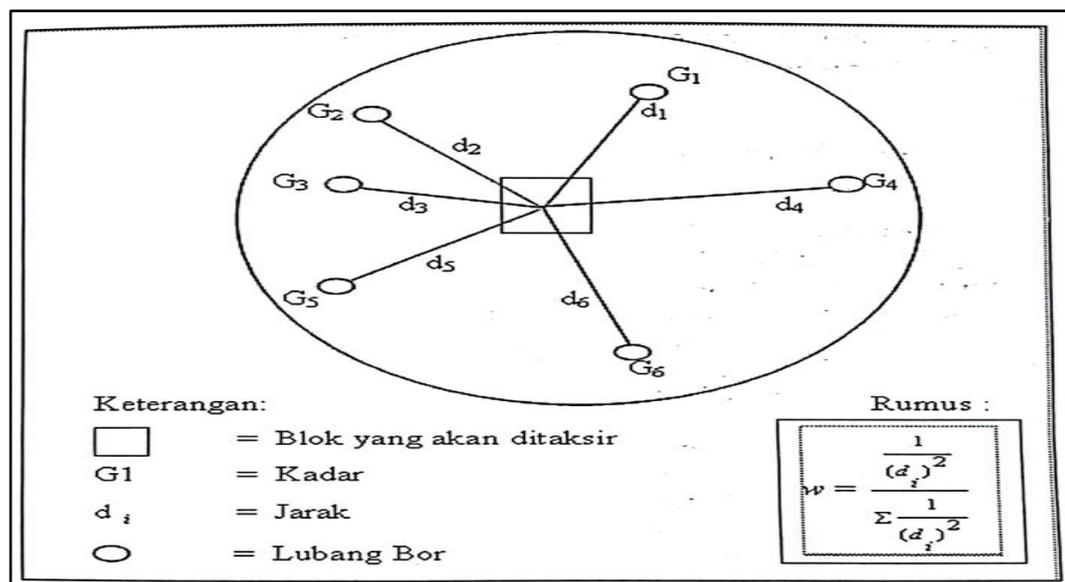
$$w_i = \frac{\frac{1}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad (7)$$

Dimana,

w_i = bobot conto

d_i = jarak

Dari persamaan di atas dapat dilihat bahwa bobot (w_i) merupakan fungsi jarak. Kadar komposit di dekat blok memperoleh bobot lebih besar, sedangkan kadar komposit yang jauh dari blok mempunyai bobot lebih kecil seperti yang diperlihatkan pada gambar 14. Bobot ini berbanding terbalik dengan jarak data terhadap blok yang ditaksir. Bobot yang diperoleh dari persamaan di atas tidak berhubungan secara langsung dengan kadar contoh yang digunakan dalam penaksiran (Bargawa, 2018).



Gambar 14 Pembobotan metode *inverse distance weighting* (Bargawa, 2018)

2.5.2 Kriging

Kriging adalah suatu teknik perhitungan untuk estimasi atau simulasi dari suatu variabel terregional (*regionalized variable*) yang memakai pendekatan bahwa data yang dianalisis dianggap sebagai suatu realisasi dari suatu variabel acak (*random*

variable), dan keseluruhan variabel acak dalam daerah yang dianalisis tersebut akan membentuk suatu fungsi acak dengan menggunakan model struktural variogram atau kovariogram (David, 1977). Metode *kriging* mempunyai keunggulan dan kelemahan, keunggulannya yaitu kemampuan untuk menguantifikasi 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 (Largueche, 2006).

Estimator *kriging* dapat dirumuskan sebagai berikut (Bohling, 2005):

$$\hat{Z}(s) - m(s) = \sum_{a=1}^n \lambda_a (Z(s_i) - m(s_i)) \quad (8)$$

Dimana,

s_i, s_i = lokasi untuk estimasi dan salah satu lokasi dari data yang berdekatan

$m(s)$ = nilai ekspektasi dari $Z(s)$

$m(s_i)$ = nilai ekspektasi dari $Z(s_i)$

λ_i = faktor bobot

n = banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi

$Z(s)$ diperlakukan sebagai bidang acak dengan suatu komponen *trend*, $m(s)$ dan komponen sisa atau *error* $e(s) = Z(s) - m(s)$. Estimasi *kriging* yang bersifat sisa pada s sebagai penjumlahan berbobot dari sisa data di sekitarnya. Nilai λ_i diperoleh dari kovariansi atau semivariogram, dengan diperlukan komponen karakteristik sisa (Bohling, 2005).

