

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara dengan cadangan dan produksi nikel laterit terbesar di dunia. Kebutuhan global terhadap nikel semakin meningkat seiring berkembangnya industri baterai kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) dan produk berbasis *stainless steel*. Hal ini mendorong perusahaan pertambangan untuk melakukan eksplorasi dan penambangan nikel secara efisien dan tepat sasaran. Salah satu tantangan utama dalam eksplorasi nikel laterit adalah keterbatasan data pengeboran, baik dari segi jumlah titik maupun penyebarannya. Di sisi lain, karakteristik geometri zona bijih nikel sangat dipengaruhi oleh proses pelapukan, topografi, dan kondisi geologi lokal, sehingga memiliki variasi spasial yang tinggi, sehingga diperlukan metode interpolasi maupun simulasi untuk memodelkan distribusi spasial yang lebih representatif.

Pemodelan geologi, khususnya penentuan elevasi top zona mineralisasi (seperti *bluezone*), menjadi tahap penting dalam perencanaan tambang karena secara langsung memengaruhi estimasi volume, tonase, serta perhitungan cadangan dan umur tambang. Zona laterit, yang umumnya menjadi lokasi utama akumulasi bijih nikel, terbentuk diatas batuan dasar melalui proses pelapukan intensif. Oleh karena itu, informasi mengenai bentuk dan kedalaman *top bedrock* sangat krusial untuk mengetahui ketebalan overburden, persebaran mineral, serta potensi cadangan bijih yang ekonomis. Dalam praktiknya, informasi ini hanya tersedia dalam bentuk data titik dari pengeboran yang jumlah dan distribusinya terbatas. Keterbatasan data titik ini memunculkan tantangan dalam menghasilkan model *elevasi top bedrock* yang representatif.

Adapun metode yang sangat sering digunakan dalam penelitian geostatistik ini adalah metode Interpolasi Konvensional seperti *Inverse Distance Weighting* (IDW) atau *Kriging*. Namun, kedua metode tersebut hanya menghasilkan satu model estimasi dan cenderung mengabaikan variabilitas alami serta ketidakpastian spasial dari data geologi. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan geostatistik yang mampu menghasilkan banyak kemungkinan model (*realization*) dari distribusi *top bedrock*, agar diperoleh gambaran kemungkinan variasi spasial dari parameter yang dimodelkan. Salah satu solusi utama yaitu dengan menggunakan metode *Sequential Gaussian Simulation* (SGS), karena tidak hanya memodelkan nilai rata-rata, tetapi juga memberikan informasi ketidakpastian spasial yang sangat berguna dalam pengambilan keputusan di tambang.

Dari hasil simulasi metode SGS, dihasilkan peta elevasi *mean bluezone*, peta variansi, sejumlah realisasi alternatif, dan *best realization* bentuk topografi *bluezone*. Analisis dari model *best realization* digunakan untuk visualisasi model elevasi top zona bijih secara representatif. Sementara peta variansi digunakan

untuk mengevaluasi tingkat kepercayaan terhadap estimasi di setiap lokasi dan memperlihatkan daerah dengan ketidakpastian tinggi atau rendah. Model yang dihasilkan tidak hanya membantu dalam estimasi volume laterit dan desain pit tambang, tetapi juga dalam menilai risiko eksplorasi dan menentukan area prioritas pengeboran lanjutan. Keunggulan metode ini menjadikan hasil penelitian relevan dan aplikatif dalam konteks dunia tambang modern yang mengedepankan efisiensi, akurasi, dan manajemen resiko.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dikemukakan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada tiga pokok permasalahan utama. Pertama, bagaimana metode Sequential Gaussian Simulation (SGS) dapat diterapkan untuk memodelkan elevasi *top bluezone* agar diperoleh representasi yang mendekati data aktual di lapangan. Kedua, sejauh mana tingkat akurasi model elevasi top Bluezone yang dihasilkan melalui SGS jika dievaluasi dengan parameter *Root Mean Square Error* (RMSE), *Mean Absolute Error* (MAE), dan koefisien determinasi (R^2) terhadap data aktual. Ketiga, bagaimana peta hasil simulasi berupa mean, variance, dan probability dapat dimanfaatkan untuk menampilkan ketidakpastian spasial sehingga mendukung interpretasi model dan memberikan informasi tambahan yang berguna dalam proses pengambilan keputusan pada tahapan eksplorasi maupun perencanaan tambang.

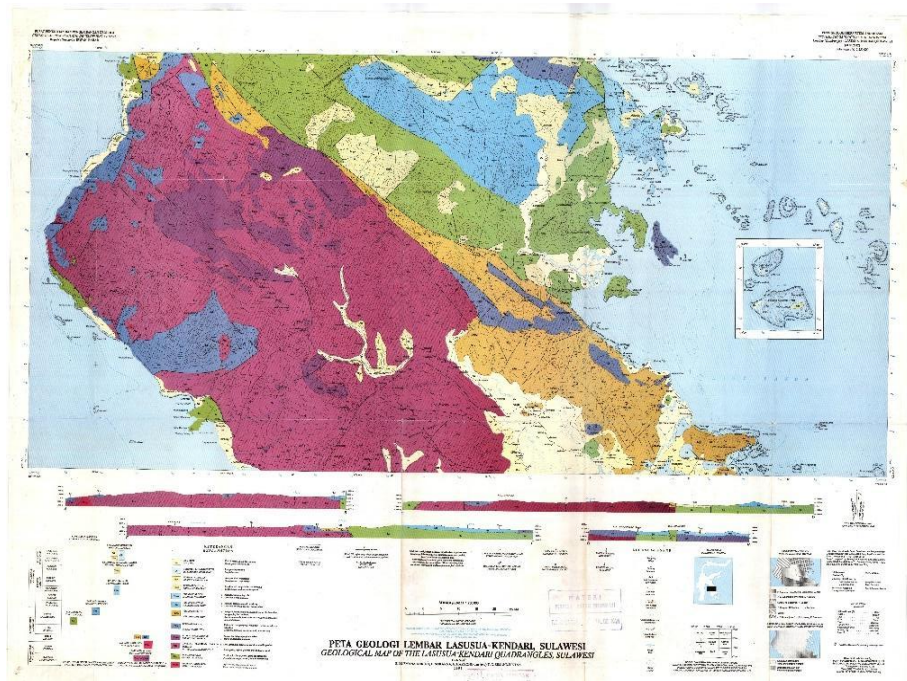
1.3 Tujuan Penelitian

Sejalan dengan rumusan masalah yang telah dirumuskan, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan metode simulasi kondisional geostatistik (*Sequential Gaussian Simulation*) dalam pemodelan elevasi top zona Bluezone, mengevaluasi akurasi model dengan analisis nilai error, mengevaluasi ketidakpastian model yang dihasilkan dari model hasil simulasi sebagai dasar interpretasi geologi dan pengambilan keputusan dalam kegiatan eksplorasi dan perencanaan tambang.

1.4 Kajian Teori

1.4.1 Geologi Regional

Geologi regional daerah penelitian berada dalam peta Geologi Lembar Lasusua-Kendari, Sulawesi skala 1 : 250.000 oleh Simanjundtak, dkk (1993). Lengan timur dan lengan tenggara sulawesi tersusun oleh kompleks batuan malihan, ofiolit, dan sedimen penutup yang mencerminkan sejarah tektonik yang rumit. Batuan malihan umumnya terdiri atas skis, gneis, dan amfibolit yang merupakan bagian dari kompleks pra-Tersier. Di atasnya tersingkap satuan ofiolit sulawesi timur berupa peridotit, gabro, basal dan batuan ultrabasa lain yang terangkat ke permukaan melalui proses *obduksi* pada kala miosen. Satuan sedimen penutup didominasi oleh batu gamping, batupasir, serpih, serta endapan molasa tersier hingga kuartar yang menindih tak selaras kompleks ofiolit maupun batuan malihan.



Gambar 1 Peta Geologi Lembar Lasusua – Kendari, Sulawesi Tenggara (Simandjuntak dkk, 1993)

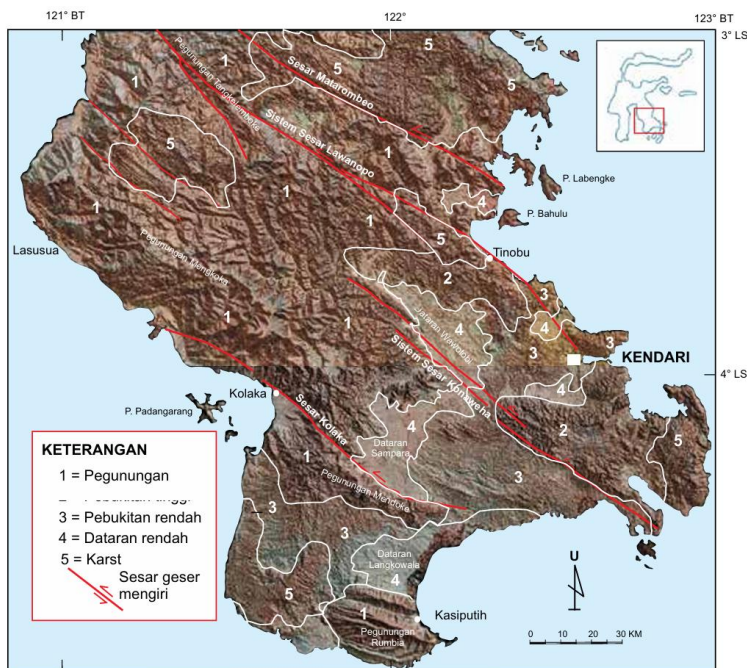
Kondisi geologi ini di pengaruhi oleh posisi sulawesi sebagai daerah pertemuan tiga lempeng besar (Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik) serta lempeng filipina yang lebih kecil, sehingga menjadikan wilayah Lasusua-Kendari sebagai salah satu jalur tektonik paling kompleks di Indonesia bagian timur. Menurut Van Bemmelen (1949), Lengan Tenggara Sulawesi dapat dibagi menjadi tiga bagian: ujung utara, bagian tengah, dan ujung selatan. Dimana, Lembar Kolaka menempati bagian tengah dan ujung selatan dari lengan tenggara Sulawesi.

1.4.2 Geomorfologi Regional

Daerah penelitian termasuk dalam Lembar Lasusua–Kendari, yang berada di bagian tengah hingga ujung selatan Lengan Tenggara Sulawesi. Menurut Van Bemmelen (1949), Lengan Tenggara Sulawesi dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu ujung utara, bagian tengah, dan ujung selatan. Ujung utara dari Palopo sampai Teluk Tolo dibentuk oleh batuan ofiolit. Bagian tengah, yang merupakan bagian paling lebar 9smpai 162,5 km), didominasi batuan malihan dan batuan sedimen Mesozoikum. Ujung selatan Lengan Tenggara merupakan bagian yang relatif lebih landai, batuan penyusunnya didominasi batuan sedimen Tersier.

Geomorfologi daerah penelitian sangat beragam dengan lima satuan utama: (1) pegunungan, yang mencakup Pegunungan Mekongga, Tangkelamboke, Mendoke, dan Rumbia, memiliki topografi kasar dengan lereng curam dan puncak tertinggi mencapai ± 2790 m dpl (Gunung Mekongga) dan ± 1500 m dpl (Gunung Tangkelamboke); (2) perbukitan tinggi, terutama di selatan Kendari, berupa bukit

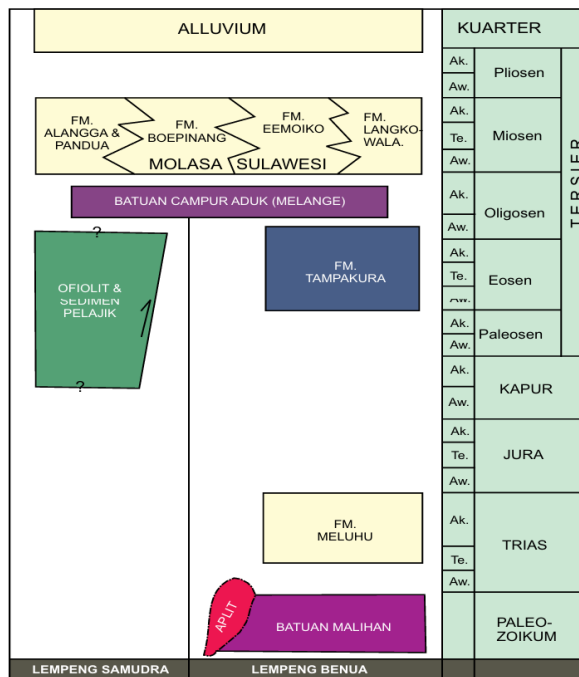
kasar hingga ± 500 m dpl, disusun oleh sedimen klastika Mesozoikum–Tersier; (3) perbukitan rendah, berupa bukit-bukit kecil bergelombang di utara Kendari dan ujung selatan lengan ini; (4) dataran rendah, terutama di bagian tengah hingga ujung selatan seperti Dataran Wawotobi, Sampara, dan Langkowala, terbentuk pada endapan alluvial yang dipengaruhi oleh sesar aktif (seperti Sesar Kolaka dan Konawehea) sehingga menandakan penurunan geomorfik dan potensi banjir; serta (5) morfologi karst (khusus pada beberapa area yang memiliki litologi batugamping), meskipun lebih terbatas.



Gambar 2 Peta Geomorfologi Lengan Tenggara Sulawesi (Surono,2013)

1.4.3 Stratigrafi Regional

Stratigrafi daerah penelitian yang termasuk pada lembar Lasusua-Kendari memperlihatkan urutan batuan dari Pra-Tersier hingga Kuartar. Dasar stratigrafi didominasi oleh Kompleks Malihan (sekis, gneis, marmer) yang berumur Pra-Tersier, kemudian ditutupi oleh Kompleks Ofiolit Sulawesi Timur berumur Kapur–Eosen yang terdiri atas peridotit, gabro, basal, serta sedimen pelagik penutupnya (batugamping radiolaria dan rijang). Di atasnya diendapkan kelompok batuan sedimen Tersier yang berkembang sebagai molasa cekungan, antara lain Formasi Meluhu, Tondo, dan Alangga yang terdiri dari batupasir, batulempung, konglomerat, hingga batugamping. Pada kala Neogen–Kuartar, berkembang endapan gunung api muda, aluvium, kipas aluvial, teras sungai, dan endapan pantai, yang menempati dataran rendah dan cekungan Kendari.



Gambar 3 Stratigrafi regional Lengan Tenggara Sulawesi (Surono,2013)

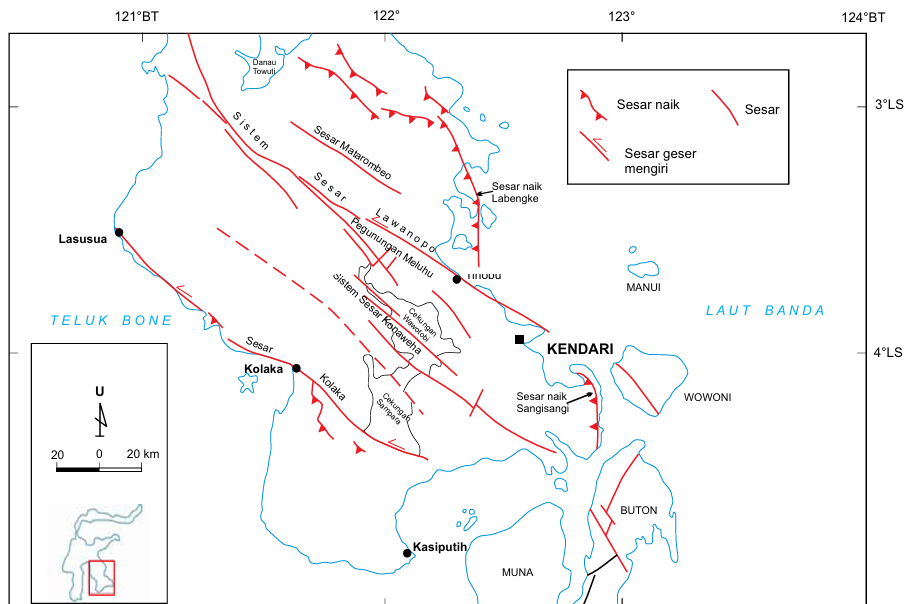
Batuan penyusun Lengan Tenggara Sulawesi terdiri dari kepingan benua yang dimana dinamai Mintakat Benua Sulawesi Tenggara dan Mintakat Matarombeo. Dimana, kedua kepingan benua ini bertabrakan pada Oligosen akhir – Miosen awal dan kemudian ditindih oleh endapan Molasa Sulawesi yang terdiri atas batuan sedimen klastik dan karbonat yang kemudian terendapkan selama akhir dan sesudah tumbukan, sehingga molasa menindih taselaras Mintakat Benua Sulawesi Tenggara dan kompleks Ofiolit tersebut. Pada akhir Kenozoikum lengan ini dikoyak oleh Sesar Lawanopo dan beberapa pasangannya, termasuk Sesar Kolaka.

1.4.4 Struktur Geologi Regional

Pada Lengan Tenggara Sulawesi strukturnya sangat kompleks karena berada di zona tumbukan antara Lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondidi ini menghasilkan berbagai sesar besar, lipatan, serta zona obduksi ofiolit. Setelah tumbukan terjadi, stuktur utama yang terbentuk adalah Sesar Kolaka dan Sesar Konawehea yang memanjang sejajar lengan, keduanya berorientasi barat laut – tenggara. Sesar ini berperan sebagai patahan mendatar – oblique yang mengontrol pembentukan cekungan sekaligus jalur aliran sungai besar. Selain itu, terdapat Sesar Lasolo yang memisahkan jalur batuan ofiolit di utara dengan batuan metamorf dan sedimen di selatan, menunjukkan batas tektonik.

Selain sesar, juga berkembang struktur lipatan yang umumnya sinklin-antiklin sempit pada satuan molasa Tersier. Perlapisan sedimen Tersier sering terlipat kuat hingga miring-tegak akibat aktivitas tektonik Miosen-Pleistosen. Zona

pegunungan ofiolit (Pegunungan Mekongga, Tangkelamboke, Mendoke) merepresentasikan punggungan tektonik hasil penngangkatan (*obduction*). Sedangkan pada bagian timur dan selatan berkembang struktur sesar naik dan sesar geser yang berasosiasi dengan zona subduksi Banda. Secara umum, pola struktur geologi regional menunjukkan pengaruh kuat tektonik obduksi dan tumbukan, yang membentuk kerangka morfologi kasar khas Sulawesi Tenggara.



Gambar 4 Sesar Utama Lengan Tenggara Sulawesi (Surono,2013)

1.4.5 Profil Laterit

Indonesia memiliki sumber daya bijih nikel sebesar 11.887 juta ton (tereka 5.094 juta ton, terunjuk 5.094 juta ton, terukur 2.626 ton, hipotetik 228 juta ton) dan cadangan bijih sebesar 4.346 juta ton (terbukti 3.360 juta ton dan terikira 986 juta ton) berdasarkan pemetaan Badan Geologi pada Juli 2020. Sedangkan untuk total sumber daya logam mencapai 174 juta ton dan 68 juta ton cadangan logam. Beberapa daerah yang menjadi sumber utama tambang Nikel Indonesia adalah Sulawesi Tengah, Sulawesi Tenggara dan Maluku Utara.

Endapan nikel laterit terbentuk melalui proses pelapukan intensif pada batuan ultramafik, seperti peridotit dan serpentin, di lingkungan tropis yang lembap. Proses ini menghasilkan profil vertikal yang terdiri dari beberapa zona dengan karakteristik mineralogi dan geokimia yang berbeda. Secara umum, profil laterit terdiri dari zona overburden, limonit, saprolit, dan bedrock. Masing-masing zona memiliki peran penting dalam eksplorasi dan penambangan nikel. Pembagian zona laterit pada endapan nikel laterit dilakukan dengan menentukan presentase unsur nikel (Ni) yang terkandung di dalam sampel nikel laterit. Menurut Robb (2005), zona nikel laterit berdasarkan presentasi unsur nikel (Ni) yang terkandung dalam sampel nikel laterit terbagi menjadi empat yaitu, zona limonit memiliki kandungan nikel (Ni)

sebesar 0,5–2,0%, zona saprolit memiliki unsur nikel (Ni) sebesar 1–5% dan zona saprock memiliki unsur Ni sebesar 5–20%.

Zona limonit terletak di atas dan kaya akan oksida besi seperti goetit dan hematit, dengan kadar nikel berkisar antara 0,3% hingga 1,42%. Zona ini memiliki ketebalan sekitar 2 hingga 3 meter dan sering dijumpai mineral lempung serta mangan. Di bawahnya, zona saprolit mengandung nikel yang lebih tinggi, antara 1,7% hingga 3,4%, dan kaya akan mineral seperti serpentin dan garnierit. Ketebalan zona saprolit berkisar antara 3 hingga 8 meter. Zona ini penting karena menjadi target utama dalam penambangan nikel laterit.

Zona bedrock atau *bluezone* merupakan batuan dasar yang belum mengalami pelapukan signifikan. Batuan ini umumnya terdiri dari peridotit atau dunit yang masif dan kompak, dengan kadar nikel di bawah 0,5%. Namun, dalam beberapa kasus, zona ini mengalami frakturisasi yang diisi oleh mineral seperti garnierit dan silika, membentuk struktur yang dikenal sebagai "*silica boxwork*". Istilah "*Bluezone*" merujuk pada bagian dari zona bedrock yang memiliki karakteristik khusus. Zona ini ditandai oleh frakturisasi yang kuat dan kadang terisi oleh mineral garnierit dan silika. Frakturisasi ini memungkinkan terbentuknya zona dengan kadar nikel tinggi, meskipun posisinya tersembunyi dan relatif sedikit. Bluezone sering menjadi batas bawah dalam penambangan karena kadar nikelnya yang menurun di bawah batas ekonomis.

Pentingnya memahami karakteristik Bluezone terletak pada perannya sebagai batas bawah endapan nikel laterit. Penaksiran secara tepat terhadap posisi horizon bagian atas atau top elevasi bluezone sebagai batas luar zona bijih pada pemodelan endapan nikel laterit harus dilakukan untuk mendapatkan deskripsi tubuh bijih yang optimal. Dengan mengetahui posisi dan karakteristik zona ini, perusahaan tambang dapat mengoptimalkan operasi penambangan dan meminimalkan risiko kehilangan bijih yang bernilai.

Dalam konteks geostatistik, simulasi kondisional seperti *sequential gaussian simulation* (SGS) dapat digunakan untuk memodelkan distribusi spasial dari Bluezone. Metode ini memungkinkan estimasi yang lebih realistis terhadap variabilitas geologi dan membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih informatif dalam eksplorasi dan penambangan nikel laterit. Selain itu, pemodelan elevasi top *bluezone* juga dipengaruhi oleh faktor-faktor geologi dan topografi. Studi oleh Fadli, menunjukkan bahwa pola penyebaran dan ketebalan zona bijih endapan nikel laterit berkorelasi dengan topografi permukaan. Daerah dengan topografi landai cenderung memiliki kadar nikel yang tinggi dan ketebalan yang lebih besar, sedangkan daerah berbukit menunjukkan ketebalan yang lebih tipis meskipun dengan kadar yang tinggi. Informasi ini penting dalam menentukan batas bawah dari zona penambangan yang ekonomis.

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	0.02 to 0.1	25 to 40	5 to 15
	SAPROLITE/ GARNIERITE/ SERPENTINE	1.8 to 3		10 to 25	15 to 35
	FRESH ROCK	0.3	0.01	5	35 to 45

Gambar 5 Profil Laterit (Kumarawarman, 2016)

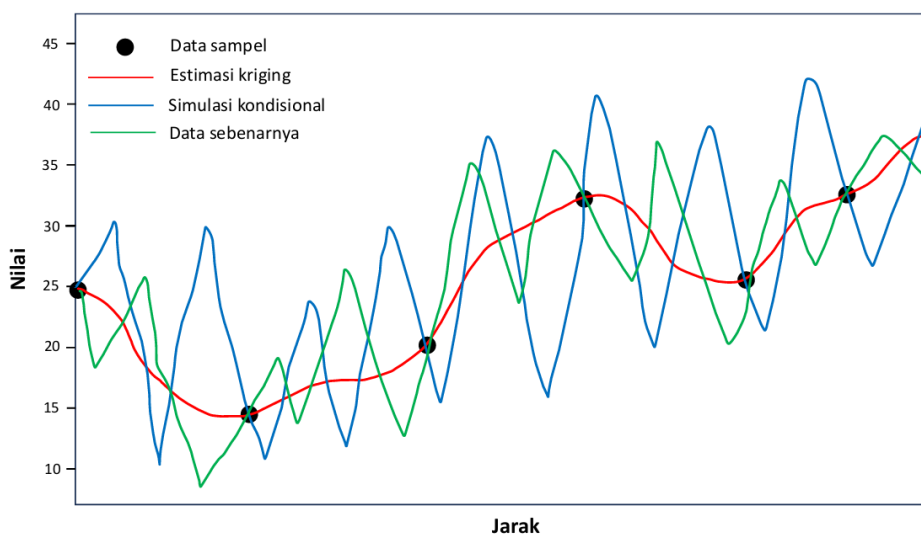
1.4.6 Geostatistik dalam Pemodelan Geologi

Geostatistik merupakan cabang ilmu statistik yang berfokus pada analisis data spasial, terutama yang berkaitan dengan distribusi geologi dan sumber daya alam. Geostatistik terdiri dari dua suku kata, yaitu “geo” yang merujuk pada sifat ruang atau spasial dan “statistik” yang merujuk pada sifat ketidakpastian dengan probabilitas tertentu. Geostatistik dikenal sebagai aplikasi metode probabilistik untuk variabel terregional yang memiliki fungsi spasial tertentu sehingga industri pertambangan menerapkan metode ini untuk estimasi dan evaluasi sumber daya hingga saat ini. Dalam konteks eksplorasi geologi, geostatistik bukan hanya digunakan untuk memahami ketidakpastian yang melekat pada data hasil eksplorasi. Dengan demikian, geostatistik menjadi landasan penting dalam eksplorasi dan perencanaan tambang, khususnya pada endapan nikel laterit yang memiliki heterogenitas tinggi.

Menurut Heriawan (2021), geostatistik memiliki keunggulan dalam memodelkan variabilitas spasial dibandingkan metode deterministik karena mempertimbangkan struktur korelasi spasial antar data titik. Metode deterministik seperti kriging merupakan salah satu metode geostatistik linier yang paling sering diterapkan untuk estimasi sumber daya mineral. Walaupun demikian, metode ini hanya menghasilkan satu nilai estimasi dalam setiap titik serta menimbulkan *smoothing effect* pada hasil estimasi, selain itu syarat data harus stasioner dan struktur variogramnya tidak memiliki varians *nugget* yang tinggi. Metode OK juga sensitif terhadap jumlah dan sebaran data, di mana jika data hanya sedikit dan sebarannya tidak teratur, akan menghasilkan varians estimasi (*variens error*) yang

relatif tinggi, sehingga kurang mampu merepresentasikan variasi alami dari sistem geologi.

Oleh karena itu, untuk pemodelan spasial yang menekankan pada variasi lokal dari data titik, metode simulasi kondisional seperti *Sequential Gaussian Simulation* (SGS) dapat diterapkan karena pendekatan metode simulasi ini memperhitungkan variasi spasial data asli di lokasi dengan sampel dan variasi hasil perkiraan di lokasi tanpa sampel sehingga mampu mereproduksi statistik sampel (histogram dan model kontinuitas spasial) dan memberikan hasil yang lebih realistis dibandingkan metode kriging. Metode OK yang menghasilkan smoothing effect lebih tepat diterapkan untuk estimasi sumber daya sebagai basis estimasi cadangan pada perencanaan tambang jangka panjang (tahunan). Namun untuk perencanaan tambang jangka pendek (bulanan), metode SGS dapat membantu memodelkan variasi volume atau tonase bijih dan kadar dari setiap *cell* atau blok yang akan ditambang. Apalagi jika terdapat batasan target produksi bulanan dalam jumlah tonase tertentu, termasuk ketentuan kadar batas (cut-off grade), maka SGS dapat digunakan untuk menghasilkan probability map ketercapaian target pada setiap bloknya.



Gambar 6 Perbandingan data estimasi kriging dan simulasi kondisional dengan data sebenarnya (Heriawan,2021)

Pada gambar diatas dilihat bagaimana perbandingan antara hasil estimasi kriging dan simulasi kondisional terhadap variasi lokal yang ditunjukkan oleh kondisi data sebenarnya. Terlihat bahwa model estimasi kriging cenderung smooth jika dibandingkan dengan variasi data sebenarnya, sedangkan model simulasi kondisional dapat merepresentasikan variasi lokal antar-spasial sampel yang cenderung mirip dengan variasi data sebenarnya. Dengan demikian pada saat metode kriging digunakan untuk estimasi sumber daya mineral, maka hasil estimasi tersebut lebih tepat digunakan sebagai input untuk estimasi cadangan (tertambang)

pada perencanaan tambang jangka panjang (*long-term mine plan*) atau perencanaan tahunan. Sedangkan, untuk perencanaan tambang jangka pendek lebih tepat dibangun menggunakan simulasi kondisional yang dapat memodelkan variasi data pada skala lokal (*local variability*).

Pemilihan metode *Sequential Gaussian Simulation* (SGS) untuk pemodelan *elevasi top zona bluezone* didasarkan pada kemampuannya dalam menangkap heterogenitas spasial dan mengkuantifikasi ketidakpastian, yang sering kali tidak dapat dicapai oleh metode deterministik seperti kriging atau interpolasi berbasis jarak seperti *Inverse Distance Weighting* (IDW). SGS menghasilkan beberapa realisasi yang memungkinkan analisis statistik lebih lanjut, seperti peta rata-rata (*E-type*) dan peta variansi, yang memberikan gambaran lebih komprehensif tentang distribusi spasial variabel geologi. Hal ini sangat penting dalam konteks eksplorasi dan penambangan, di mana pemahaman tentang variabilitas dan ketidakpastian dapat mempengaruhi keputusan ekonomi dan operasional.

1.4.7 Simulasi Kondisional Geostatistik

Sequential Gaussian Simulation (SGS) merupakan salah satu metode simulasi geostatistik yang dikembangkan untuk menghasilkan representasi realistis dari variabilitas spasial suatu parameter geologi. Prinsip utama SGS adalah transformasi data asli ke dalam distribusi normal standar (*Gaussian*) sehingga dapat memenuhi asumsi dasar metode simulasi berbasis *Gaussian*. Setelah transformasi, algoritma SGS membangun jalur simulasi acak (*random path*) pada grid, kemudian setiap node diprediksi berdasarkan distribusi kondisional Gaussian yang diturunkan dari variogram serta nilai data yang sudah diketahui atau telah disimulasikan sebelumnya. Proses ini berlangsung secara sekuensial hingga seluruh grid terisi, sehingga menghasilkan satu realisasi spasial yang konsisten dengan data input dan struktur variabilitas yang ditentukan oleh model variogram.

Dibandingkan dengan metode estimasi deterministik seperti ordinary kriging (OK), SGS tidak hanya menghasilkan satu nilai estimasi pada setiap titik, tetapi juga menghasilkan banyak realisasi yang berbeda dengan mempertahankan statistik global data (mean, variance, histogram). Hal ini sangat penting karena dalam kenyataannya, distribusi geologi atau geokimia tidak dapat direpresentasikan dengan satu nilai tunggal, melainkan memiliki ketidakpastian spasial yang signifikan. SGS dapat memberikan informasi mengenai kemungkinan variasi distribusi suatu parameter, sehingga lebih representatif untuk mendukung pengambilan keputusan eksplorasi maupun perencanaan tambang.

Keunggulan SGS dibandingkan metode geostatistik lain juga ditunjukkan dalam penelitian terkini. Misalnya, *Foued et al. (2020)* menggunakan SGS untuk memodelkan heterogenitas reservoir hidrokarbon, dan hasilnya menunjukkan bahwa metode ini mampu menangkap ketidakpastian distribusi dengan lebih baik dibandingkan kriging. Sementara itu, *Wang et al. (2021)* menerapkan SGS dalam pemodelan kadar bijih logam dan menyimpulkan bahwa metode ini efektif untuk memetakan variabilitas spasial pada data eksplorasi yang memiliki keterbatasan

jumlah sampel. Dengan demikian, SGS terbukti unggul dalam memberikan representasi realistis dari variasi geologi, khususnya pada kondisi di mana data bor tidak merata dan anisotropi struktural sangat berpengaruh.

Selain itu, SGS juga dapat dibandingkan dengan metode simulasi lain seperti Sequential Indicator Simulation (SIS). SIS lebih cocok untuk variabel kategorikal, misalnya litologi atau fasies, sedangkan SGS lebih tepat diterapkan pada variabel kontinu seperti kadar unsur geokimia atau elevasi topografi (Goovaerts, 1997; Rossi & Deutsch, 2014). Hal ini menjadikan SGS sebagai metode yang sangat relevan dalam penelitian pemodelan elevasi top Bluezone, karena variabel yang dimodelkan bersifat kontinu. SGS tidak hanya mempertahankan histogram dan variogram data asli, tetapi juga mampu menyajikan peta ketidakpastian spasial berupa mean, variance, hingga probability map dari hasil multiple realization.

Dengan mempertimbangkan keunggulan-keunggulannya, SGS menjadi metode yang sesuai untuk menjawab permasalahan utama dalam penelitian ini, yaitu bagaimana memodelkan elevasi top Bluezone secara representatif dengan tetap memperhitungkan ketidakpastian spasial. Seperti dijelaskan oleh *Heriawan (2023)* dalam orasi ilmiahnya, simulasi geostatistik termasuk SGS adalah pendekatan yang lebih realistis dibanding estimasi deterministik, karena ia tidak menyederhanakan variasi spasial menjadi rata-rata tunggal, melainkan menampilkan keseluruhan spektrum kemungkinan yang lebih dekat dengan kondisi geologi sesungguhnya.

Dalam pemodelan elevasi top zona bluezone digunakan perangkat lunak yaitu SgeMS (*Stanford Geostatistical Modeling Software*). Penggunaan perangkat lunak ini merupakan pendekatan yang efektif untuk memodelkan variabel spasial seperti elevasi top zona Bluezone. SGeMS menyediakan antarmuka pengguna grafis (GUI) yang intuitif, lingkungan visualisasi 2D interaktif, dan berbagai algoritma geostatistik, termasuk SGS, yang memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi spasial dengan efisien.



Gambar 7 Logo Software SGeMS

Berikut adalah langkah umum dalam implementasi SGS untuk memodelkan top bluezone di SGeMS:

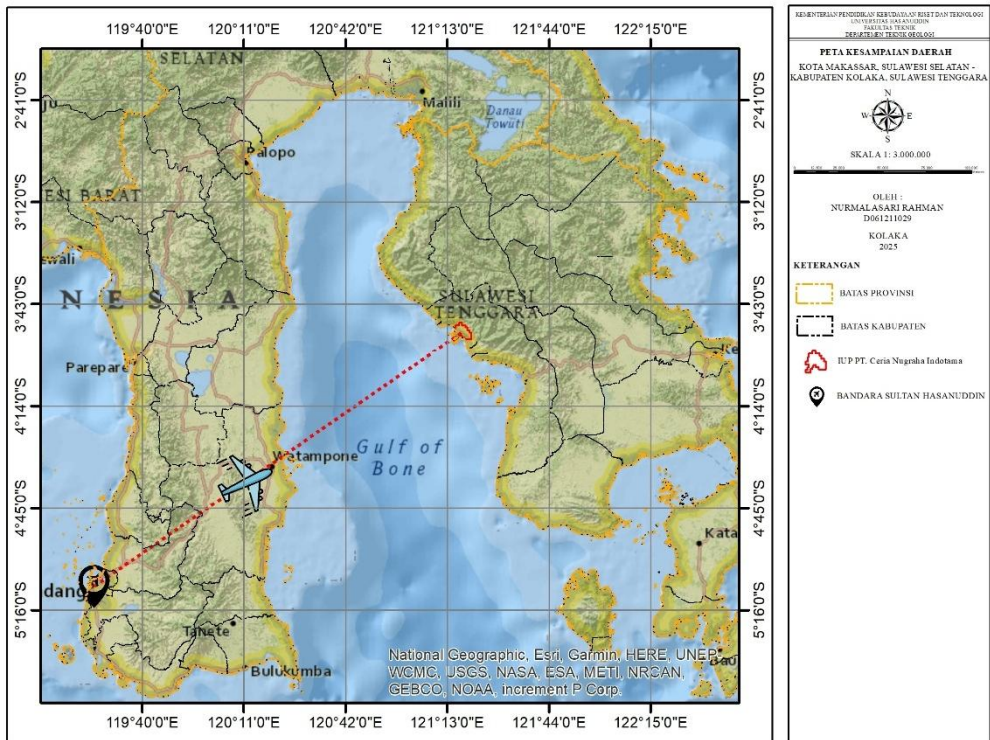
- 1) Menyiapkan file input berformat .sgems atau .csv dengan koordinat dan nilai elevasi top zona Bluezone dari data bor.
- 2) Melakukan *normal score transform* pada data tersebut.
- 3) Membangun variogram eksperimental dan fitting variogram model (misalnya spherical atau exponential).
- 4) Menentukan dimensi grid, batasan domain simulasi, dan parameter simulasi lainnya (seperti search neighborhood dan jumlah simulasi).
- 5) Menjalankan SGS dan menyimpan hasil realisasi simulasi (misalnya real0, real1, hingga real99) untuk analisis lanjutan.

Dari hasil simulasi di atas, diperoleh dari pengolahan data berupa sejumlah realisasi model spasial dari elevasi top bluezone yang merepresentasikan ketidakpastian dan variasi alami dari data geologi di lapangan. Setiap realisasi memberikan gambaran kemungkinan distribusi elevasi berdasarkan data bor yang tersedia serta struktur variogram yang ditetapkan, sehingga memungkinkan analisis statistik lebih lanjut seperti peta nilai rata-rata (*mean map*), peta standar deviasi (*variance map*), hingga probabilitas suatu zona berada dalam rentang nilai tertentu. Berbeda dari metode estimasi seperti kriging yang menghasilkan satu model halus (*smooth*), SGS justru mempertahankan heterogenitas lokal dan mampu memberikan dasar yang kuat untuk analisis risiko serta pengambilan keputusan yang lebih andal dalam eksplorasi dan perencanaan tambang.

BAB II METODOLOGI

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Waktu kegiatan kerja praktik di mulai pada bulan maret sampai september (d disesuaikan dengan kebijakan yang ada di perusahaan) dan kegiatan kuliah praktik ini dilakukan di PT. Ceria Nugraha Indotama.



Gambar 8 Peta lokasi penelitian

Secara administratif daerah penelitian termasuk dalam daerah kawasan tambang PT. Ceria Nugraha Indotama yang terletak di Kecamatan Wolo, Kabupaten Kolaka, Provinsi Sulawesi Tenggara. Daerah penelitian termasuk dalam lembar wolo nomor 2112- 32 Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1 : 50.000 yang diterbitkan bakosurtanal edisi I tahun 1988 (Cibinong, Bogor). Seacara geografis daerah kerja praktik terletak pada 121°14'30" – 121°20'30" Bujur Timur (BT) dan 3°48'50" – 3°55'00" Lintang Selatan (LS).

Untuk mencapai lokasi kerja praktik ditempuh dengan melalui transportasi udara dari makassar (bandara Sultan Hasanuddin) menuju ke Pomala (bandara Sangia Nibandera) dengan waktu tempuh kurang lebih 1 jam perjalanan. Kemudian dilanjutkan dengan menggunakan transportasi darat dari pomala ke lokasi tambang (PT Ceria Nugraha Indotama) memakan waktu 2 jam perjalanan.

2.2 Variabel Penelitian

Penelitian ini menggunakan tiga variabel utama, yaitu data titik koordinat X dan Y untuk memetakan posisi spasial dari setiap titik pengamatan permukaan dan data kedalaman atau elevasi pengeboran (*Z_bot_ore*) sebagai variabel utama yang menjadi batas atas zona *bluezone*. Variabel – variabel tersebut dipilih karena memiliki peran penting dalam membangun model spasial elevasi, sehingga dapat memberikan informasi tentang ketebalan laterit dan kedalaman bedrock yang menjadi acuan dalam eksplorasi maupun perencanaan tambang.

2.3 Sumber Data

Sumber data yang digunakan pada penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari department eksplorasi PT. Ceria Nugraha Indotama. Data yang diberikan adalah data collar hasil pengeboran yang mencakup informasi posisi titik bor (koordinat X dan Y) serta elevasi *bottom ore* (*z_bot_ore*). Data ini dipilih karena langsung mencerminkan kondisi geologi bawah permukaan dan dapat digunakan sebagai dasar dalam pemodelan spasial dengan metode geostatistik.

2.4 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini dirancang secara sistematis mulai dari persiapan data, pengolahan, hingga validasi hasil. Adapun langkah – langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

2.4.1 Validasi dan Penyusunan Database

Langkah awal penelitian adalah validasi data untuk memastikan keakuratan dan konsistensi. Data hasil pengeboran diperiksa untuk mengidentifikasi adanya nilai anomali atau outlier yang dapat memengaruhi hasil simulasi. Setelah validasi, data disusun dalam format yang sesuai dengan perangkat lunak SgeMS, yaitu dalam bentuk text file (.txt) dengan struktur berisi judul data, jumlah variabel, nama variabel, dan baris data yang dimasukkan secara horizontal.

2.4.2 Analisis Statistik Deskriptif

Setelah data tervalidasi, dilakukan analisis statistik deskriptif untuk mengetahui karakteristik sebaran data. Parameter yang dihitung meliputi nilai minimum, maksimum, mean, median, standar deviasi, variansi, serta koefisien variasi. Analisis ini bertujuan untuk memberikan gambaran awal mengenai distribusi data elevasi *top bluezone*.

2.4.3 Transformasi Normal Score

Metode SGS mengharuskan data mengikuti distribusi normal. Oleh karena itu, data *z_bot_ore* di transformasikan menjadi *normal score*. Transformasi ini dilakukan dengan menyusun data berdasarkan peringkat, kemudian menghubungkannya dengan distribusi normal standar (mean = 0, standar deviasi = 1). Setelah simulasi

selesai data hasil simulasi akan dikembalikan ke skala aslinya melalui proses *back transform*.

2.4.4 Analisis dan Pembuatan Variogram

Variogram digunakan untuk memahami struktur spasial data. Variogram eksperimental dibuat berdasarkan data normal score, kemudian dilakukan fitting menggunakan model matematis (gaussian, spherical, atau exponential). Parameter nugget, sill dan range ditentukan untuk merepresentasikan hubungan spasial antar data. Analisis dilakukan pada arah (0° , 45° , 90° , dan 135°) untuk menangkap anisotropi spasial.

2.4.5 Pembuatan Grid Pemodelan

Grid pemodelan dibuat dengan memperhatikan sebaran titik bor dan dimensi area penelitian. Parameter grid yang ditentukan meliputi origin coordinate, dimensi grid (jumlah sel dalam arah X, Y, dan Z), serta ukuran cell size yang disesuaikan dengan jarak antar titik bore. Grid ini menjadi dasar spasial dalam proses simulasi SGS.

2.4.6 Sequential Gaussian Simulation (SGS)

Simulasi SGS dijalankan pada data normal score dengan menggunakan model variogram yang telah ditentukan. Proses ini dilakukan secara berurutan (*sequential*) dan acak (*random path*) untuk menghasilkan nilai elevasi pada seluruh node grid. Dalam penelitian ini dilakukan sebanyak 100 realisasi, sehingga diperoleh berbagai kemungkinan distribusi spasial elevasi *top bluezone*.

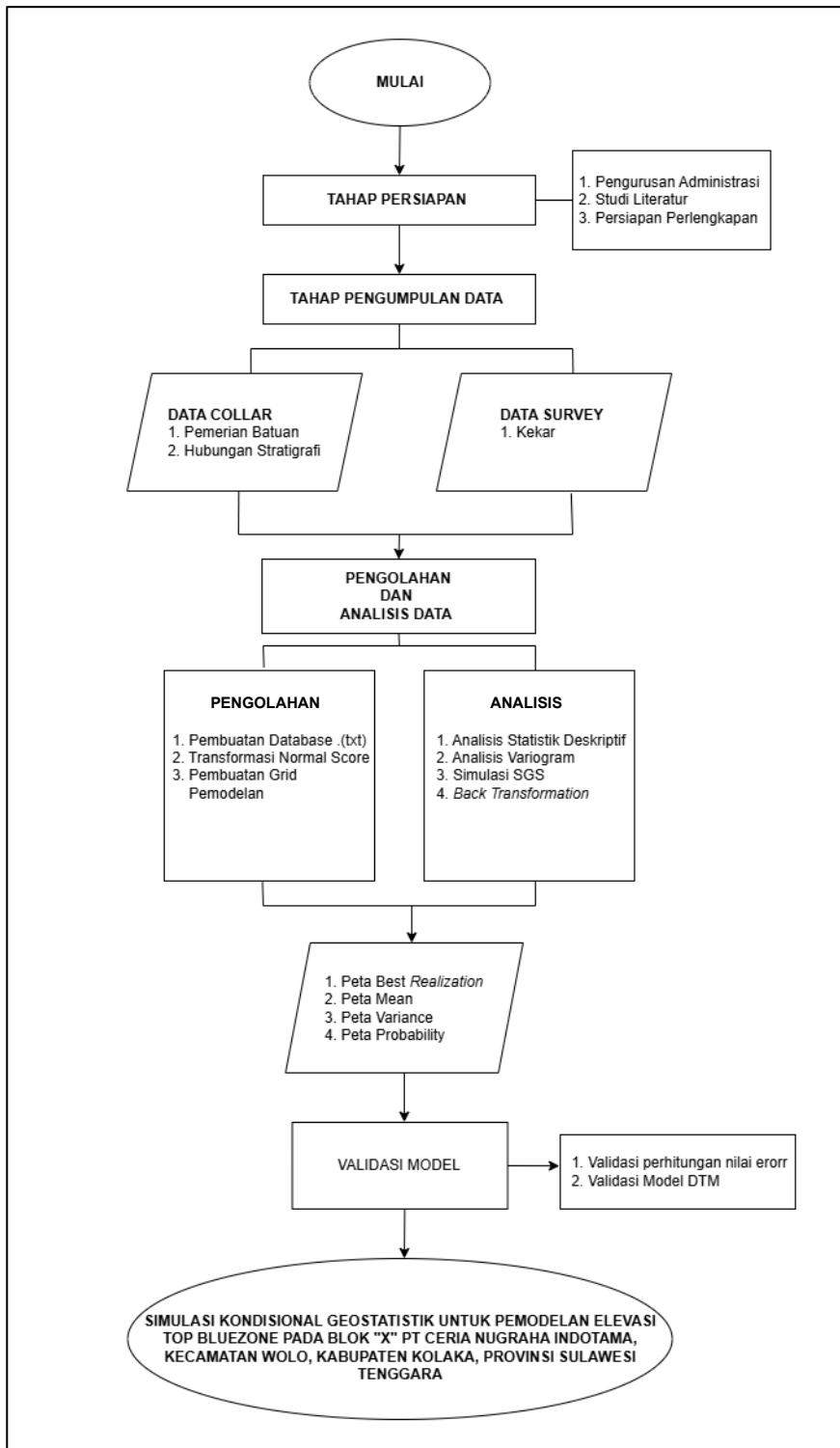
Hasil simulasi yang masih dalam bentuk normal score dikembalikan ke skala data asli melalui *back transformation*. Dari hasil ini kemudian dibuat peta mean (E-type), peta variance, dan peta probability. Peta – peta tersebut menggambarkan rata-rata estimasi, ketidakpastian, serta peluang kondisi geologi tertentu.

2.4.7 Validasi Model

Tahap akhir pemodelan adalah validasi model dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data aktual. Evaluasi dilakukan menggunakan parameter RMSE, MAE, dan koefisien determinasi (R^2). Realisasi dengan nilai error terkecil dipilih sebagai best realization yang paling mendekati kondisi nyata lapangan, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan tambang.

2.5 Penyusunan Laporan

Tahap akhir dari penelitian yaitu tahap penyusunan laporan yang dibuat berdasarkan pengolahan data yang telah dilakukan sebelumnya. Laporan ini merupakan skripsi dari peneliti sendiri sebagai syarat kelulusan di Departmen Teknik Geologi, Universitas Hasanuddin.



Gambar 9 Diagram alir penelitian