

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Peningkatan permintaan *stainless steel* seiring dengan semakin berkembangnya industri kendaraan listrik menyebabkan terjadinya peningkatan permintaan terhadap nikel yang menjadi salah satu material utama pembuatannya (Konig, 2021). Tingginya permintaan akan bijih nikel mendorong dilakukannya kegiatan eksplorasi bijih nikel yang secara umum ditujukan pada dua sumber utama bijih nikel yaitu nikel sulfida dan nikel laterit. Nikel laterit merupakan salah satu sumber utama pemasok kebutuhan nikel dunia dimana hingga tahun 2000 telah menyuplai sekitar 40% dari total produksi nikel dunia (Butt *and* Cluzel, 2013). Nikel laterit memiliki potensi sekitar 60 – 70% sumber daya nikel di dunia dan telah ditambang selama sekitar 140 tahun. Potensi nikel laterit yang sangat besar juga ditemukan di Indonesia terutama di Sulawesi dan Halmahera dengan singkapan batuan ultramafik terbesar di dunia (Van Der Ent *et al.*, 2013).

Pembentukan endapan nikel laterit yang merupakan produk hasil pelapukan, pelindian, dan pengayaan supergen dari batuan ultramafik sangat dipengaruhi oleh faktor iklim seperti curah hujan dan suhu, topografi, drainase berupa infiltrasi dan *run off*, tektonik, struktur geologi sebagai bidang lemah, serta tipe batuan asalnya (Elias, 2002). Identifikasi potensi nikel laterit suatu area dapat dilakukan melalui kegiatan pengeboran yang mampu memberikan informasi detail dari distribusi vertikal dan lateral suatu deposit berdasarkan tingkat kerapatan dari spasi bor yang diterapkan. Data hasil pengeboran kemudian dapat digunakan sebagai data dasar dalam melakukan kegiatan estimasi sumber daya untuk dapat memprediksi geometri dan model geologi dari suatu endapan, kuantitas material, dan kadar atau kandungan unsur dari suatu deposit menggunakan berbagai metode seperti metode klasik yang terdiri atas metode poligonal dan penampang (Sinclair *and* Blackwell, 2004) ataupun metode geostatistik modern seperti *kriging* yang mempertimbangkan aspek geospasial data sehingga dapat memberikan hasil estimasi yang baik. Beberapa metode *kriging* yang dapat digunakan dalam estimasi sumber daya adalah *simple kriging*, *ordinary kriging*, dan *universal kriging*. Di antara beberapa jenis

metode *kriging* yang ada, metode *ordinary kriging* menjadi metode yang paling umum digunakan dalam estimasi sumber daya mineral. Penerapan *ordinary kriging* dilakukan dengan mempertimbangkan aspek korelasi spasial data sampel yang direpresentasikan oleh semivariogram. Metode *ordinary kriging* memberikan hasil estimasi beserta prediksi kesalahan relatif (*relative error*) estimasi yang direpresentasikan oleh *kriging variance*, *kriging efficiency*, dan *regression slope* yang dapat digunakan sebagai parameter dalam menilai tingkat keyakinan hasil estimasi. Varians *kriging* (*kriging variance*) merupakan fungsi dari model variogram dan jarak spasi bor yang dapat digunakan dalam mengukur kesalahan relatif hasil estimasi (Heriawan dkk, 2011). Menurut Taghvaeenejad *et al.* (2021), *kriging variance*, *kriging efficiency*, dan *regression slope* dapat digunakan untuk memprediksi kesalahan relatif dan ketidakpastian (*uncertainty*) dari suatu hasil estimasi. Kesalahan relatif dan tingkat ketidakpastian estimasi sangat dipengaruhi oleh beberapa aspek yang meliputi kerapatan data sampel / jarak spasi bor, variabilitas data sampel, dan korelasi spasial data sampel yang dapat dianalisis dengan menggunakan variogram. Kesalahan relatif dan tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) hasil estimasi dapat digunakan sebagai parameter pertimbangan dalam penentuan klasifikasi sumber daya yang menurut kode KCMI 2017 terbagi menjadi tiga kategori yaitu sumber daya terukur, tertunjuk, dan tereka.

Salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menurunkan faktor ketidakpastian hasil estimasi adalah melalui peningkatan kerapatan jarak / spasi antar data bor (Cornah *et al.*, 2013) seperti kegiatan *infill drilling*. Kegiatan *infill drilling* memungkinkan untuk dilakukannya analisis pengaruh perubahan jarak spasi bor terhadap tingkat ketidakpastian (*uncertainty*) hasil estimasi sehingga dapat menjadi acuan dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral. Pelaksanaan kegiatan *infill drilling* tentunya akan menyebabkan peningkatan biaya eksplorasi sehingga analisis variasi jarak spasi bor perlu dilakukan untuk mengidentifikasi jarak spasi bor optimum yang dapat merepresentasikan kualitas dan tingkat keyakinan hasil estimasi yang memadai dalam pengklasifikasian sumber daya mineral. Hasil analisis spasi bor optimum dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral dapat menjadi acuan dalam perencanaan strategi eksplorasi sehingga biaya eksplorasi dapat dimanfaatkan secara lebih efisien (Saikia and Sarkar, 2006).

1.2. Rumusan Masalah

Sumber daya nikel laterit suatu area dapat diidentifikasi dan diestimasi melalui kegiatan pengeboran yang kemudian dilanjutkan dengan proses pemodelan dan estimasi geostatistik seperti *ordinary kriging*. Kualitas hasil estimasi sangat dipengaruhi oleh faktor ketidakpastian (*uncertainty*) dari kuantitas dan kadar hasil estimasi yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam penentuan klasifikasi sumber daya menjadi kelas terukur, tertunjuk, dan tereka yang merepresentasikan tingkat keyakinan estimasi tertinggi hingga terendah secara berturut-turut. Ketidakpastian estimasi sumber daya mineral dapat dikurangi melalui peningkatan kerapatan spasi bor untuk dapat merepresentasikan kondisi geologi endapan secara lebih representatif, namun hal ini akan turut diikuti dengan peningkatan biaya eksplorasi sehingga diperlukan strategi perencanaan kegiatan eksplorasi berupa analisis jarak spasi bor optimal yang dapat memberikan referensi kapan suatu kegiatan pengeboran *infill* dapat dihentikan dengan turut mempertimbangkan kualitas dan keyakinan hasil estimasi yang memadai.

Optimasi spasi bor dalam penentuan klasifikasi sumber daya nikel laterit pada Lapangan Ofionik mengangkat beberapa rumusan masalah yang akan dibahas dalam penelitian ini yang meliputi :

- a) Pemodelan dan analisis domain / zona estimasi sumber daya mineral sebelumnya dilakukan terhadap dua zona mineralisasi utama yaitu limonit dan saprolit. Penelitian saat ini melakukan analisis secara lebih detail terkait pembagian zona profil laterit terutama pada saprolit dimana terdapat indikasi kemungkinan untuk melakukan pembagian saprolit secara lebih detail berdasarkan analisis kadar geokimia. Zona laterit yang lebih detail kemudian digunakan dalam proses pemodelan dan analisis geostatistik. Penelitian ini menganalisis bagaimana model dan kemenerusan geologi serta variabilitas kadar Ni pada setiap zona mineralisasi dalam estimasi sumber daya nikel laterit pada area penelitian.
- b) Pada estimasi sumber daya mineral sebelumnya tidak dilakukan analisis secara detail terkait kualitas hasil estimasi parameter geostatistik seperti *kriging efficiency* ataupun *conditional bias slope* pada setiap zona laterit yang diestimasi dengan menggunakan metode *ordinary kriging*. Pada

penelitian saat ini, analisis parameter geostatistik secara lebih detail dilakukan untuk setiap zona mineralisasi sehingga dapat diketahui tingkat kualitas dan keyakinan hasil estimasi pada setiap zona. Penelitian saat ini menganalisis bagaimana kualitas parameter geostatistik hasil estimasi pada setiap zona mineralisasi serta menganalisis bagaimana perubahan nilai parameter geostatistik (*kriging efficiency*, *conditional bias slope*, dan *relative kriging standard*) terhadap perubahan jarak spasi bor yang rapat hingga spasi bor yang lebih renggang.

- c) Pengklasifikasian sumber daya mineral sebelumnya dilakukan melalui pemodelan geologi, estimasi dengan *ordinary kriging*, dan pembobotan parameter geostatistik melalui generalisasi jarak spasi bor yang lebih rapat atau sama dengan 50m x 50m untuk sumber daya terukur, 100m x 100m untuk sumber daya tertunjuk, dan lebih dari 200m x 200m untuk sumber daya tereka untuk seluruh zona laterit. Estimasi sebelumnya tidak membahas bagaimana tingkat presisi hasil estimasi pada setiap zona mineralisasi (limonit dan saprolit) pada variasi jarak spasi bor. Penelitian saat ini menganalisis secara lebih detail terkait dengan tingkat keyakinan hasil estimasi *ordinary kriging* menggunakan analisis geostatistik dalam penentuan klasifikasi sumber daya nikel laterit pada variasi simulasi konfigurasi jarak spasi bor sehingga didapatkan spasi bor optimum yang sesuai dalam merepresentasikan kelas sumber daya mineral dengan mempertimbangkan analisis geostatistik detail pada setiap zona laterit. Penelitian ini menganalisis berapa spasi bor optimum dalam penentuan klasifikasi sumber daya berdasarkan analisis geostatistik terutama pada kelas sumber daya yang berpotensi dikonversi sebagai cadangan mineral.
- d) Estimasi dan klasifikasi sumber daya nikel laterit sebelumnya dilakukan dengan metode *ordinary kriging* untuk zona limonit dan saprolit. Penelitian saat ini melakukan analisis dan estimasi secara lebih detail terkait pembagian zona profil laterit terutama pada saprolit serta mengklasifikasikan sumber daya mineral secara lebih detail berdasarkan pendekatan geostatistik pada setiap zona laterit berdasarkan analisis estimasi pada simulasi jarak spasi bor. Penelitian ini menganalisis berapa

hasil estimasi dan klasifikasi sumber daya nikel laterit area penelitian berdasarkan pendekatan geostatistik pada simulasi jarak spasi bor.

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jarak spasi bor optimum yang representatif dalam penentuan klasifikasi sumber daya endapan nikel laterit pada Lapangan Ofionik, Konawe Utara, Sulawesi Tenggara. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Memodelkan dan menganalisis tingkat kemenerusan geologi dan kadar endapan nikel laterit di area penelitian.
- b) Menganalisis kualitas parameter geostatistik estimasi pada setiap zona mineralisasi dan pengaruh perubahan jarak spasi bor terhadap kualitas geostatistik hasil estimasi.
- c) Menganalisis spasi bor optimum dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral terutama untuk kelas sumber daya yang berpotensi dikonversi menjadi cadangan mineral.
- d) Mengestimasi dan mengklasifikasikan sumber daya nikel laterit di lokasi penelitian dengan pendekatan geostatistik berdasarkan simulasi jarak spasi bor.

Dengan mencapai tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam menganalisis potensi endapan nikel laterit di lokasi penelitian, mendukung perencanaan kegiatan eksplorasi yang lebih efisien sesuai dengan tingkat variabilitas geologi sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam kegiatan penambangan.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat dalam berbagai aspek, baik bagi industri, pengembangan ilmu pengetahuan, serta untuk masyarakat. Adapun manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a) Manfaat bagi industri pertambangan
Hasil penelitian ini akan memberikan dan atau meningkatkan pemahaman mengenai model geologi dan sebaran kadar nikel (Ni) secara 3 dimensi (3D)

yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan program eksplorasi yang lebih efisien sesuai dengan tingkat variabilitas geologi sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam melakukan kegiatan penambangan yang optimal. Hasil analisis dalam penelitian memberikan pemahaman mendalam terkait dengan faktor ketidakpastian (*uncertainty*) hasil estimasi dari variasi jarak spasi bor sehingga dapat menjadi pertimbangan dalam penentuan tingkat keyakinan model dan estimasi sumber daya yang direpresentasikan oleh klasifikasi sumber daya mineral yang selanjutnya digunakan dalam perencanaan kegiatan penambangan.

b) Manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan

Penelitian ini akan menambah pengetahuan tentang estimasi model dan kadar endapan nikel laterit serta tingkat variabilitas geologi yang dihasilkan dari variasi konfigurasi dan jarak spasi bor dalam kaitannya dengan penentuan tingkat keyakinan estimasi yang direpresentasikan oleh klasifikasi sumber daya mineral pada area penelitian. Pengetahuan ini dapat digunakan sebagai referensi untuk studi-studi selanjutnya dalam bidang estimasi dan klasifikasi sumber daya mineral endapan nikel laterit.

c) Manfaat bagi masyarakat

Penelitian ini memberikan pertimbangan dalam perencanaan kegiatan eksplorasi yang lebih efisien pada area pengembangan (*development site*) ataupun area eksplorasi baru (*virgin area*) sehingga berpotensi pada peningkatan kegiatan eksplorasi dan diharapkan dapat menciptakan lapangan pekerjaan baru serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat setempat.

Dengan manfaat-manfaat tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi positif dalam kegiatan eksplorasi endapan nikel laterit, menambah khasanah ilmu pengetahuan endapan nikel laterit, serta meningkatkan kesejahteraan masyarakat lokal.

1.5. Ruang Lingkup Penelitian

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh dari variasi konfigurasi dan jarak spasi bor dalam penentuan kelas sumber daya mineral melalui pendekatan geostatistik di lapangan Ofionik, Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara.

Dalam penelitian ini dilakukan pemodelan geologi dan estimasi kadar nikel pada endapan nikel laterit. Data penelitian diperoleh dari hasil kegiatan eksplorasi yang memuat data topografi, nilai densitas basah material, dan hasil pengeboran meliputi data *assay* (geokimia sampel), *collar* bor, sebagian hasil *logging* dan foto sampel batuan inti (*core*) yang dilakukan oleh perusahaan tambang. Sampel diperoleh dari hasil pengeboran menggunakan mesin Jacro 200 *triple tube* dengan ukuran *core barrel* HQ-3. Analisis geokimia sampel dilakukan dengan metode *X-ray Fluorescence* (XRF). Jumlah data bor dalam penelitian terbatas pada ketersediaan data spasi bor rapat dengan jarak spasi bor terdekat adalah 25m x 25m regular dan 50m x 50m regular yang kemudian digunakan sebagai dasar dalam melakukan simulasi variasi jarak spasi bor dalam pemodelan dan estimasi kadar nikel dengan menggunakan metode *ordinary kriging*.

Endapan nikel laterit umumnya menunjukkan sifat eratik sehingga analisis variabilitas geologi dan tingkat ketidakpastian estimasi (*uncertainty*) dilakukan terhadap perubahan kuantitas dan kadar estimasi beserta parameter geostatistik pada setiap variasi konfigurasi dan jarak spasi bor dan dibandingkan dengan jarak spasi bor terdekat yang tersedia. Data hasil kegiatan penambangan pada lokasi penelitian tidak tersedia untuk digunakan dalam penelitian sehingga tidak dilakukan analisis lebih lanjut terhadap perbandingan hasil estimasi sumber daya dengan hasil penambangan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Geologi Regional

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 (4) 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, TukangBesi, dan Buton (Muboroto *et al.*, 1994 ; Kadarusman *et al.*, 2004 ; Ilyas *et al.*, 2016).

Lokasi penelitian terletak pada *East Sulawesi Ophiolite Belt* di mana batuan ultramafik berumur Kapur tersingkap di permukaan karena adanya proses subduksi pada Miosen (Golightly, 1979 ; Suratman, 2000 ; Ilyas *et al.*, 2016). Secara administratif, lokasi penelitian terletak di Kecamatan Langgikima, Kabupaten Konawe Utara, Provinsi Sulawesi Tenggara. Kondisi geologi regional area penelitian dijelaskan dalam Peta Geologi Regional Lembar Lasusua – Kendari Sulawesi skala 1 : 250.000 oleh Rusmana dkk., 1993.

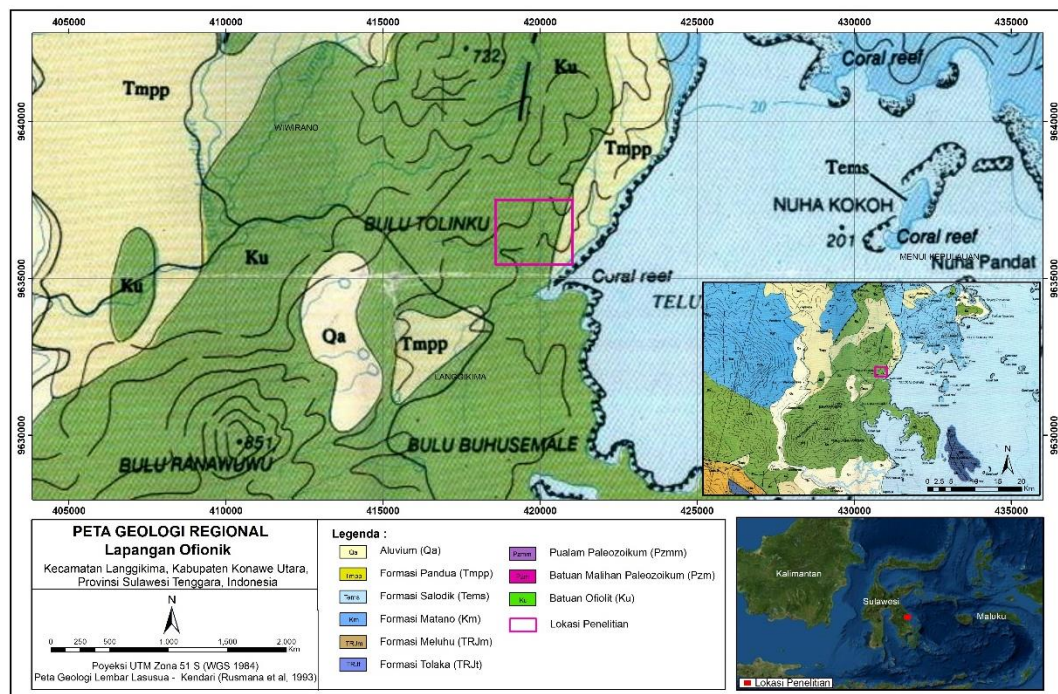
2.1.1. Geomorfologi dan Struktur Geologi

Konawe Utara termasuk dalam bagian dari *East Sulawesi Ophiolite* (ESO) yang memanjang dari Teluk Gorontalo, melewati lengan barat dan tengah mengarah ke lengan tenggara Sulawesi dan Pulau Buton. Secara umum, morfologi area Konawe Utara terdiri atas pegunungan, perbukitan, pedataran, dan morfologi *karst*. Geomorfologi dan sebaran formasi batuan area dikontrol oleh perkembangan struktur geologi yang intensif seperti Sesar Lasolo yang memanjang dengan

orientasi barat laut – tenggara (Rusmana dkk., 1993). Struktur geologi area secara umum didominasi oleh sesar naik, sesar turun, dan sesar geser.

2.1.2. Stratigrafi

Area penelitian terdapat pada Peta Geologi Lembar Lasusua – Kendari Sulawesi skala 1:250.000 yang dikeluarkan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (1993) sebagaimana ditampilkan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Peta geologi regional area penelitian (Rusmana *et al*, 1993).

Secara umum bahwa stratigrafi Konawe Utara terdiri atas sembilan (9) formasi batuan sebagai berikut (penjelasan dari formasi batuan tertua hingga termuda) :

- Batuan Ofiolit (Ku), tersusun atas peridotit, harzburgit, dunit, gabro, dan serpentinit.
- Batuan Malihan Paleozoikum (Pzm), tersusun atas sekis, *gneiss*, filit, kuarsit, batusabak, dan sedikit marmer.
- Pualam Paleozoikum (Pzmm), tersusun atas marmer dan batugamping berfoliasi.
- Formasi Tolaka (TRJt), tersusun atas kalsilutit, batugamping, batupasir, serpih, napal, dan batusabak.

- e. Formasi Meluhu (TRJm), tersusun atas batupasir, kuarsit, serpih hitam, serpih merah, filit, batusabak, batugamping, dan batulanau.
- f. Formasi Matano (Km), tersusun atas kalsilutit bersisipan serpih dan rijang.
- g. Formasi Salodik (Tems), tersusun atas kalsilutit, batugamping oolit.
- h. Formasi Pandua (Tmpp), tersusun atas konglomerat, batupasir, dan batulempung.
- i. Aluvium (Qa), tersusun atas kerikil, kerakal, pasir, dan lempung

2.2. Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit merupakan endapan mineral yang terbentuk sebagai hasil proses pelapukan batuan ultramafik yang tersingkap ke permukaan dan mengalami proses pengayaan supergen dimana karakteristik dari endapan yang meliputi distribusi kadar unsur, mineralogi, dan geometrinya sangat dipengaruhi oleh faktor – faktor pembentukan endapan. Berikut merupakan penjelasan terkait dengan proses pembentukan dan pengelompokan endapan nikel laterit.

2.2.1. Genesis dan Profil Endapan Nikel Laterit

Rangkaian proses pelapukan dan pengayaan supergen yang terjadi pada batuan ultramafik dengan kandungan Mg yang tinggi serta memiliki kandungan Ni sekitar 0,2 – 0,4% dapat menghasilkan endapan nikel laterit (Golightly, 1981). Proses pembentukan endapan nikel laterit meliputi proses fisika dan kimia yang melibatkan penguraian mineral primer, pelindian unsur *mobile* yang diikuti dengan proses akumulasi unsur *immobile* sehingga terjadi pengayaan unsur tertentu, serta pembentukan mineral baru yang lebih stabil terhadap proses pelapukan.

Pada batuan ultramafik yang menjadi batuan asal pembentukan endapan nikel laterit seperti dunit, harzburgit, dan peridotit dalam kompleks ofiolit (Brand *et al.*, 1998), proses pelapukan yang semakin intensif akan menghasilkan profil vertikal yang jika ditinjau dari permukaan ke bagian bawah endapan menunjukkan kecenderungan kandungan magnesium yang rendah dan kandungan besi yang relatif tinggi (Elias *et al.*, 1981). Proses penyingkapan, pelapukan, pelindian, dan pengayaan unsur yang terjadi pada batuan ultramafik akan menampilkan pembagian lapisan material endapan nikel laterit dengan karakteristik fisik dan

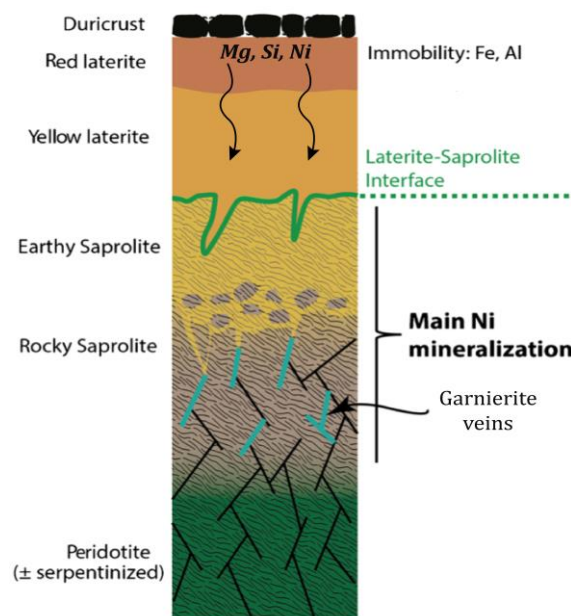
kimia yang khas secara vertikal dari permukaan hingga ke dasar endapan. Profil vertikal tersebut umumnya disebut sebagai profil laterit yang terdiri atas pengelompokan material sebagai berikut :

1. Batuan dasar (*bedrock*), merupakan zona batuan asal endapan nikel laterit yang berupa batuan ultramafik. Zona ini direpresentasikan sebagai zona batuan segar yang belum terlapukan serta seringkali diidentifikasi sebagai zona tanpa kandungan nikel yang ekonomis.
2. *Rocky saprolite* atau *saprock*, merupakan lapisan yang terhampar di atas batuan dasar (*bedrock*) dengan intensitas pelapukan yang rendah yang umumnya terjadi pada zona lemah batuan dasar yang berupa rekahan – rekahan. Zona ini dicirikan dengan keterdapatan masa batuan dasar dan mineral asal yang melimpah di dalam tubuh material hasil pelapukan.
3. Saprolit, merupakan lapisan yang terbentuk sebagai hasil proses pelapukan dengan intensitas yang semakin meningkat sehingga menampilkan jumlah masa batuan asal dalam material hasil pelapukan yang semakin menurun berupa *boulder* atau bongkah batuan asal yang terpisah dan nampak “mengambang” yang tersusun atas *primary minerals* dan mineral hasil pelapukan (Elias, 2002). Saprolit umumnya terlampar di atas lapisan *rocky saprolite* dan umumnya tersusun oleh serpentin atau *hydrous magnesium silicates*, $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ dengan nikel menggantikan Mg dan membentuk garnierit $(\text{Mg},\text{Ni})_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$.
4. Zona transisi, merupakan zona yang menunjukkan peralihan antara lapisan saprolit di bagian bawah dan lapisan limonit di bagian atas profil vertikal laterit. Zona transisi memiliki kandungan garnierit yang cukup tinggi serta keterdapatan lempung seperti *nontronite*.
5. Limonit, merupakan lapisan yang terlampar di atas zona transisi yang merepresentasikan proses pelapukan yang intensif, pelindian unsur magnesium dan silika, serta akumulasi unsur besi. Intensitas pelapukan yang tinggi pada zona limonit menyebabkan hilangnya struktur batuan asal. Zona limonit terbagi atas dua bagian yaitu limonit merah di bagian atas profil dengan kandungan besi yang tinggi dan magnesium yang rendah, serta limonit kuning yang terletak di bagian bawah profil yang dicirikan

dengan peningkatan kandungan aluminosilikat, lempung, *nontronite*, dan limonit (FeOOH) (Kyle, 2010).

6. *Ferricrete*, merupakan lapisan paling atas dari endapan nikel laterit dan seringkali dianggap sebagai lapisan *overburden*. Zona ini berupa lapisan kerak dengan kandungan besi yang tinggi serta tidak memiliki kandungan nikel dan kobalt yang rendah dan tidak ekonomis.

Profil vertikal endapan nikel laterit secara utuh dari permukaan ke bawah endapan (menuju batuan dasar) serta proses pelindian dan pengayaan unsur yang terjadi dalam proses laterisasi ditampilkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Skema profil vertikal endapan nikel laterit, pelindian dan pengayaan unsur dalam proses laterisasi (dimodifikasi dari Pelletier, 2003; Ulrich, 2010; Myagkiy *et al.*, 2019).

Beberapa faktor utama yang terlibat dalam proses pembentukan endapan nikel laterit menurut Elias (2002) adalah sebagai berikut :

1. Iklim, meliputi intensitas curah hujan dan suhu rata – rata tanah. Intensitas dari proses pelindian yang terjadi pada batuan ultramafik ditentukan oleh intensitas curah hujan yang mempengaruhi volume air yang masuk (terinfiltrasi) ke zona lemah batuan ataupun tanah serta volume air yang mengalami *run off*, sementara itu tingginya suhu rata – rata tanah turut mempengaruhi peningkatan kecepatan proses pelapukan yang terjadi (Butt and Zeegers, 1992).

2. Topografi, pola permukaan bentang alam atau bentang lahan seperti relief dan kelerengan akan mempengaruhi pengaliran air seperti intensitas air yang terinfiltrasi ataupun mengalami *run off* serta tingginya muka air tanah di suatu area.
3. Drainase atau pengaliran air, faktor ini mempengaruhi kuantitas air yang masuk ke dalam zona lemah yang akan terlibat dalam proses pelindian.
4. Tektonik, berperan sebagai pengubah bentang alam dan topografi yang meliputi peningkatan erosi pada permukaan bentang alam, perubahan kelerengan morfologi, dan penurunan muka air tanah sebagai hasil pengangkatan tektonik, sementara itu pada area dengan tektonik yang lebih stabil akan menghasilkan morfologi yang relatif datar sehingga pergerakan air tanah akan menjadi lebih lambat.
5. Batuan asal, batuan asal berperan sebagai faktor pembentukan endapan nikel laterit karena berkaitan dengan kandungan mineral dari batuan. Mineral – mineral penyusun batuan akan menentukan resistensi mineral terhadap proses pelapukan, serta menjadi penentu ketersediaan komponen unsur dalam pengayaan unsur dan pembentukan mineral baru.
6. Struktur geologi, berperan sebagai zona lemah atau zona tidak menerus (*discontinue*) pada batuan sehingga akan meningkatkan permeabilitas batuan dan menjadi jalan atau ruang masuknya air sebagai agen pelapukan dan pelindian. Zona lemah ini dapat berupa patahan maupun rekahan pada batuan.

2.2.2. Pengelompokan Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan mineral dominan (Elias, 2002), sebagaimana di tampilkan oleh Gambar 2.3 yang meliputi :

1. Laterit Oksida

Proses hidrolisis yang menyebabkan penguraian mineral utama penyusun batuan seperti olivin, serpentin, ortopiroksen dan klinopiroksen terjadi akibat kehadiran air. Olivin sebagai mineral yang tidak stabil akan mengalami proses pelapukan. Pada lingkungan tropis, proses pelindian akan terjadi secara intensif pada unsur magnesium dan silika, sementara Fe^{2+} akan

mengalami proses oksidasi dan presipitasi menjadi *ferric hydroxide* yang pada awalnya bersifat *amorf* atau *poorly cristaline* namun secara progresif akan berubah menjadi goetit. Proses hidrolisis pada ortopiroksen dan serpentin akan melepaskan unsur magnesium dan silika yang selanjutnya akan tergantikan oleh *pseudomorf* goetit. Proses pelindian Mg yang menyebabkan penurunan kandungan Mg dan akumulasi Fe yang menyebabkan penurunan kandungan Fe dari atas (permukaan) ke bawah endapan akan memberikan kenampakan karakteristik profil geokimia secara jelas pada susunan vertikal endapan nikel laterit.

Perubahan secara bertahap terjadi pada zona limonit dimana goetit yang berwarna kuning hingga coklat akan berubah menjadi hematit yang umumnya berwarna merah hingga coklat dan memunculkan penamaan “limonit kuning” pada bagian limonit yang lebih bawah, sementara pada bagian limonit atas menjadi “limonit merah”. Kehilangan unsur nikel terjadi dalam proses perubahan goetit menjadi hematit dimana hematit tidak dapat menampung unsur nikel yang sebelumnya terdapat pada kisi goetit. *Ferricrete* yang merupakan lapisan kerak yang kaya akan besi dapat terbentuk pada bagian paling atas dari zona limonit. Beberapa contoh tipe endapan nikel laterit oksida di dunia yaitu Moa Bay dan Pinares di Cuba (Linchenat and Shirokova, 1964), Goro dan Prony di New Caledonia bagian selatan (Golightly, 1981).

2. Laterit Lempung

Laterit lempung dicirikan dengan kandungan lempung smektit yang melimpah dan dominan di lapisan atas profil endapan. Silika umumnya tidak mengalami pencucian pada kondisi lingkungan iklim yang lebih dingin dan kering dibandingkan dengan kondisi iklim tropis. Laterit lempung umumnya terbentuk pada area dengan keterbatasan gerakan air tanah dengan relief topografi yang rendah sehingga oksida besi akan tergantikan dan didominasi oleh lempung smektit *nontronite* dengan kandungan nikel umumnya berkisar antara 1,0 – 1,5% Ni.

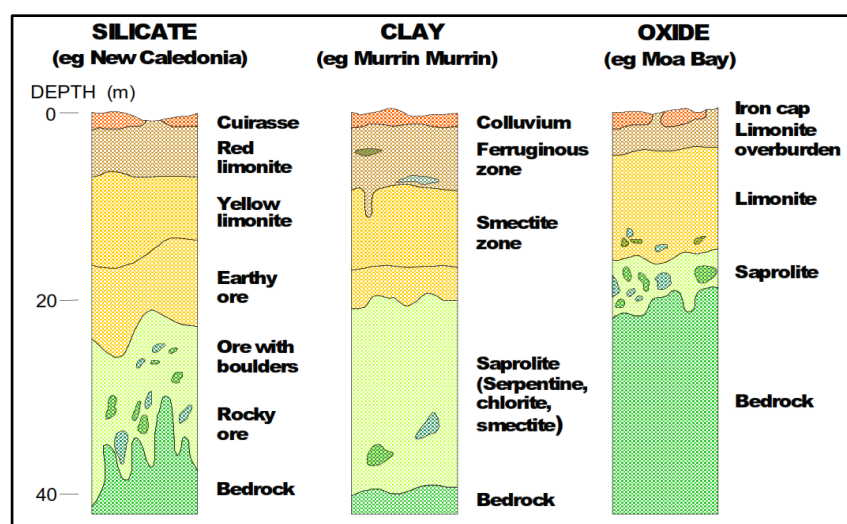
Secara vertikal, endapan ini dapat ditutupi oleh lapisan tipis kaya oksida besi dengan kandungan nikel yang rendah, sementara zona saprolit yang

memiliki kandungan serpentinit dan *nontronite* terletak di bagian bawah dari profil endapan. Contoh endapan laterit lempung adalah Murrin Murrin di Australia.

3. Laterit Silikat

Laterit silikat dapat terbentuk sebagai hasil dari proses pengangkatan tektonik yang perlahan dan menerus sehingga mengakibatkan muka air tanah yang stabil dan rendah dan memungkinkan proses pelapukan yang terjadi dalam periode waktu yang lama dan membentuk lapisan saprolit yang tebal dengan lapisan limonit tipis yang dipengaruhi oleh proses dan intensitas erosi permukaan (Golightly, 1981).

Laterit silikat merupakan endapan laterit yang dicirikan dengan pengayaan unsur Ni sebagai hasil alterasi *primary minerals* yang menghasilkan *serpentine* dan *neoformed goethite*, lempung smektit, dan garnierit pada lapisan saprolit. Proses rekristalisasi goetit menjadi hematit menyebabkan pelepasan unsur Ni. Presipitasi nikel terjadi pada zona saprolit dengan menggantikan magnesium dalam *secondary serpentine* (yang dapat mengandung 5% Ni) dan dalam garnierit yang dapat memiliki kadar lebih dari 20% Ni (Pelletier, 1996). Kandungan unsur nikel dalam laterit silikat dapat mencapai rata – rata 2,0 hingga 3,0% Ni. Salah satu contoh endapan nikel laterit silikat dengan sumber daya nikel laterit yang besar di dunia adalah pada endapan nikel laterit di New Caledonia (Golightly, 1981).



Gambar 2.3. Profil vertikal endapan laterit silikat, lempung, dan oksida (Elias, 2002).

2.3. Analisis Statistik

Statistika adalah ilmu yang mempelajari tentang tata cara pengumpulan, penyajian, dan analisis terhadap data numerik (Al-Hemyari, 2018). Pengolahan data statistik tidak terlepas dari skala pengukuran numerik yang terdiri atas :

1. Skala nominal, skala yang diterapkan ketika menggunakan angka hanya untuk mengkategorikan objek namun tidak menggambarkan kedudukan objek tersebut.
2. Skala ordinal, skala yang diterapkan terhadap objek di mana angka atau nilai yang diterapkan menggambarkan kedudukan objek seperti dari tingkat terendah ke tertinggi atau sebaliknya.
3. Skala interval, skala yang diterapkan terhadap objek di mana angka atau nilai yang diterapkan menggambarkan suatu interval antar objek dengan jarak yang tidak sama serta tidak memiliki nilai nol mutlak.
4. Skala rasio, skala yang diterapkan terhadap objek di mana angka atau nilai yang diterapkan menggambarkan suatu interval antar objek dengan jarak yang sama dan mempunyai nilai nol absolut.

Analisis statistik terbagi ke dalam dua bagian, yaitu :

1. Ukuran Pemusatan Data (*Central Tendency*), menggambarkan pengelompokan nilai – nilai dalam kumpulan data. Parameter ukuran pemusatan data terdiri atas:
 - a. Rata – rata (*mean*): penjumlahan dari seluruh nilai dalam set data dibagi dengan jumlah data. *Mean* dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$m = \frac{\sum xi}{n} \quad (1)$$

Di mana:

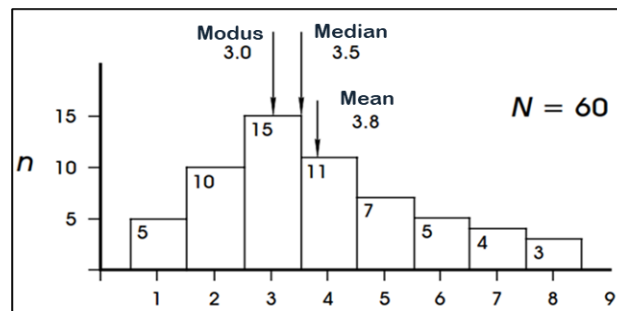
xi = nilai variabel x

n = jumlah data

- b. *Median*: Nilai tengah dari suatu set data / angka yang disusun urut dari nilai terkecil ke terbesar atau sebaliknya. Nilai *median* membagi suatu set data menjadi dua (2) bagian yang sama yaitu 50% data nilainya lebih tinggi dari *median* sedangkan 50% data lainnya nilainya lebih rendah dari

median. Nilai *median* menjadi penaksir pemusatan data yang lebih stabil dari pada rata – rata karena nilai median tidak terpengaruh oleh nilai ekstrim besar maupun kecil.

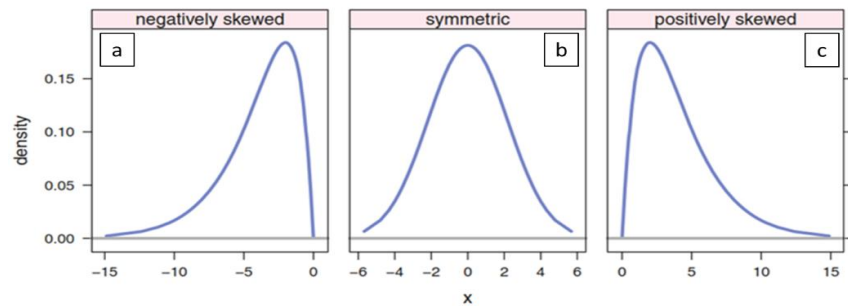
- c. Modus: Nilai yang memiliki frekuensi terbesar atau nilai yang paling sering muncul dan umumnya dicirikan sebagai nilai dengan puncak frekuensi tertinggi dalam histogram. Kedudukan modus, *mean* dan *median* dalam histogram ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Kedudukan *mean*, modus, *median* pada histogram data (Sinclair and Blackwell, 2004).

- d. *Skewness*: Ukuran kemiringan atau kecondongan distribusi data. Dalam distribusi unimodal akan memiliki satu titik yang lebih tinggi dibandingkan dengan titik lainnya sehingga data dapat terdistribusi simetris ataupun asimetris (dicirikan oleh adanya puncak grafik di salah satu sisi dan pola melandai pada sisi lainnya) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5. Pada data yang simetris, nilai *mean* akan berimpit dengan *median* sehingga puncak grafik umumnya berada di tengah dan distribusi data (pola kurva) di sisi kanan dan kiri adalah seragam / sama. Distribusi data asimetris terdiri atas dua (2) yaitu:

- Skewness* positif di mana nilai rata – ratanya melebihi nilai *median* yang dicirikan oleh adanya puncak grafik di sisi kiri kurva (pada nilai data yang kecil) dengan distribusi kurva yang melandai pada sisi kanan (pada nilai data yang besar).
- Skewness* negatif di mana nilai mediannya lebih tinggi dari pada nilai *mean* yang dicirikan oleh puncak grafik pada sisi kanan (pada nilai data besar) dengan distribusi kurva yang melandai pada sisi kiri (pada nilai data kecil).



Gambar 2.5. Distribusi data (a) *skewness* negatif, (b) simetris, (c) positif (Heiberger and Holland, 2009).

- e. Kurtosis: ukuran yang menunjukkan kecenderungan keruncingan distribusi dari data.
2. Ukuran Penyebaran Data (variabilitas data), merepresentasikan ukuran penyebaran atau dispersi data. Terdapat beberapa parameter dalam pengukuran sebaran data sebagai berikut :

- a. Jangkauan (*range*), merupakan selisih dari nilai tertinggi dan terendah dalam suatu set data. *Range* umumnya kurang sesuai dalam mendefinisikan dispersi suatu data set karena *range* sangat dipengaruhi oleh kehadiran nilai ekstrim dalam set data (Sinclair and Blackwell, 2004).
- b. *Variance* (s^2), merupakan ukuran dispersi suatu data terhadap nilai rata – rata. *Variance* merupakan selisih rata – rata kuadrat dari set data yang dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut:

$$s^2 = \frac{\sum (x_i - m)^2}{(n-1)} \quad (2)$$

Di mana :

- x_i = nilai data
 m = nilai rata – rata data
 n = jumlah data

- c. Simpangan Baku (*Standard Deviation*), merupakan ukuran sebaran atau dispersi data yang dinyatakan sebagai akar kuadrat dari *variance*. Berbeda dengan *variance*, simpangan baku mengukur dispersi data dengan satuan yang sama dengan set data dan bukan merupakan kuadrat dari dispersi data. Simpangan baku sampel dinyatakan dalam

persamaan matematis $s = \sqrt{s^2}$, sementara simpangan baku populasi dinyatakan dalam lambang σ .

- d. Koefisien Varians (*Coefficient of Variation* atau CV), merupakan ukuran relatif sebaran data. CV dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$CV = \frac{s}{m} \quad (3)$$

Di mana :

s = simpangan baku

m = nilai rata – rata data

Nilai CV dapat merepresentasikan ukuran distribusi normal data di mana nilai CV kurang dari 0,5 umumnya merepresentasikan sebaran distribusi data normal, sedangkan nilai CV lebih dari 0,5 dapat merepresentasikan distribusi data yang menceng (Sinclair and Blackwell, 2004). Nilai *Coefficient of variation* dapat digunakan dalam mengindikasikan keberadaan nilai data pencilan (*outlier*). Jika nilai *Coefficient of variation* $\geq 1,5$ maka data tersebut dianggap memiliki pencilan dan jika nilai *Coefficient of variation* $\leq 1,5$ maka data dianggap tidak memiliki pencilan (Sianturi dkk, 2020).

2.4. Analisis Geostatistik

Geostatistik merupakan salah satu metode yang cukup umum dan banyak digunakan dalam proses estimasi sumber daya mineral dan batubara (Ramadhan *et al.*, 2021). Penerapan geostatistik memberikan kemungkinan untuk menganalisis dan mengukur korelasi spasial antar data sampel dalam konsep variabel teregional. Variabel teregional merepresentasikan kondisi dimana suatu sampel memiliki hubungan keruangan dengan sampel lainnya yaitu ketika sampel – sampel yang terletak berdekatan memiliki nilai yang mirip namun tidak identik sementara semakin jauh posisi sampel maka keterhubungan antar sampel akan semakin melemah. Salah satu contoh dari variabel teregional ini dapat ditemukan pada fenomena geologi seperti hubungan kadar unsur ataupun ketebalan dalam material geologi (Matheron, 1963). Analisis terhadap hubungan keruangan atau korelasi spasial antar data sampel dapat dilakukan dengan menggunakan variogram.

2.4.1. Variogram dan Semivariogram

Variogram ($2\gamma(h)$) merupakan salah satu alat (*tools*) geostatistik yang memungkinkan untuk menganalisis hubungan spasial antar data tereregional yang ditampilkan sebagai grafik variansi terhadap jarak (*lag*). Sementara semivariogram ($\gamma(h)$) adalah ukuran setengah kuantitas dari variogram (Cressie, 1993). Algoritma variogram didefinisikan sebagai perbedaan rata-rata antar dua titik contoh pada jarak tertentu, dimana semakin dekat jarak antar data maka penaksiran dari data sampel akan cenderung semakin mirip dibandingkan dengan data dengan jarak sampel yang lebih jauh. Perhitungan dari variogram ($2\gamma(h)$) ditampilkan dengan persamaan berikut :

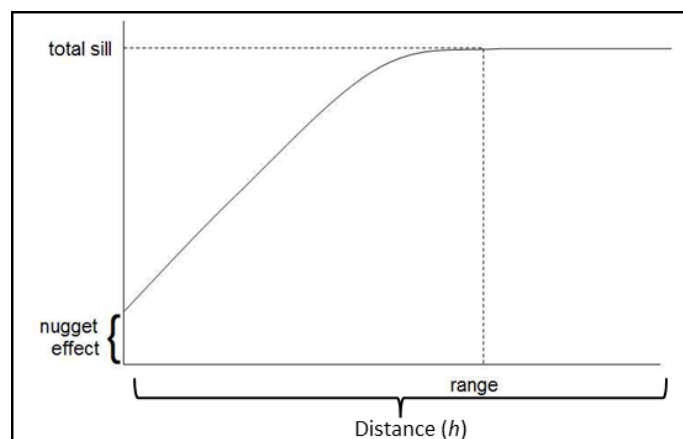
$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2\} \quad (4)$$

Di mana :

$Z(x_i)$ = nilai dari variable tereregional pada lokasi x_i

$Z(x_i + h)$ = nilai variabel tereregional lain pada jarak dan arah tertentu (h) dari titik sebelumnya.

Komponen utama penyusun variogram terdiri atas *nugget effect* atau *nugget*, *total sill*, dan *range* terhadap separasi jarak data tertentu (*lag*) (Coombes, 2008) sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Komponen utama variogram (Coombes, 2008).

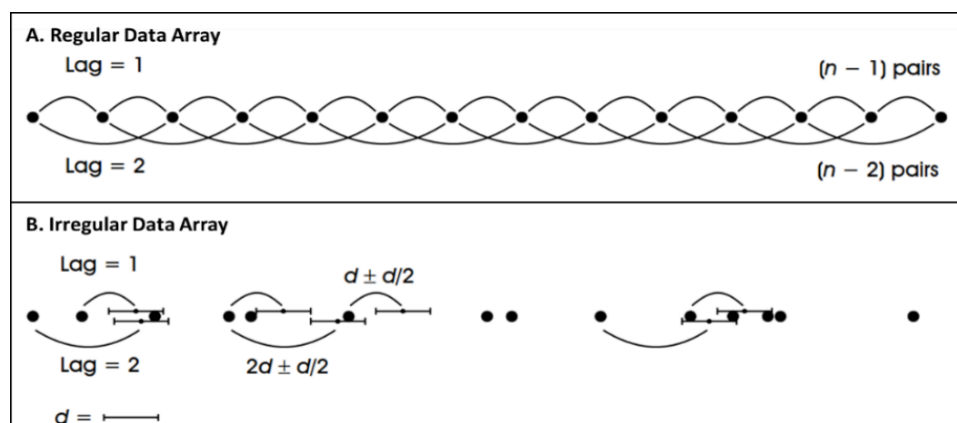
1. *Nugget Effect* (C_0), merupakan perbedaan yang khas antar data sampel yang saling berdekatan dan memberikan representasi komponen acak dari suatu data. Nilai *nugget* diidentifikasi pada perpotongan nilai *gamma* yang

bertemu dengan struktur variogram pada *lag* data “0” (Sinclair and Blackwell, 2004).

2. *Sill*, merepresentasikan perbedaan nilai sampel yang semakin meningkat hingga mencapai kondisi dimana tidak terdapat korelasi antar data sampel seiring dengan peningkatan separasi atau jarak antar data tertentu. Nilai *sill* teridentifikasi ketika nilai *gamma* sama dengan nilai varians populasi dari data.
3. *Range*, merepresentasikan jarak antar sampel yang menunjukkan adanya korelasi spasial antar data sampel hingga jarak terjauh dimana data sampel tidak menunjukkan korelasi spasial. Nilai *range* diidentifikasi dari jarak sampel yang ditunjukkan oleh struktur semivariogram yang telah mencapai total *sill*.

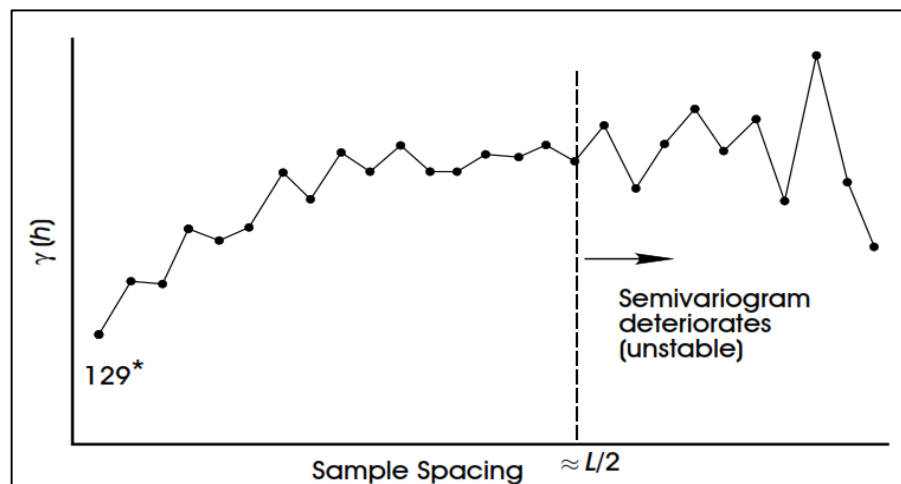
2.4.2. Variogram / Semivariogram Eksperimental

Variogram eksperimental menampilkan korelasi spasial dari distribusi variabel tereregional yang dipisahkan oleh jarak tertentu dimana nilai dan ukuran korelasi antar data didapatkan dari pengukuran data sampel lapangan. Struktur dari variogram eksperimental didapatkan melalui pencarian pasangan data (*paired sample*) berdasarkan pemisahan jarak data atau *lag* (h) tertentu. Pembangunan eksperimental variogram dapat dilakukan pada susunan data dengan separasi teratur (*regular*) dan separasi data tidak seragam (*irregular*) sebagaimana ditampilkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Skema perhitungan variogram eksperimental dari pencarian pasangan data (Sinclair and Blackwell, 2004).

Semivariogram eksperimental secara umum menampilkan kenampakan pola bergerigi (*sawtooth*) berdasarkan penggunaan jumlah data yang kemudian di-*plotting* dalam bentuk grafik yang menampilkan hubungan antara separasi data sampel berpasangan (h) dengan variogram yang dinotasikan dengan $\gamma(h)$. *Plotting* hubungan korelasi spasial data sampel dalam variogram eksperimental ditampilkan oleh Gambar 2.8. Variogram eksperimental umumnya menunjukkan fluktuasi yang semakin besar seiring dengan peningkatan jarak atau separasi antar data sampel (*lag*).

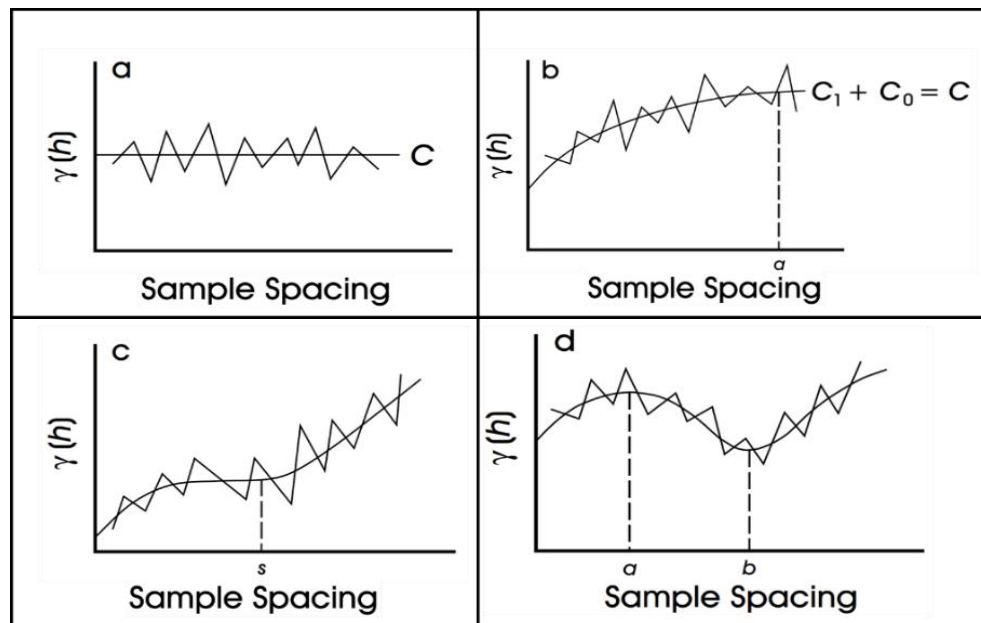


Gambar 2.8. Skema semivariogram eksperimental berdasarkan jarak *lag* (Sinclair and Blackwell, 2004).

Pola atau struktur bergerigi (*sawtooth*) dari semivariogram eksperimental sangat dipengaruhi oleh jumlah data yang digunakan, dimana ketika jumlah data yang digunakan banyak atau melimpah maka secara umum semivariogram eksperimental akan menunjukkan pola / struktur yang lebih stabil dan menerus dengan fluktuasi variogram yang lebih rendah dibandingkan dengan variogram eksperimental yang terbentuk dari jumlah data yang lebih sedikit.

Hubungan antar data sampel dalam semivariogram dapat digunakan untuk mengidentifikasi stasioneritas data sampel pada jarak sampel tertentu seperti keterdapatan dari stasioneritas lokal data. Pola struktur semivariogram secara umum terdiri atas struktur bergerigi (*sawtooth*) yang menunjukkan fluktuasi nilai variogram pada jarak *lag* dan pola kurva (*smooth curve*) yang menampilkan kenampakan variogram dengan distribusi *plotting* parabolik yang semakin

meningkat seiring dengan peningkatan jarak antar data sampel sebagaimana ditampilkan oleh Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Struktur *sawtooth* dan *smooth curve* pada semivariogram eksperimental. (a) *pure nugget effect*, (b) pola semivariogram umum, (c) semivariogram eksperimental parabolik yang menampilkan stasioneritas lokal hingga jarak s , (d) *hole effect* dengan karakter siklus spasial pada distribusi sampel. (Sinclair and Blackwell, 2004).

2.4.3. Variogram Model Teoritis

Variogram model teoritis menampilkan model matematis dari variogram yang kemudian dijadikan sebagai referensi dalam proses pemodelan atau *fitting model* variogram dengan mempertimbangkan distribusi struktur data dari variogram eksperimental. Variogram model teoritis akan memberikan nilai *nugget*, *sill*, dan *range* berdasarkan hasil *fitting model* semivariogram eksperimental dan akan digunakan sebagai dasar untuk menganalisis korelasi spasial antar data sampel berdasarkan karakteristik yang dibangun. Beberapa model variogram teoritis yang umum digunakan dalam pemodelan variogram terdiri atas :

1. Model Linear

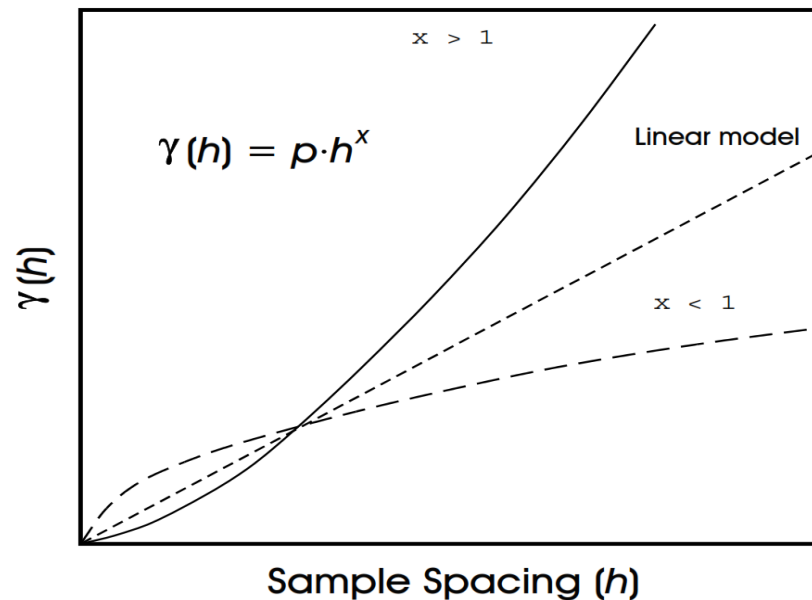
Model linear menampilkan kondisi dimana model yang ada tidak mencapai *sill*. Model linear direpresentasikan oleh persamaan matematis berikut :

$$\gamma(h) = Co + p \cdot h^x \quad (5)$$

Di mana:

- Co = *nugget effect*,
 P = konstanta (*slope* dari model linear),
 h = *lag*
 x = eksponen dari h dengan nilai $0 \leq x \leq 2$ ($x = 1$, dalam kasus kondisi linear).

Model grafik linear ditunjukkan oleh Gambar 2.10.



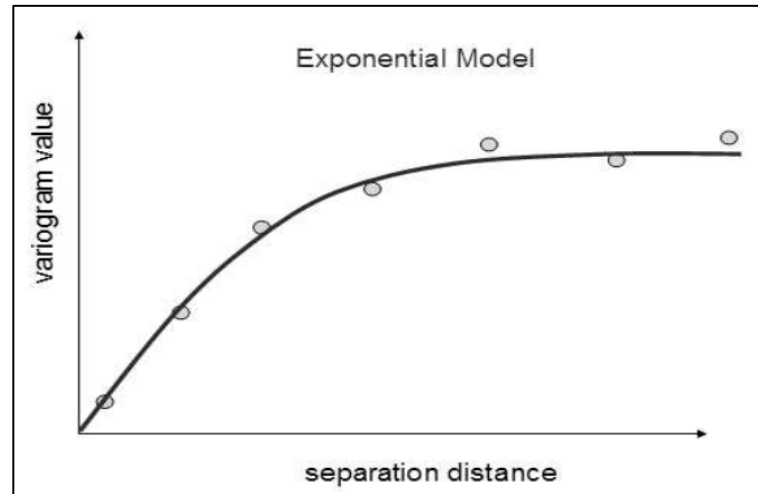
Gambar 2.10. Model konseptual umum dari power pada semivariogram, p merepresentasikan konstanta, h merepresentasikan jarak sampel (Sinclair and Blackwell, 2004).

2. Model Eksponensial

Model eksponensial menunjukkan peningkatan variogram yang signifikan (tegas) dengan pencapaian nilai *sill* secara asimtotik. Nilai efektif *sill* diperoleh pada $h = a' = 3a$. Persamaan matematis model eksponensial ditampilkan dalam persamaan :

$$\gamma(h) = Co + C[1 - \exp(-\frac{h}{a})] \quad (6)$$

Model variogram eksponensial ditunjukkan oleh Gambar 2.11.



Gambar 2.11. Model variogram eksponensial (Coombes, 2008)

3. Model *Spherical*

Model *spherical* terdiri atas dua komponen utama yaitu komponen acak berupa *nugget effect* (C_0) dan komponen struktur yang dihasilkan oleh fungsi autokorelasi berupa nilai *range* (a) sebagaimana ditampilkan oleh Gambar 2.12. Nilai *range* merepresentasikan jarak ketika terjadi peningkatan variabilitas rata – rata variable dari *nugget* (C_0) hingga mencapai nilai total *sill* (C_1). Model ini merupakan model teroris yang umum digunakan dalam analisis mineralisasi (Sinclair and Blackwell, 2004).

Persamaan matematis model *spherical* dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{untuk } h < a$$

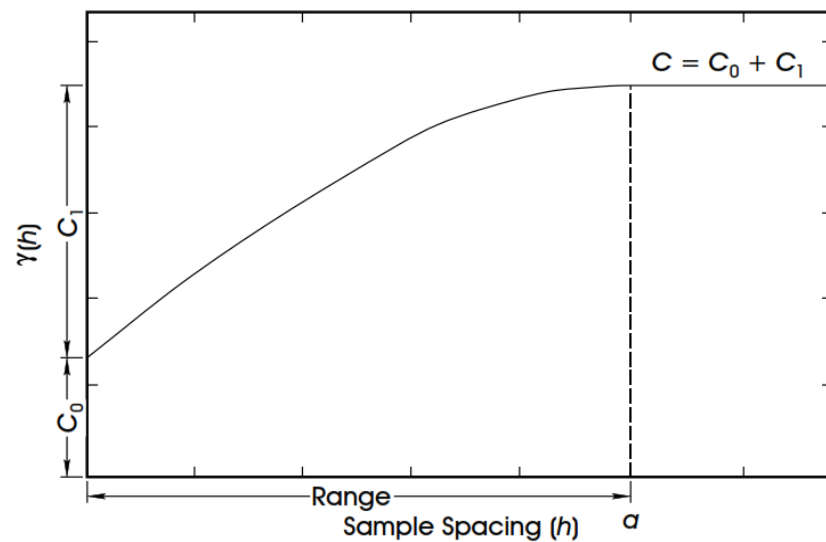
$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad \text{untuk } h > a$$

Di mana :

a = *range* variogram *spherical*

C_0 = *nugget effect*

C_1 = $\gamma(h) - C_0$



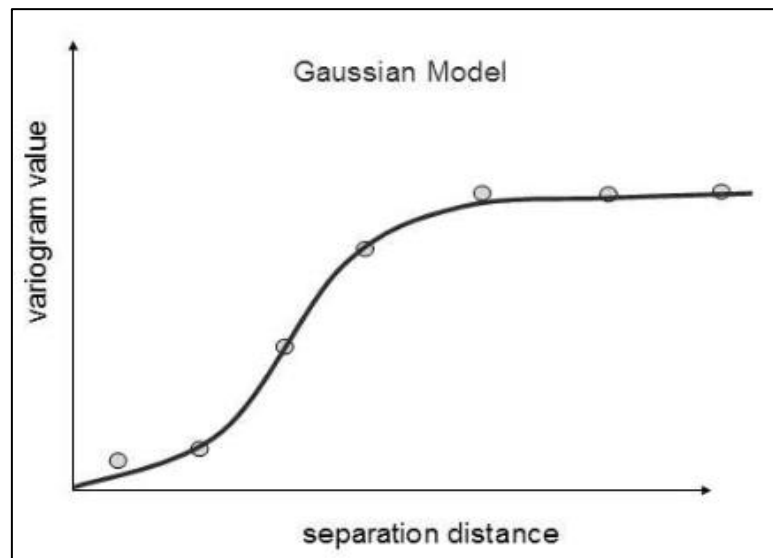
Gambar 2.12. Model variogram *spherical* (Sinclair and Blackwell, 2004)

4. Model Gaussian

Model gaussian menampilkan model semivariogram yang relatif datar ketika nilai gamma rendah (Gambar 2.13) dan semakin meningkat seiring peningkatan jarak separasi data sampel. Model gaussian memberikan nilai *sill* asimtotik dengan nilai *sill* didefinisikan oleh $h = a' = a \cdot 3^{1/2}$

Persamaan matematis model gaussian adalah sebagai berikut :

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{a^2} \right) \right] \quad (8)$$



Gambar 2.13. Skema model gaussian (Coombes, 2008)

2.5. Estimasi Sumber Daya Mineral

Estimasi sumber daya 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 sumber daya mineral dilakukan berdasarkan data hasil observasi dan *sampling* selama kegiatan eksplorasi dilakukan. Kegiatan mengestimasi sumber daya mineral menjadi dasar dalam kegiatan pertambangan, sehingga menjadi penting untuk mendapatkan hasil estimasi yang akurat dan mencegah adanya ekspektasi finansial yang keliru (Abuntori *et al*, 2021).

2.5.1. Metode Estimasi Sumber Daya Mineral

Menurut Sinclair *and* Blackwell (2004), terdapat beberapa metode klasik yang umum digunakan mengestimasi sumber daya mineral suatu area yaitu metode penampang, metode poligonal, metode triangular, *regular grid*, *inverse distance weighting*, dan metode kontur. Selain metode klasik tersebut, terdapat suatu metode umum yang digunakan dalam estimasi sumber daya mineral di mana estimasi dilakukan dengan mempertimbangkan faktor geospasial dan variabilitas data yaitu metode estimasi geostatistik. Berikut merupakan beberapa metode umum yang digunakan dalam mengestimasi sumber daya mineral suatu area :

1. Metode Poligonal

Metode poligonal umumnya digunakan pada tipe endapan bijih dengan geometri *simple – moderate* dan variabilitas kadar yang rendah (Abuntori, *et al*, 2021). Dalam metode poligonal, nilai rata – rata kadar sampel dimasukan pada area di sekitar pengaruh lubang bor sebagai hasil estimasi.

2. Metode Penampang (*Section Method*)

Metode ini umumnya digunakan pada endapan yang memiliki batas kontak yang tegas dan relatif *smooth* seperti pada endapan tabular atau berlapis. Interpolasi kadar dan model geologi dibangun berdasarkan sayatan pada setiap penampang (atau *plan view*) dan interpretasi pada setiap penampang diproyeksikan pada penampang lainnya yang bersebelahan (Sinclair *and*

Blackwell, 2004). Area pengaruh digunakan untuk mengestimasi kadar antar data sampel.

3. *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Metode *Inverse Distance Weighting* merupakan metode estimasi dengan mempertimbangkan jarak relatif sampel terhadap titik estimasi. IDW mengasumsikan bahwa sampel dengan jarak yang lebih dekat memiliki kemungkinan yang lebih mirip dari pada sampel yang lebih jauh, sehingga dilakukan pembobotan estimasi berdasarkan fungsi terbalik terhadap jarak. Pembobotan dalam inversi jarak sampel di-*rescale* sehingga jumlahnya bernilai satu (Coombes, 2008).

4. *Kriging*

Kriging merupakan istilah umum untuk berbagai metode estimasi dengan meminimalkan kesalahan estimasi yang biasanya dilakukan dengan prosedur kuadrat terkecil (Sinclair and Blackwell, 2004). Istilah *kriging* diciptakan oleh Matheron dan Carlier yang diambil dari nama pakar geostatistik di Afrika Selatan yaitu Krige yang telah menemukan metode penaksiran cadangan untuk pertama kalinya. *Kriging* disebut sebagai “*Best Linear Unbiased Estimator* (BLUE)”. Metode *kriging* mengestimasi nilai dari suatu lokasi yang tidak tersampel berdasarkan informasi dari titik – titik sampel di sekitarnya dengan mempertimbangkan korelasi spasial data. *Estimator kriging* $\hat{Z}(u)$ dapat dituliskan sebagai berikut (Bohling, 2007) :

$$\hat{Z}(u) - m(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a [Z(ua) - m(ua)] \quad (9)$$

Di mana,

u, ua : vektor lokasi untuk estimasi dan salah satu dari data yang berdekatan, dinyatakan sebagai a

$n(u)$: banyaknya data yang berdekatan untuk estimasi $\hat{Z}(u)$.

$m(u)$: nilai ekspektasi $Z(u)$

$m(ua)$: nilai ekspektasi $Z(ua)$

$\lambda_a(u)$: faktor bobot $Z(ua)$ untuk estimasi lokasi u .

Tujuan dari metode *kriging* adalah menentukan nilai λ_a yang meminimalkan variansi (σ_e^2) pada estimator yang dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$\sigma_e^2 = \text{var} \{ \hat{Z}(u) - Z(u) \} \quad (10)$$

Terdapat beberapa metode estimasi *kriging* yaitu :

- a. *Simple Kriging* (SK), merupakan metode *kriging* sederhana di mana dalam metode ini diasumsikan bahwa rata – rata (*mean*) telah diketahui dan bernilai konstan.
- b. *Ordinary Kriging* (OK), merupakan metode *kriging* di mana dalam metode ini diasumsikan bahwa rata – rata (*mean*) tidak diketahui.
- c. *Universal Kriging*, merupakan metode estimasi *kriging* pada data dengan *trend* tertentu.

2.5.2. Ordinary Kriging

Ordinary kriging (OK) merupakan metode *kriging* sederhana di mana diasumsikan bahwa nilai rata – rata tidak diketahui dan bernilai konstan. Cressie (1993) menjelaskan bahwa *Ordinary kriging* berhubungan dengan prediksi spasial dengan dua asumsi yaitu :

1. Asumsi Model :

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

2. Asumsi Prediksi

$$\hat{Z}(u) = \sum_{a=1}^n \lambda_a Z(u_a) \quad \text{dimana} \quad \sum_{a=1}^n \lambda_a = 1 \quad (12)$$

Di mana :

$Z(u)$: peubah acak bebas

μ : ekspektasi peubah acak $Z(u)$

$\delta(u)$: nilai error pada $Z(u)$

R : bilangan *real*

n : banyaknya data sampel yang digunakan dalam estimasi

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

$$\hat{e}(u) = \hat{Z}(u) - Z(u), \text{ dengan } E(\hat{e}(u)) = 0 \quad (13)$$

sehingga diperoleh persamaan :

$$\begin{aligned}
0 &= E(\hat{Z}(u)) - E(Z(u)) \\
E(\hat{Z}(u)) &= E(Z(u)) \\
\hat{Z}(u) &= Z(u)
\end{aligned} \tag{14}$$

Berdasarkan persamaan tersebut maka terbukti bahwa $\hat{Z}(u)$ merupakan *estimator* tak bias dari $Z(u)$. *Ordinary kriging* meminimalkan rata – rata *estimator error* kuadrat dengan persamaan :

$$\begin{aligned}
E(\hat{e}(u)^2) &= \text{Var}(\hat{e}(u)) + [E(\hat{e}(u))]^2 \\
&= \text{Var}(\hat{e}(u)) + 0 \\
&= \text{Var}(\hat{e}(u))
\end{aligned} \tag{15}$$

Karena $E(\hat{e}(u)) = 0$, maka $(E(\hat{e}(u)))^2 = 0$

2.6. *Kriging Variance, Kriging Efficiency, dan Regression Slope*

Menurut Mohanlal and Stevenson (2010), beberapa parameter hasil estimasi geostatistik seperti *kriging variance*, *kriging efficiency*, dan *regression slope* dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam menilai keyakinan hasil estimasi dan penentuan klasifikasi sumber daya mineral.

Kriging variance (KV) merupakan fungsi dari model variogram dan jarak atau spasi bor yang dapat digunakan untuk mengukur kesalahan relatif hasil estimasi (Heriawan dkk., 2011). *Kriging variance* merupakan salah satu parameter geostatistik yang umum digunakan dalam penentuan strategi pengeboran optimal di berbagai deposit melalui pemahaman parameter semivariogram (Saikia and Sarkar, 2006). *Kriging variance* dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$\sigma_k^2(u) = \sum_{i=1}^n a_i \gamma(S_i, V) + \lambda - \gamma(V, V) \tag{16}$$

Di mana,

- a_i : bobot kriging,
- λ : *lagrange multiplier*
- $\gamma(S_i, V)$: semivarians rata – rata antara sampel dan blok
- $\gamma(V, V)$: semivarians rata – rata dalam blok

Kriging variance dipengaruhi oleh beberapa faktor meliputi :

- a. Karakteristik deposit yang direpresentasikan oleh semivariogram
- b. Ukuran dan bentuk dari blok yang diestimasi

- c. Jumlah sampel yang digunakan dalam estimasi blok
- d. Posisi relatif sampel terhadap sampel lainnya
- e. Teknik estimasi yang diterapkan

Menurut Silva *and* Boisvert (2014), resultan varians eror dalam estimasi *kriging* atau dikenal juga sebagai *kriging variance* bergantung hanya pada lokasi estimasi, posisi sampel dan variogram. Besarnya nilai *kriging* varians tidak dipengaruhi oleh nilai sebenarnya dari sampel yang digunakan, sehingga memungkinkan untuk dapat menentukan secara apriori dampak penempatan lubang bor serta penambahan jumlah lubang bor yang diperlukan untuk mencapai tingkat kepercayaan tertentu (Saikia *and* Sarkar, 2006).

Dalam kaitannya dengan tingkat keyakinan estimasi sumber daya mineral, *kriging variance* digunakan sebagai parameter dalam perhitungan tingkat keyakinan. Akurasi hasil estimasi ditentukan berdasarkan tingkat keyakinan dengan batas nilai 95% dan dinyatakan dengan persamaan matematis sebagai berikut :

$$\% \text{ accuracy of estimation} = \pm \frac{1.96(\sigma^2 k)^{1/2}}{\text{kriged mean}} \times 100 \quad (17)$$

Dimana :

$$\sigma^2 k = \text{Kriging Variance}$$

Nilai dari *kriging variance* dapat dikonversi menjadi *kriging standard deviation* yang digunakan dalam penentuan tingkat keyakinan hasil estimasi. Menurut Blackwell (1998), persamaan matematis *relative kriging standard deviation* (RKSD) dalam penentuan tingkat keyakinan hasil estimasi pada tingkat keyakinan 95% dinyatakan sebagai berikut:

$$(\text{RKSD}) = \pm 1,96 \left(\frac{\sigma E}{\hat{z}} \right) \quad (18)$$

Di mana :

$$\sigma E = \text{kriging standard deviation}$$

$$\hat{z} = \text{nilai estimasi kriging}$$

Kriging efficiency (KE) merupakan ukuran dari efisiensi blok estimasi. *Kriging efficiency* merepresentasikan *kriging variance* secara proporsional (*normalized*) terhadap varians blok sesungguhnya (*block variance*) yang dinyatakan dalam persen (Taghvaeenejad *et al*, 2021). *Kriging efficiency* dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$KE = \frac{BV - KV}{BV} \quad (19)$$

Di mana :

KE = *kriging efficiency*

KV = *kriging variance*

BV = *varians teoritis pada blok (block variance)*.

Regression slope (RS) merupakan kriteria berdasarkan teori asumsi bayangan linier dari nilai nyata relatif terhadap nilai perkiraan (estimasi) untuk mengevaluasi kualitas estimasi (Taghvaeenejad *et al*, 2021). *Regression slope* seringkali digunakan untuk mengukur *conditional bias* dari hasil estimasi *kriging*. Secara ideal, ketika hasil estimasi (Z^*) tepat sesuai dengan nilai aktual (Z) maka *regression slope* akan linier bernilai 1, sehingga semakin rendah nilai *regression slope* mengindikasikan adanya bias (ketidaksesuaian) antara nilai hasil estimasi dan nilai aktual. *Regression slope* dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$RS = \frac{BV - KV + |\mu|}{BV - KV + |2\mu|} \quad (20)$$

Di mana:

RS = *regression slope*

BV = *block variance*

KV = *kriging variance*

μ = *lagrange multiplier*.

2.7. Klasifikasi Sumber Daya Mineral

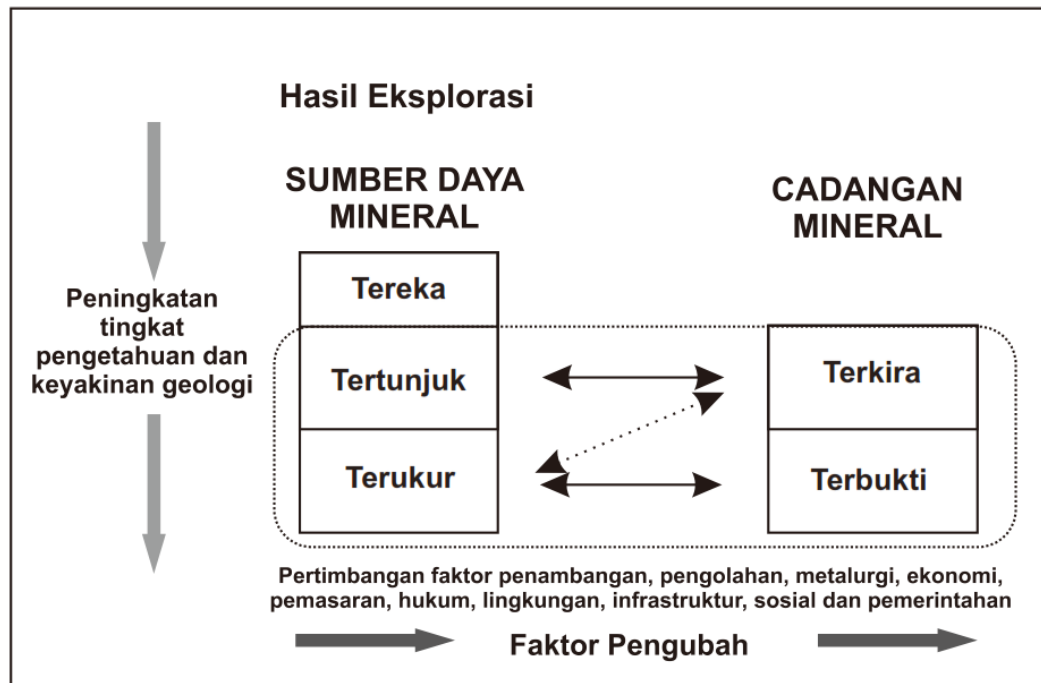
Sumber daya mineral adalah suatu konsentrasi atau keterdapatan dari material yang memiliki nilai ekonomi pada atau di atas kerak bumi, dengan bentuk, kualitas dan kuantitas tertentu yang memiliki keprospekkan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis (KCMI, 2017). Rangkaian kegiatan pertambangan mineral yang diawali dari tahapan survei tinjau, prospeksi, eksplorasi detail hingga penambangan, pengolahan dan pemurnian hingga penjualan dimaksudkan untuk dapat mengekstraksi sumber daya mineral dari dalam bumi sehingga dapat bernilai ekonomis, sehingga proses estimasi sumber daya mineral yang menjadi dasar dalam melakukan perencanaan penambangan perlu

mempertimbangkan tingkat keyakinan data dan hasil estimasi sehingga dapat meminimalkan potensi kekeliruan atau *bias* saat proses penambangan.

Tingkat keyakinan terhadap hasil estimasi sumber daya mineral sangat berkaitan erat dengan keyakinan terhadap lokasi, jumlah atau kuantitas, dan distribusi kadar serta kemenerusan geologi yang dapat diidentifikasi berdasarkan hasil analisis data eksplorasi dan estimasi. Berdasarkan tingkat keyakinan geologinya, sumber daya mineral dapat dikelompokkan menjadi :

1. Sumber daya mineral tereka, merepresentasikan tingkat keyakinan hasil estimasi yang rendah berdasarkan informasi geologi dan pengambilan sampel (*sampling*) yang terbatas sehingga ketersediaan data dapat menunjukkan adanya potensi sumber daya mineral di suatu lokasi namun belum memenuhi kriteria yang cukup untuk dapat memberikan tingkat keyakinan data dan kemenerusan geologi yang tinggi. Rendahnya tingkat keyakinan geologi dan hasil estimasi pada sumber daya mineral tereka menyebabkan kategori ini tidak dapat dikonversi menjadi cadangan mineral karena tidak memenuhi kriteria teknis untuk penambangan.
2. Sumber daya mineral tertunjuk, merepresentasikan sumber daya mineral dengan tingkat keyakinan geologi dan estimasi yang lebih tinggi dari sumber daya tereka dan memenuhi kriteria untuk dapat dikonversi menjadi cadangan mineral. Sumber daya tertunjuk memiliki kecukupan kuantitas dan distribusi data sampel yang cukup untuk analisis kuantitas, bentuk atau geometri material, kadar atau kualitas, serta karakteristik fisik dan kimia dari suatu endapan mineral. Penerapan faktor modifikasi yang memadai dapat diterapkan dalam proses konversi sumber daya tertunjuk menjadi cadangan mineral untuk mendukung perencanaan tambang dan evaluasi keekonomian.
3. Sumber daya mineral terukur, merepresentasi sumber daya mineral dengan tingkat keyakinan geologi dan hasil estimasi tertinggi dimana kuantitas, kadar, bentuk dan geometri, serta karakteristik fisik dan kimianya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang tinggi. Faktor modifikasi / faktor pengubah dalam perencanaan tambang dapat diterapkan pada sumber daya terukur untuk mendukung evaluasi dan analisis keteknikan maupun

kelayakan ekonomi sehingga dapat dikonversi menjadi cadangan mineral. Sumber daya terukur berpotensi untuk dikonversi menjadi cadangan terkira ataupun terbukti berdasarkan pertimbangan faktor pengubah penambangan. Penentuan klasifikasi sumber daya mineral dan alur proses pengkonversian ke cadangan mineral direpresentasikan oleh Gambar 2.14 :



Gambar 2.14. Hubungan tahap eksplorasi, sumber daya mineral, dan alur konversi ke cadangan mineral (KCMI, 2017).

Klasifikasi sumber daya mineral dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode dan parameter yang relevan untuk merepresentasikan tingkat keyakinan data dan hasil estimasi yang dilakukan. Penentuan klasifikasi sumber daya mineral dapat dilakukan dengan menggunakan analisis kualitas data non geostatistik dan geostatistik seperti intepetasi *logging* bor, manajemen database, QAQC (*Quality Assurance and Quality Control*), serta metode estimasi yang relevan untuk memperkirakan tingkat keyakinan dan ketidakpastian (*uncertainty*) estimasi (Mohanlal and Stevenson, 2010). Parameter geostatistik umum yang dapat digunakan sebagai pertimbangan dalam penentuan klasifikasi sumber daya adalah *kriging efficiency* (ke), *kriging variance* (kv), *regression slope* (rs). Parameter geostatistik seperti *kriging variance* (kv) dapat digunakan untuk memprediksi tingkat ketidakpastian estimasi melalui perhitungan *relative kriging standard*

deviation (RKSD). Analisis *relative kriging standard deviation* (RKSD) dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral suatu deposit dapat dilakukan melalui proses identifikasi blok mineralisasi dan kemenerusan geologi, kemenerusan mineralisasi blok yang berada di atas nilai *cut off grade* (COG), dan pengelompokan blok mineralisasi yang telah dibatasi oleh COG ke dalam 3 kelas berdasarkan kisaran nilai RKSD (Blackwell, 1998). Pengelompokan kisaran nilai RKSD oleh Blackwell (1998) dilakukan pada deposit tembaga porfiri dan emas epitermal yang meliputi :

- a) Kelas sumber daya terukur, direpresentasikan pada blok estimasi dengan nilai $RKSD \leq 0,3$.
- b) Kelas sumber daya tertunjuk, direpresentasikan pada blok estimasi dengan kisaran nilai $0,3 < RKSD \leq 0,5$.
- c) Kelas sumber daya tereka, direpresentasikan pada blok estimasi dengan nilai $RKSD > 0,5$.