Tujuan *kriging* adalah untuk menentukan nilai λ_i yang meminimalkan variansi pada estimator, dapat dinyatakan sebagai berikut (Bohling, 2005):

$$\sigma^2 = var[\hat{Z}(s) - Z(s)] \quad (9)$$

Dimana,

σ = variansi estimator

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya

Secara sederhana *kriging* menghasilkan seperangkat bobot yang meminimalkan variansi penaksiran sesuai dengan konfigurasi contoh di sekitar blok dan sifat mineralisasi. Sifat mineralisasi dinyatakan dalam fungsi variogram yang mengkuantifasikan korelasikan ruang antar contoh. Dua hasil utama yang diperoleh dari teknik penaksiran ini adalah taksiran *kriging*, dan variansi *kriging* atau simpangan baku *kriging* sebagai ukuran reliabilitas. Teknik *kriging* dibedakan menjadi beberapa metode dan salah satunya yaitu *kriging* linear atau biasa disebut *ordinary kriging* (OK) (Bargawa, 2018).

Ordinary kriging dikenal sebagai teknik *kriging* linear karena menggunakan kombinasi linier terbobot dari data yang tersedia untuk proses estimasi (Isaaks and Srivastava, 1989). *Ordinary kriging* merupakan metode yang praktis dan sederhana dalam konsep model stasionaritas untuk menaksir kadar menggunakan data di sekeliling blok. Teknik *ordinary kriging* menggunakan parameter penaksiran yaitu variogram komposit, arah dan jarak pencarian sampel, serta jumlah sampel maksimum dan minimum. *Kriging* merupakan suatu teknik penaksiran yang memberikan *best linear unbiased estimator* (BLUE) (Bargawa, 2018). 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 diasumsi bersifat stasioner (Isaaks and Srivastava, 1989).

Bobot *ordinary kriging* memenuhi sifat tak bias dengan n adalah jumlah sampel yang diketahui. Parameter tambahan m merupakan *lagrange multiplier* yang digunakan untuk meminimalkan galat *kriging*. Nilai bobot *ordinary kriging* dapat diperoleh melalui persamaan berikut (Isaaks and Srivastava, 1989):

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(S_1, S_1) & \gamma(S_1, S_2) & \dots & \gamma(S_1, S_n) & 1 \\ \gamma(S_2, S_1) & \gamma(S_2, S_2) & \dots & \gamma(S_2, S_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \gamma(S_n, S_1) & \gamma(S_n, S_2) & \dots & \gamma(S_n, S_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(S_1, S_0) \\ \gamma(S_2, S_0) \\ \vdots \\ \gamma(S_n, S_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

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

m = *lagrange multiplier*

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

1. Asumsi model

$$Z(s) = \mu + e(s), s \in R \text{ dan } \mu \text{ tidak diketahui} \quad (11)$$

2. Asumsi prediksi

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s) \text{ dengan } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (12)$$

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

λ_i = faktor pembobot

Karena koefisien dari hasil penjumlahan prediksi linier adalah 1 dan memiliki syarat tak bias maka $E\hat{Z}(s) = \mu = EZ(s) = Z(s)$, untuk setiap $\mu \in R$ dan karena $Z(s)$ merupakan suatu konstanta maka $EZ(s) = Z(s)$ 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 (Cressie, 1990):

$$e(s) = \hat{Z}(s) - Z(s) \quad (13)$$

Dimana,

$e(s)$ = estimator *error*

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya

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

Bobot λ_i dengan nilai $i = 1, 2, \dots, n$ ditentukan berdasarkan kriteria (Cressie, 1990):

1. Tak bias dengan $E[\hat{Z}(s) - Z(s)] = 0$
2. Variansi dengan $var[\hat{Z}(s) - Z(s)]$ minimum

Dengan persamaan tersebut maka dapat dibuktikan bahwa $\hat{Z}(s)$ merupakan estimator tak bias yaitu (Cressie, 1990):

$$Ee(s) = E\hat{Z}(s) - EZ(s) \quad (14)$$

Dengan $Ee(s) = 0$, maka diperoleh (Cressie, 1990):

$$E\hat{Z}(s) = Z(s) \quad (15)$$

Dimana,

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya