

SKRIPSI

OPTIMASI VARIASI SPASI TITIK BOR ENDAPAN NIKEL LATERIT DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN GEOSTATISTIK (*ORDINARY KRIGING*) UNTUK PERHITUNGAN SUMBER DAYA

(Studi Kasus : Pit X PT Natural Persada Mandiri, Kabupaten Konawe Utara,
Provinsi Sulawesi Tenggara)

Disusun dan diajukan oleh

YUSRI MAHENDRA

D111181307



PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2023

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**OPTIMASI VARIASI SPASI TITIK BOR ENDAPAN NIKEL
LATERIT DENGAN MENGGUNAKAN PENDEKATAN
GEOSTATISTIK (*ORDINARY KRIGING*) UNTUK
PERHITUNGAN SUMBER DAYA**

(Studi Kasus : Pit X PT Natural Persada Mandiri, Kabupaten Konawe Utara,
Provinsi Sulawesi Tenggara)

Disusun dan diajukan oleh

YUSRI MAHENDRA

D111 18 1307

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

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,

Dr. Ir. Irzal Nur, M.T.

NIP.19660409 199703 1 002

Dr. Phil.nat Sri Widodo, S.T.,M.T.

NIP.19710101 201012 1 001

Wakil Dekan Bidang

Akademik dan
Kemahasiswaan,



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

NIP.19731010 199802 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Yusri Mahendra
NIM : D111181307
Program Studi : Teknik Pertambangan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Optimasi Variasi Spasi Titik Bor Endapan Nikel Laterit dengan Menggunakan Pendekatan Geostatistik (*Ordinary Kriging*) untuk Perhitungan Sumber Daya

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

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

Makassar, 19 Januari 2023

Yang menyatakan



Yusri Mahendra

ABSTRAK

Nikel laterit terbentuk sebagai hasil dari rangkaian proses pelapukan dan pengayaan supergen yang umumnya terjadi pada batuan ultrabasa. Pembentukan endapan nikel laterit dikontrol oleh berbagai faktor yaitu iklim, topografi, drainase, tektonik, tipe batuan asal, dan struktur geologi. Untuk dapat mengestimasi sumber daya endapan nikel laterit pada suatu area, maka dilakukan suatu program eksplorasi, salah satunya adalah program pengeboran. Dalam melakukan aktivitas pengeboran, jarak antara titik bor menjadi salah satu hal utama yang perlu diperhatikan dikarenakan jarak spasi titik bor akan mempengaruhi tingkat keyakinan hasil estimasi serta berpengaruh terhadap biaya eksplorasi. Pada penelitian kali ini dilakukan simulasi variasi spasi titik bor dengan skenario 25 m x 25 m, 50 m x 50 m, 75 m x 75 m, dan 100 m x 100 m yang bertujuan untuk menentukan spasi titik bor yang paling optimal pada daerah penelitian dengan mempertimbangkan aspek geostatistik pada saat dilakukan estimasi sumberdaya. Metode estimasi sumberdaya yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *ordinary kriging* dengan mempertimbangkan aspek geostatistik data yang direpresentasikan dalam model semivariogram. Keyakinan terhadap hasil estimasi metode *ordinary kriging* dapat diketahui dengan menganalisis kesalahan relatif (*relative error*) dari proses estimasi pada setiap simulasi spasi titik bor yang telah dibuat. Perhitungan nilai *relative error* menggunakan *Global Estimation Variance (GEV)* yang dilakukan terlebih dahulu. Metode *Global Estimation Variance* digunakan untuk mencari nilai *relative error* secara *global* di suatu daerah. Hasil perhitungan *relative error* menunjukkan bahwa spasi titik bor 25 m x 25 m merupakan spasi titik bor yang paling optimal dengan nilai *relative error* 3,7%. Spasi tersebut dipilih karena memiliki nilai *relative error* yang paling rendah berdasarkan pertimbangan parameter *Global Estimation Variance*.

Kata Kunci: Nikel laterit, estimasi sumberdaya, metode *ordinary kriging*, spasi titik bor, *Global Estimation Variance*

ABSTRACT

Nickel laterite is formed as a result of a series of weathering processes and supergene enrichment that generally occurs in ultramafic rocks. The formation of laterite nickel deposits is controlled by various factors, namely climate, topography, drainage, tectonics, rock type of origin, and geological structure. To be able to estimate the resources of laterite nickel deposits in an area, an exploration program is carried out, one of which is a drilling program. In carrying out drilling activities, the distance between drill points is one of the main things that need to be considered because the spacing of drill points will affect the level of confidence in the estimation results and affect exploration costs. In this study, a simulation of variations in drill point spacing was carried out with scenarios of 25 m x 25 m, 50 m x 50 m, 75 m x 75 m, and 100 m x 100 m which aims to determine the most optimal drill point spacing in the research area by considering the geostatistical aspects of the study area. when estimating resources. The resource estimation method used in this study is the ordinary kriging method by considering the geostatistical aspects of the data represented in the semivariogram model. Confidence in the estimation results of the ordinary kriging method can be determined by analyzing the relative error of the estimation process in each drill point spacing simulation that has been made. The calculation of the relative error value uses the Global Estimation Variance (GEV) which is done first. The Global Estimation Variance method is used to find the relative error value globally in an area. The results of the relative error calculation show that the drill point spacing of 25 m x 25 m is the most optimal drill point spacing with a relative error value of 3,7%. This space was chosen because it has the lowest relative error value based on consideration of the Global Estimation Variance parameter.

Keywords: Nickel laterite, resource estimation, ordinary kriging method, drill point spacing, Global Estimation Variance

KATA PENGANTAR



Puji syukur kita panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, hidayah, dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan dengan maksimal dan penuh dinamika skripsi yang berjudul "Optimasi Variasi Spasi Titik Bor Endapan Nikel Laterit dengan Menggunakan Pendekatan Geostatistik (*Ordinary Kriging*) untuk perhitungan sumber daya". Sholawat serta salam kita haturkan kepada Nabi besar kita, Nabi Muhammad SAW yang telah menjadi suri tauladan kita dalam menapaki lika-liku kehidupan, Nabi yang telah menggulung tikar-tikar kebatilan dan membentangkan permadani-permadani kebenaran.

Dengan penuh rasa tawadhu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang berperan dalam penulisan ini baik berupa dukungan moral maupun materil serta ilmu yang bermanfaat. Penulis berharap skripsi ini dapat memberikan manfaat dan dapat menjadi lumbung amal kebaikan di sisi Allah SWT.

Skripsi tidak akan rampung tanpa adanya bantuan oleh sosok orang-orang luar biasa yang berperan dalam proses penyusunan. Olehnya itu, penulis menyampaikan terima kasih kepada pihak PT Natural Persada Mandiri yang telah senantiasa membagi ilmu dan pengalaman selama penulis berada disana, utamanya dalam hal pengambilan data Tugas Akhir sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan maksimal.

Terima kasih pula penulis sampaikan kepada Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin yang telah memberikan kesempatan kepada penulis untuk

menempuh pendidikan yang tentunya memiliki perjalanan panjang dan dinamika-dinamika dalam kehidupan kampus. Begitupun dengan Bapak Asran Ilyas, ST. MT. Ph.D. selaku Penasehat Akademik sekaligus sebagai Pembimbing I, Bapak Dr. Phil.nat Sri Widodo, ST, MT. dan Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, MT. selaku Pembimbing II dalam penyusunan skripsi yang senantiasa meluangkan waktu, tenaga, pikiran serta memberikan ilmu yang bermanfaat dan motivasi bagi penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada tim penguji yang telah memberikan saran dan masukan untuk perbaikan skripsi ini, yakni Bapak Dr. Eng. Purwanto, S.T., M.T dan Ibu Rizki Amalia, S.T., MT

Begitupula penulis ucapkan terima kasih yang tak terhingga untuk Keluarga besar Abd. Muin H S selaku ayahanda penulis, keluarga besar Badiah selaku ibunda penulis, Wahyudi saputra dan Dian Eka Jayani selaku saudara tercinta penulis serta Hema Malinie Patigai yang tentunya senantiasa memberikan dukungan dan doa yang tulus sehingga penulis selalu semangat dan termotivasi dalam penyelesaian skripsi.

Tak lupa pula terimakasih penulis ucapkan kepada seluruh teman teman seperjuangan penulis dalam melalui dinamika dan perjalanan panjang dalam dunia kampus yakni Angkatan 2018 (Tunnel 18) yang senantiasa menemani penulis dikala sedih maupun senang serta segala hal yang dilalui bersama dengan sejuta drama didalamnya. Terima kasih pula penulis sampaikan kepada organisasi tercinta Persatuan Mahasiswa Tambang Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin (PERMATA FT-UH), tempat mengembangkan *softskill*, mencari pengalaman, relasi dan kesenangan. Tetap jaya PERMATA dibawa Panji Fakultas Teknik sebagai organisasi kemahasiswaan yang mengedepankan keilmuan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih terdapat kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, penulis menyampaikan permohonan maaf atas semua kekurangan yang dijumpai dalam proses penyusunan

skripsi ini karena pada hakikatnya manusia tidak luput dari kesalahan dan kesempurnaan hanya milik Allah SWT semata.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Gowa, Januari 2023

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI	ii
LEMBAR KEASLIAN	iii
ABSTRAK.....	ii
<i>ABSTRACT</i>.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian.....	4
1.6 Lokasi Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Endapan Nikel Laterit.....	7
2.2 Klasifikasi Sumberdaya Mineral	13
2.3 Analisis Geostatistik	16
2.4 Metode Estimasi Sumber daya	23
BAB III METODE PENELITIAN	33

3.1	Sumber Data	34
3.2	Pengolahan Data	35
3.3	Bagan Alir Penelitian	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....		42
4.1	Analisis Statistik Endapan Nikel Laterit.....	42
4.2	Analisis Geostatistik Endapan Nikel Laterit.....	52
4.3	Hasil Estimasi Sumberdaya dengan Metode <i>Ordinary Kriging</i>	71
4.4	Hasil Optimasi Spasi Titik Bor	77
BAB V PENUTUP		78
4.5	Kesimpulan.....	78
4.6	Saran.....	79
DAFTAR PUSTAKA.....		81

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1.1 Peta tunjuk lokasi penelitian	6
2.1 Skema profil vertikal endapan nikel laterit dan indikasi komposisi kimia pada daerah iklim tropis (Elias, 2002).....	9
2.2 Tipe profil vertikal pada laterit silikat, lempung, dan oksida (Elias, 2002).....	11
2. 3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral (KCFM, 2017).....	15
2. 4 Komponen penyusun variogram (Coombes, 2008).....	18
2.5 Pencarian pasangan data dalam perhitungan variogram eksperimental (Sinclair and Blackwell, 2004).....	19
2.6 Semivariogram eksperimental berdasarkan jarak.....	19
2.7 Semivariogram eksperimental dengan sawtooth dan smooth curve. (a) pure nugget effect, (b) pola umum semivariogram, (c)semivariogram eksperimental parabolik dengan stasioner lokal hingga jarak s, (d)hole effect dengan karakter siklus distribusi spasial variabel (Sinclair and Blackwell,2004).....	20
2.8 Model umum power pada semivariogram di mana p adalah konstanta, h adalah jarak sampel (Sinclair and Blackwell,2004).	21
2.9 Model variogram eksponensial (Coombes, 2008).....	21
2.10 Model variogram spherical (Sinclair and Blackwell, 2004)	22
2.11 Model variogram gaussian (Coombes, 2008).....	23
2.12 Metode estimasi sumberdaya menggunakan poligon (Hartman, 1992).....	24
2 13 Metode estimasi sumberdaya dengan IDW (Arifuddin Idrus, 2007).....	26
2.14 (A) Data geostatistik (B) Data area.	32
3.1 Drillhole.....	37
3.2 String	38
3.3 DTM.....	38
3.4 Bagan Alir	41

4.1	Histogram kada Ni zona limonit dengan jarak spasi bor 25 m x 25 m.	43
4.2	Histogram kada Ni zona limonit dengan jarak spasi bor 50 m x 50 m.	44
4.3	Histogram kada Ni zona limonit dengan jarak spasi bor 75 m x 75 m.	45
4.4	Histogram kada Ni zona limonit dengan jarak spasi bor 100 m x 100 m.....	46
4.5	Histogram kada Ni zona saprolit dengan jarak spasi bor 25 m x 25 m.	48
4.6	Histogram kada Ni zona saprolit dengan jarak spasi bor 50 m x 50 m.	48
4.7	Histogram kada Ni zona saprolit dengan jarak spasi bor 75 m x 75 m.	49
4.8	Histogram kada Ni zona saprolit dengan jarak spasi bor 100 m x 100 m.....	51
4.9	Variogram map kadar Ni zona limonit jarak spasi bor 25 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.....	53
4.10	Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m	54
4.11	Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m.	54
4.12	Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m.....	55
4.13	Variogram map kadar Ni zona limonit jarak spasi bor 50 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.....	55
4.14	Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m.	56
4.15	Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m.	56
4.16	Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m.....	57
4.17	Variogram map kadar Ni zona limonit jarak spasi bor 75 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.....	57
4.18	Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m	58
4.19	Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m.	58
4.20	Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m.....	58
4.21	Variogram map kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.....	58
4.22	Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m	59
4.23	Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m...	59

4.24 Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m.	61
4.25 Variogram map kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.	62
4.26 Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m.	63
4.27 Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m. ...	63
4.28 Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 25 m.	64
4.29 Variogram map kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.	64
4.30 Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m.	65
4.31 Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m. ...	65
4.32 Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 50 m.	66
4.33 Variogram map kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.	66
4.34 Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m.	67
4.35 Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m. ...	67
4.36 Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 75 m.	68
4.37 Variogram map kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m (a) Sumbu mayor dan (b) Sumbu semi-mayor.	68
4.38 Variogram sumbu mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m.	68
4.39 Variogram sumbu semi-mayor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m. ...	68
4.40 Variogram sumbu minor kadar Ni zona limonit, jarak spasi bor 100 m.	69
4.41 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona limonit (jarak spasi bor 25 m x 25 m)	71
4.42 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona saprolit (jarak spasi bor 25 m x 25 m)	72
4.43 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona limonit (jarak spasi bor 50 m x 50 m)	73
4.44 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona saprolit (jarak spasi bor 50 m x 50 m)	73
4.45 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona limonit (jarak spasi bor 75 m x 75 m)	74
4.46 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona saprolit (jarak spasi bor 75 m x 75 m)	75

4.47 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona limonit (jarak spasi bor 100 m x 100 m).....	76
4.48 Blok Model ore dan <i>waste</i> zona saprolit (jarak spasi bor 100 m x 100 m).....	76

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
4. 1 Data statistik kadar Ni dan zona limonit dengan variasi spasi titik bor.....	47
4. 2 Data statistik kadar Ni dan zona saprolit dengan variasi spasi titik bor.....	51
4. 3 Hasil analisis variogram kadar Ni zona limonit.....	61
4. 4 Hasil analisis variogram kadar Ni zona saprolit.....	69
4. 5 Hasil estimasi sumberdaya zona saprolit.....	72
4. 6 Hasil estimasi sumberdaya zona saprolit.....	74
4. 7 Hasil estimasi sumberdaya zona saprolit.....	75
4. 8 Hasil estimasi sumberdaya zona saprolit.....	77
4. 9 Optimasi Variasi spasi titik bor	78

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. Contoh Data Bor.....	83
2. Blok Model setiap Simulasi variasi spasi titik bor	84
3. Peta lokasi penelitian	85
4. peta simulasi variasi spasi titik bor	86

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan industri kendaraan listrik serta tingginya permintaan akan *stainless steel* menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan permintaan bijih nikel. Hal ini disebabkan karena nikel merupakan salah satu paduan utama dalam pembuatan *stainless steel* dan baterai pada kendaraan listrik. Permintaan bijih nikel yang semakin meningkat mendorong upaya pemenuhan kebutuhan bijih melalui peningkatan kegiatan eksplorasi bijih nikel. Kegiatan eksplorasi nikel umumnya difokuskan pada dua tipe sumber bijih nikel yaitu endapan nikel laterit dan nikel sulfida. Nikel laterit memiliki sumber daya sekitar 60% - 70% di dunia. Penambangan nikel laterit telah dilakukan selama sekitar 140 tahun. Hingga tahun 2000, nikel laterit hanya menyumbang kurang dari 40% total produksi nikel global, sementara sisanya dipenuhi oleh bijih nikel sulfida (Butt *and* Cluzel, 2013). Endapan nikel laterit di Indonesia memiliki potensi yang sangat besar terutama di Sulawesi dan Halmahera yang memiliki singkapan batuan ultramafik terbesar di dunia dan menjadi lokasi yang produktif dalam penambangan endapan nikel laterit (Van Der Ent *et al.*, 2013).

Nikel laterit terbentuk sebagai hasil dari rangkaian proses pelapukan dan pengayaan supergen yang umumnya terjadi pada batuan ultrabasa. Pembentukan endapan nikel laterit dikontrol oleh berbagai faktor yaitu iklim, topografi, drainase, tektonik, tipe batuan asal, dan struktur geologi (Elias, 2002). Endapan nikel laterit umumnya bersifat eratik, di mana karakter endapan seperti geometri dan komposisi unsur penyusun endapan sangat dikontrol oleh faktor pembentukannya. Untuk dapat memetakan potensi endapan nikel laterit pada suatu area, maka dilakukan suatu

program eksplorasi, salah satunya adalah program pengeboran. Distribusi dan kerapatan antar titik bor dapat dioptimalkan berdasarkan sebaran geometri dan kadar endapan yang kemudian dapat digunakan dalam mengestimasi sumber daya mineral pada suatu area.

Estimasi sumber daya mineral untuk mengetahui model geologi endapan, kuantitas material, dan sebaran kadar unsur dapat dilakukan dengan berbagai metode seperti metode klasik (poligonal dan penampang) (Sinclair *and* Blackwell, 2004) dan metode geostatistik modern seperti *kriging*. Salah satu metode yang umum digunakan dalam estimasi sumber daya nikel laterit dan dianggap memberikan hasil estimasi yang baik dengan mempertimbangkan aspek geospasial data adalah metode *kriging*. Metode *kriging* terdiri atas tiga (3) jenis yaitu *simple kriging*, *ordinary kriging*, dan *universal kriging*. *Ordinary kriging* merupakan salah satu metode *kriging* yang paling umum digunakan dalam estimasi sumber daya mineral.

Estimasi dengan metode *ordinary kriging* mempertimbangkan aspek geostatistik data yang direpresentasikan dalam model semivariogram. Keyakinan terhadap hasil estimasi metode *ordinary kriging* dapat diketahui dengan menganalisis kesalahan relatif (*relative error*) dari proses estimasi. Salah satu parameter dalam mengukur kesalahan relatif hasil estimasi adalah varians *kriging* yang merupakan fungsi dari model variogram dan jarak spasi bor (Heriawan dkk, 2011). Kesalahan relatif dan ketidakpastian estimasi (*uncertainty*) dapat diprediksi dengan menggunakan beberapa aspek geostatistik seperti *Variance estimation Global* (Taghvaeenejad *et al.*, 2021). Kesalahan relatif dalam estimasi dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tingkat kerapatan data sampel (jarak spasi bor), hubungan korelasi antar data sampel yang direpresentasikan oleh model variogram, dan variabilitas dari variabel yang diestimasi.

Kerapatan jarak spasi bor akan memberikan tingkat keyakinan hasil estimasi yang semakin tinggi, sehingga akan mempengaruhi klasifikasi sumber daya mineral.

Jarak spasi lubang bor yang semakin rapat dapat mengurangi faktor ketidakpastian yang berhubungan dengan nilai estimasi (Cornah *et al.*, 2013). Berdasarkan Kode KCMII 2017, klasifikasi sumber daya mineral diklasifikasikan dalam tiga (3) kategori yang merepresentasikan tingkat keyakinan tertinggi hingga terendah yaitu Klasifikasi Sumber Daya Terukur, Sumber Daya Tertunjuk, dan Sumber Daya Tereka. Peningkatan kerapatan jarak spasi bor seperti dalam kegiatan pengeboran *infill* akan turut diiringi 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 kemungkinan pencapaian tingkat akurasi hasil estimasi yang memadai. Analisis optimasi spasi bor memungkinkan pemanfaatan biaya eksplorasi pengeboran secara lebih efisien (Saikia *and* Sarkar, 2006).

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui hubungan antara jarak spasi titik bor terhadap estimasi sebaran kadar nikel (Ni) pada daerah penelitian.
2. Mengetahui pengaruh jarak spasi titik bor terhadap tingkat keyakinan estimasi sumber daya endapan nikel laterit pada daerah penelitian.
3. Mengetahui jumlah tonase dan kadar nikel (Ni) yang dihasilkan dari estimasi sumber daya mineral dengan metode *Ordinary Kriging*

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini berdasarkan rumusan masalah di atas, yaitu:

1. Menganalisis variasi spasi titik bor dengan memperhatikan varians estimasi menggunakan pendekatan Geostatistik (*ordinary kriging*).

2. Menentukan variasi spasi titik bor yang optimal berdasarkan nilai *relative error* dengan mempertimbangkan analisis Geostatistik
3. Mengestimasi sumber daya endapan nikel laterit di lokasi penelitian menggunakan metode *Ordinary Kriging*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari kegiatan penelitian ini adalah memberikan konfigurasi spasi titik bor yang optimal atau paling menguntungkan dengan mempertimbangkan kualitas dan penurunan kesalahan estimasi sumber daya endapan nikel laterit dengan menampilkan gambaran model geologi dan sebaran kadan nikel laterit secara 3D (3 dimensi) kepada perusahaan yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perencanaan program eksplorasi yang dapat menghemat waktu dan biaya dalam kegiatan eksplorasi. Selain itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi masukan kepada pihak perusahaan mengenai pentingnya analisis pendekatan geostatistik dalam hal mendapatkan estimasi sumberdaya endapan nikel laterit yang lebih akurat.

1.5 Tahapan Kegiatan Penelitian

Adapun tahapan – tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri atas Persiapan, Pengumpulan data, Pengolahan dan analisis data, dan penyusunan skripsi

1. Tahap Persiapan

Tahap persiapan dalam penelitian dilakukan melalui studi literatur serta perencanaan teknis yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian. Studi literatur dilakukan melalui pencarian dan menelaah referensi yang dibutuhkan dalam melakukan penelitian seperti peta, artikel ilmiah studi terdahulu dan

buku ilmiah. Perencanaan teknis penelitian dilakukan melalui pembuatan rencana penelitian yang meliputi kebutuhan data dan proses yang akan dilakukan dalam penelitian berdasarkan studi literatur, melakukan konfirmasi data yang mungkin dapat diperoleh dari perusahaan

2. Tahapan Pengambilan Data

Pengambilan data penelitian dilakukan melalui proses pengumpulan data – yang relevan dengan penelitian tersedia oleh perusahaan dan dapat digunakan dalam penelitian. Jenis data yang digunakan dalam penelitian merupakan data geologi, data eksplorasi pengeboran (*Assay* dan *Collar*) dan data topografi Tahapan Pengolahan dan Analisis Data

Tahap pengolahan dan analisis data dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan spasi bor optimum dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral daerah penelitian dengan pendekatan geostatistik. Proses pengolahan dan analisis data dilakukan melalui pembuatan model geologi, estimasi kadar dan analisis parameter geostatistik hasil estimasi untuk mengetahui tingkat akurasi hasil estimasi pada setiap simulasi spasi bor. Simulasi spasi bor merupakan proses eksperimen yang dilakukan untuk mengetahui akurasi hasil estimasi pada beberapa skenario jarak dan susunan spasi bor. Pengolahan dan analisis data ini dilakukan dengan menggunakan beberapa perangkat lunak seperti *Microsoft excel*, *surpac* serta *arcgis*.

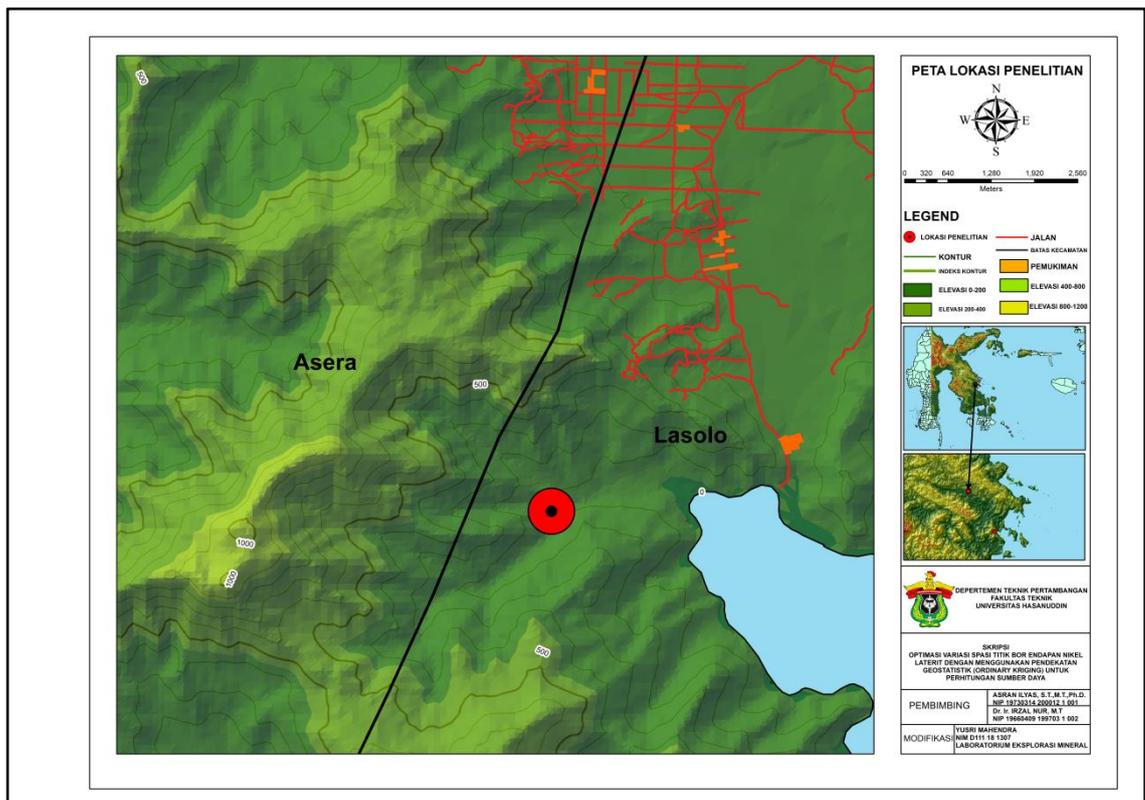
3. Pembuatan Skripsi

Kegiatan penelitian mulai dari penggunaan data, prosedur dan proses pengolahan data, serta hasil penelitian kemudian disusun secara sistematis dalam format laporan penelitian

1.6 Lokasi Penelitian

PT Natural Persada mandiri memiliki beberapa *site* di Sulawesi Tenggara, salah satunya adalah *Site* Bososi yang secara administratif berada di Desa Marombo Pantai, Kabupaten Konawe Utara, Kecamatan Langgikima, Provinsi Sulawesi Tenggara.

Perjalanan dari Makassar ke lokasi penelitian ditempuh dengan menggunakan 2 mode transportasi. Pertama perjalanan dari Makassar ke Kendari ditempuh dengan waktu satu jam menggunakan transportasi udara. Kemudian dari kota Kendari menuju Lokasi penelitian ditempuh dengan waktu enam jam menggunakan transportasi darat. Daerah lokasi kerja praktek didominasi oleh lahan perkebunan kelapa sawit serta perbukitan-perbukitan dan penduduknya masih bisa dikatakan sedikit. Peta tunjuk lokasi penelitian diperlihatkan pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta tunjuk lokasi penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Endapan Nikel Laterit

Endapan nikel laterit terbentuk sebagai hasil rangkaian proses penyingkapan dan pelapukan batuan ultrabasa sehingga terjadi pengayaan supergen di mana karakteristik dan distribusi dari endapan sangat dipengaruhi oleh faktor – faktor pembentuk endapan laterit. Berikut ini merupakan penjelasan terkait genesa, karakteristik dan pengelompokan dari endapan nikel laterit.

2.1.1 Genesa dan Profil Endapan Nikel Laterit

Endapan laterit terbentuk sebagai hasil rangkaian proses pelapukan dan pengayaan supergen yang umumnya terjadi pada batuan ultrabasa yang kaya akan Mg dengan kandungan Ni berkisar 0,2 - 0,4% (Golightly, 1981). Batuan tersebut umumnya adalah dunit, harzburgit, dan peridotit yang muncul pada kompleks ofiolit (Brand *et al.*, 1998). Proses laterisasi melibatkan penguraian mineral primer dan pelepasan beberapa komponen kimia, pencucian unsur *mobile*, akumulasi unsur *immobile*, dan pembentukan mineral baru yang lebih stabil terhadap pelapukan. Proses pelapukan pada batuan ultrabasa yang semakin meningkat menyebabkan terjadinya penurunan kandungan magnesium dan meningkatkan kandungan besi dari bawah ke atas profil endapan (Elias *et al.*, 1981). Proses tersebut menyebabkan pembentukan lapisan material dengan karakteristik fisik dan kimia tertentu yang disebut sebagai profil laterit, yang secara umum terdiri atas (dari bawah profil ke atas):

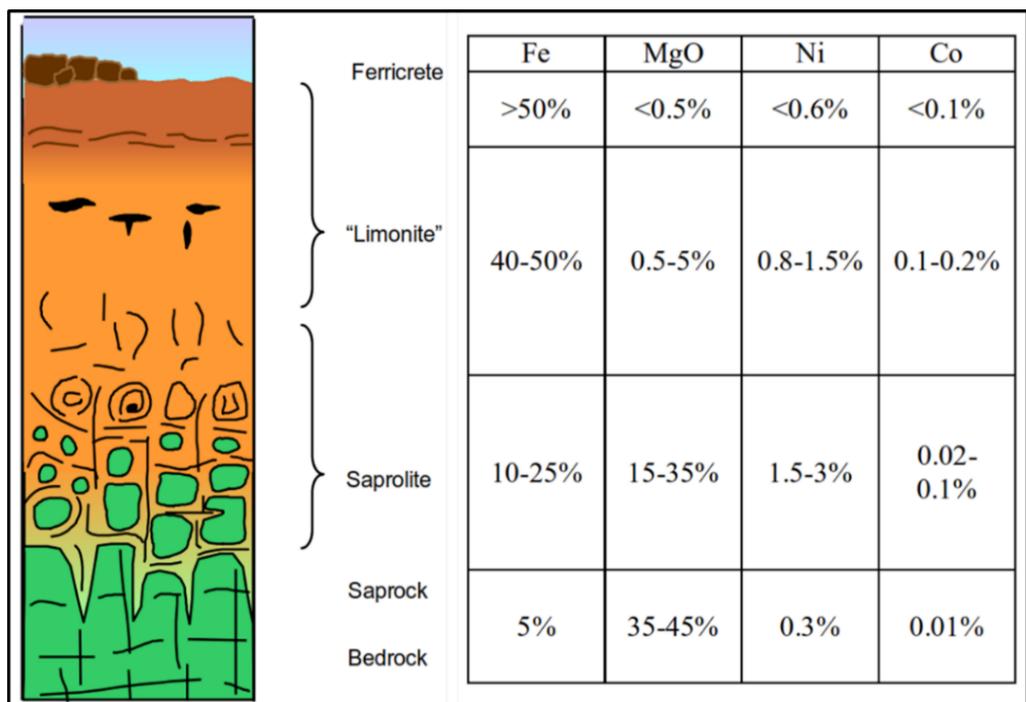
1. Batuan dasar (*bedrock*), merupakan zona batuan ultrabasa segar yang belum mengalami proses pelapukan.
2. *Rocky saprolite* atau *saprock*, merupakan zona di atas batuan dasar (*bedrock*)

yang menunjukkan tahap awal pelapukan dengan intensitas rendah pada zona kontak rekahan batuan di mana porsi batuan dan mineral asal masih melimpah dan hasil alterasi masih sangat sedikit.

3. Saprolit, merupakan lapisan di atas zona *rocky saprolite* di mana intensitas pelapukan meningkat dan menyebabkan struktur batuan asal yang tidak terlapukan tetap ada walaupun mineral aslinya telah berubah. Zona ini umumnya tersusun secara dominan oleh serpentin atau *hydrous magnesium silicates*, $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ dengan nikel menggantikan Mg dan membentuk garnierit $(Mg,Ni)_3Si_2O_5(OH)_4$. Zona saprolit memiliki porsi *primary minerals* yang semakin menurun, zona rekahan yang mengalami pelapukan intensif dan meninggalkan *boulder* yang terpisah-pisah seperti "mengambang" dengan campuran kandungan *primary minerals* dan alterasi (Elias, 2002).
4. Zona transisi, merupakan zona di atas saprolit, umumnya berwarna coklat hingga hijau tua, dengan drainase yang buruk dan memiliki kandungan saprolit /garnierit yang cukup tinggi dan lempung seperti *nontronite* $(Na_{0.3}Fe_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O)$.
5. Limonit, merupakan zona di mana pelapukan terjadi secara intensif dan menyebabkan terjadinya peningkatan *leaching* pada magnesium dan silika, hilangnya struktur asli batuan asal, dan peningkatan kandungan besi. Penamaan limonit diambil berdasarkan litologi dominan penyusunnya yaitu goetit dan hematit dalam zona laterit oksida (Elias, 2002). Zona limonit dapat dibagi menjadi dua (2) bagian yaitu zona limonit kuning dan zona limonit merah berdasarkan kandungan geokimia penyusun. Zona limonit merah umumnya terletak di bagian atas profil limonit seiring dengan peningkatan kandungan besi dan peningkatan pencucian magnesium, sedangkan zona limonit kuning terletak di bagian profil yang lebih bawah dengan peningkatan

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

6. *Ferricrete*, merupakan lapisan kerak dengan kandungan besi yang tinggi terbentuk pada bagian paling atas suatu sekuen dan dapat menjadi bagian yang melindungi profil di bawahnya dari proses erosi (kyle, 2010). Zona ini umumnya dianggap sebagai *overburden* dengan kandungan nikel dan cobalt yang tidak ekonomis. Profil endapan nikel laterit secara vertikal beserta kandungan geokimianya ditampilkan oleh Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Skema profil vertikal endapan nikel laterit dan indikasi komposisi kimia pada daerah iklim tropis (Elias, 2002).

Menurut Elias (2002), terdapat beberapa faktor yang mengontrol pembentukan endapan nikel laterit di suatu daerah yaitu sebagai berikut.

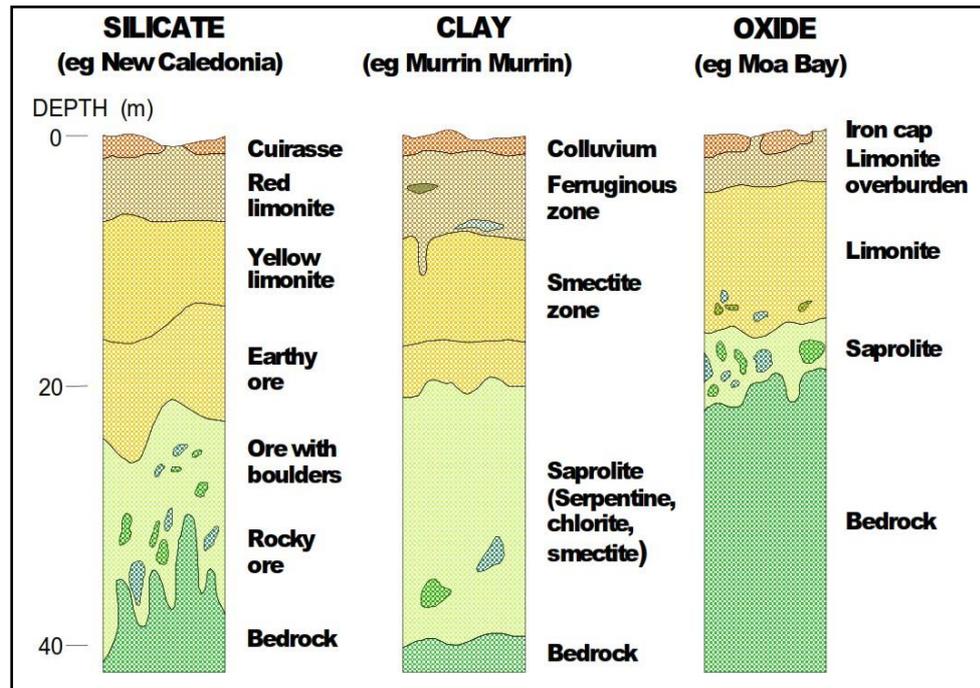
1. Iklim, intensitas curah hujan akan menentukan jumlah air yang masuk ke dalam tanah sehingga akan mempengaruhi intensitas pelindian pada komponen terlarut. Selain kuantitas curah hujan yang ada, efektifitas darimasuknya air hujan ke dalam profil bawah tanah dibandingkan dengan kuantitas air yang mengalami *run off* di permukaan menjadi

faktor penting dalam pembentukan endapan laterit. Tingginya suhu rata – rata tanah akan meningkatkan kecepatan dari proses pelapukan (Butt *and* Zeegers, 1992).

2. Topografi, relief dan geometri lereng mempengaruhi drainase, infiltrasi air ke dalam tanah dan tingginya muka air tanah.
3. Drainase, mempengaruhi kuantitas air yang tersedia untuk proses pelindian pada seluruh area.
4. Tektonik, pengangkatan tektonik akan meningkatkan erosi pada bagian atas profil, meningkatkan relief topografi dan menurunkan muka air tanah. Tektonik yang stabil akan menyebabkan bentang alam yang relatif datar dan memperlambat gerakan air tanah.
5. Tipe batuan asal, mineralogi akan menentukan ketahanan batuan terhadap pelapukan dan ketersediaan komponen untuk membentuk mineral yang baru.
6. Struktur, dapat berupa patahan dan rekahan yang membentuk zona tidak menerus pada batuan dan menghasilkan permeabilitas pada batuan. Rekahan akan menghasilkan ruang yang memungkinkan terbentuknya jalur pelapukan yang potensial.

2.1.2 Klasifikasi endapan nikel laterit

Menurut Elias (2002), berdasarkan kandungan mineralogi dominan yang berkembang dalam profil laterit, endapan nikel laterit dapat dikelompokkan menjadi tiga (3) kelompok utama yaitu Laterit Oksida (*Oxide Laterite*), Laterit Lempung (*Clay Laterite*), dan Laterit Silikat (*Silicate Laterite*) yang dapat dilihat pada tampilan ilustrasi pada gambar 2.2 berikut:



Gambar 2.2 Tipe profil vertikal pada laterit silikat, lempung, dan oksida (Elias, 2002).

1. Laterit Oksida (*Oxide Laterite*)

Laterit oksida merupakan produk akhir yang umum dari laterisasi batuan ultrabasa. Dengan adanya kehadiran air, mineral utama pembentuk batuan (utamanya adalah olivin dan atau serpentin, ortopiroksen, dan terkadang klinopiroksen) dipecah oleh proses hidrolisis. Olivin menjadi salah satu mineral pertama yang terlapukan karena merupakan mineral yang tidak stabil. Dalam lingkungan tropis, Mg^{2+} dan Si akan mengalami proses pelindian yang intensif, sementara Fe^{2+} akan terlepas, teroksidasi dan terpresipitasi menjadi *ferric hydroxide* yang pada awalnya bersifat *amorf* atau *poorly cristaline* namun secara progresif akan terekristalisasi menjadi goetit. Ortopiroksen dan serpentin yang terhidrolisis, akan melepaskan Mg, Si dan kemudian tergantikan oleh *pseudomorf* goetit. Proses transformasi mineralogi berupa pelindian Mg dan pengayaan Fe memberikan kenampakan profil geokimia yang jelas di mana terjadi penurunan konsentrasi Mg dan peningkatan konsentrasi Fe pada profil vertikal laterit dari bawah ke atas.

Pada pedolit (limonit) terjadi perubahan secara bertahap antara goetit yang berwarna kuning – coklat menjadi hematit yang berwarna merah – coklat sehingga menghasilkan terminologi “limonit kuning” pada bagian lebih bawah profil laterit zona limonit dan “limonit merah” pada bagian atas dalam profil limonit laterit. Proses perubahan goetit menjadi hematit disertai hilangnya Ni, karena hematit tidak dapat menampung Ni yang sebelumnya terkandung dalam kisi goetit. Pada bagian teratas limonit merah dapat berkembang lapisan kerak yang keras dengan kandungan kaya besi yang sering disebut sebagai *ferricrete*. Contoh endapan laterit oksida adalah Moa Bay dan Pinares di Cuba (Linchenat and Shirokova, 1964), Goro dan Prony di New Caledonia bagian selatan (Golightly, 1981).

2. Laterit Lempung (*Clay Laterite*)

Laterit lempung merupakan deposit laterit di mana lempung smektit mendominasi pada bagian atas dari lapisan profil. Pada kondisi iklim yang lebih dingin atau lebih kering, silika tidak mengalami pencucian seperti pada lingkungan tropis yang lembab. Profil laterit lempung umumnya terbentuk pada area di mana pergerakan air tanah terbatas seperti pada area yang luas dengan relief topografi yang rendah (Golightly, 1981). Pada kondisi demikian, lempung smektit *nontronite* mendominasi dan menggantikan oksida Fe. Lempung *nontronite* umumnya mengandung 1,0 - 1,5% Ni dalam mineralisasi laterit. Dalam profil vertikal, lapisan lempung dapat ditutupi oleh lapisan tipis kaya oksida Fe dan rendah Ni, sedangkan pada bagian bawah profil terdiri atas saprolit dengan kandungan serpentin dan *nontronite*. Profil laterit lempung ditemukan berkembang di Australia misalnya di Murrin Murrin.

3. Laterit Silikat (*Silicate Laterite*)

Laterit silikat umumnya terbentuk dalam kondisi di mana pengangkatan

tektonik terjadi secara perlahan namun menerus sehingga menyebabkan muka air tanah yang tetap rendah yang mengakibatkan terjadinya pelapukan dalam waktu yang lama sehingga menghasilkan pembentukan zona saprolit yang tebal dengan tutupan zona limonit yang tipis tergantung pada intensitas erosi pada permukaan (Golightly, 1981). Laterit silikat dicirikan dengan pengayaan absolut Ni pada zona saprolit sebagai hasil alterasi *primary minerals* dan menghasilkan *secondary serpentine* dan *neoformed goethite*, lempung smektit, dan garnierit. Sebagian besar Ni dihasilkan dari pelepasan oleh rekristalisasi goetit menjadi hematit. Nikel terpresipitasi dalam zona saprolit dengan menggantikan Mg dalam *secondary serpentine* (yang dapat mengandung 5% Ni) dan dalam garnierit yang dapat memiliki kadar lebih dari 20% Ni (Pelletier, 1996). Rata – rata kandungan Ni dalam silikat laterit adalah 2,0 - 3,0% Ni. Contoh profil laterit silikat yang ekonomis dan mengandung porsi sumber daya nikel laterit besar di dunia adalah pada endapan nikel laterit di New Caledonia (Golightly, 1981).

2.2 Klasifikasi Sumberdaya Mineral

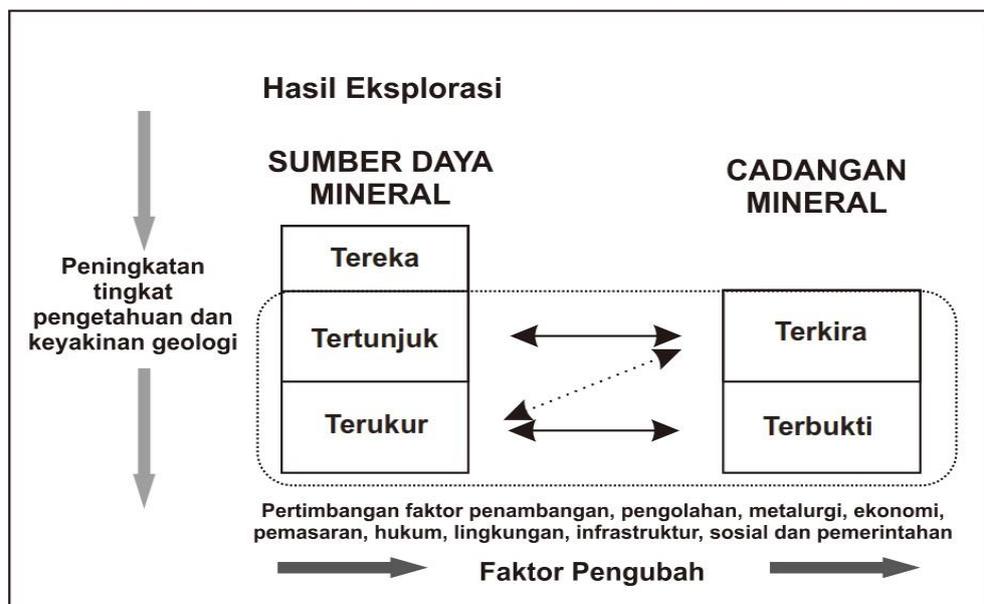
Kegiatan industri pertambangan mineral merupakan rangkaian proses panjang dan terintegrasi mulai dari tahapan pencarian potensi, pemetaan sebaran mineral hingga proses penambangan dan pengolahan. Sumber daya mineral terbentuk secara alamiah di alam yang dikontrol oleh berbagai faktor dan fenomena geologi dalam jangka waktu geologi. Berdasarkan Kode KCMII 2017, 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 prospek yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis.

Lokasi, kuantitas, kadar, karakteristik geologi dan kemenerusan dari sumber

daya mineral diketahui, diestimasi atau diinterpretasikan dari bukti dan pengetahuan geologi yang spesifik, termasuk pengambilan sampel. Sumber daya mineral dikelompokkan berdasarkan tingkat keyakinan geologinya ke dalam :

1. Sumber Daya Mineral Tereka, merupakan bagian dari sumber daya mineral di mana kuantitas dan kualitas kadar diestimasi berdasarkan bukti-bukti geologi dan pengambilan sampel yang terbatas sehingga bukti geologi yang tersedia memadai untuk menunjukkan keterdapatannya sumber daya mineral, namun belum cukup untuk memberikan keyakinan yang tinggi terhadap kemenerusan kadar atau kualitas dan geologi. Sumber Daya Mineral Tereka memiliki tingkat keyakinan lebih rendah dibandingkan dengan Sumber Daya Mineral Tertunjuk dan tidak dapat dikonversi menjadi Cadangan Mineral.
2. Sumber Daya Mineral Tertunjuk, merupakan bagian dari sumber daya mineral di mana kuantitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, dan karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang cukup untuk memungkinkan penerapan faktor-faktor pengubah secara memadai untuk mendukung perencanaan tambang dan evaluasi kelayakan ekonomi deposit. Sumber Daya Tertunjuk didukung oleh bukti dan pengujian yang cukup detail dengan keyakinan yang cukup dan memadai untuk mengasumsikan kemenerusan geologi dan kadar. Sumber Daya Mineral Tertunjuk memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi dari Sumber Daya Tereka, namun memiliki tingkat keyakinan yang lebih rendah dibandingkan dengan Sumber Daya Mineral Terukur dan hanya dapat dikonversi ke Cadangan Mineral Terkira.
3. Sumber Daya Mineral Terukur, merupakan bagian dari sumber daya mineral di mana kuantitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang memadai untuk memungkinkan penerapan faktor-faktor pengubah untuk mendukung perencanaan tambang

detail dan evaluasi akhir dari kelayakan ekonomi deposit tersebut. Terdapat bukti geologi dan pengujian yang detail untuk memastikan kemenerusan geologi dan kadar atau kualitasnya diantara titik-titik pengamatan. Sumber daya Mineral Terukur memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi dibandingkan dengan Sumber Daya Mineral Tertunjuk dan Tereka serta dapat dikonversi ke Cadangan Mineral Terbukti atau Cadangan Mineral Terkira. Pengklasifikasian sumber daya mineral dan alur konversi sumber daya mineral ke cadangan mineral ditampilkan oleh Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral (KCFI, 2017).

Menurut Mohanlal *and* Stevenson (2010), penentuan klasifikasi sumber daya mineral dilakukan dengan menerapkan berbagai pertimbangan yang relevan ke dalam proses estimasi sumber daya mineral seperti analisis *logging* lubang bor, manajemen database, QAQC dan metode estimasi sumber daya mineral untuk memperkirakan tingkat keyakinan dan ketidakpastian (*uncertainty*) di dalam sumber daya mineral. Klasifikasi sumber daya mineral dapat ditentukan berdasarkan atas beberapa pertimbangan seperti parameter

perkiraan geostatistik yang meliputi *kriging efficiency* (ke), *Kriging variance* (kv), *regression slope* (rs) maupun parameter non geostatistik seperti interpretasi geologi (struktur geologi dan fasies / domain geologi), sejarah penambangan, dan QAQC.

Salah satu parameter pertimbangan dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral adalah tingkat ketidakpastian estimasi yang dapat direpresentasikan oleh parameter geostatistik berupa *kriging variance* dan *relatif kriging standard deviation* (RKSD). Menurut Blackwell (1998), prosedur umum dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral adalah sebagai berikut :

1. Identifikasi blok mineralisasi, seperti mengidentifikasi kemenerusan geologi
2. Identifikasi mineralisasi blok di atas nilai *Cut-Off Grade* yang digunakan
3. Pengelompokan blok di atas nilai *Cut-off grade* berdasarkan nilai RKSD.

Aplikasi parameter RKSD yang dilakukan oleh Blackwell (1998) dalam penentuan klasifikasi sumber daya mineral untuk deposit tembaga porfiri dan emas epitermal adalah sebagai berikut :

$$\text{Terukur } 0,3 \leq \text{Tertunjuk } 0,5 \leq \text{Tereka}$$

2.3 Analisis Geostatistik

Dalam industri mineral, geostatistik telah banyak digunakan dalam mengestimasi sumber daya mineral dan batubara (Ramadhan *et al.*, 2021). Geostatistik pada dasarnya merupakan penerapan dari konsep variabel terregional yang dapat digunakan dalam mengukur korelasi antar data geologi yang tersebar secara spasial. Matheron (1963) menjelaskan bahwa fenomena geologi seperti kadar unsur dan ketebalan merupakan variabel terregional di mana nilai suatu sampel memiliki

hubungan keruangan dengan sampel lainnya. Sebagai suatu variabel tereregional, sampel – sampel yang terletak berdekatan akan memiliki hubungan keruangan yang semakin besar sehingga akan memiliki nilai yang mirip namun tidak identik. Korelasi spasial antar data sampel dapat dilakukan melalui analisis dan pemodelan variogram.

2.3.1 Variogram dan Semi-Variogram

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

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

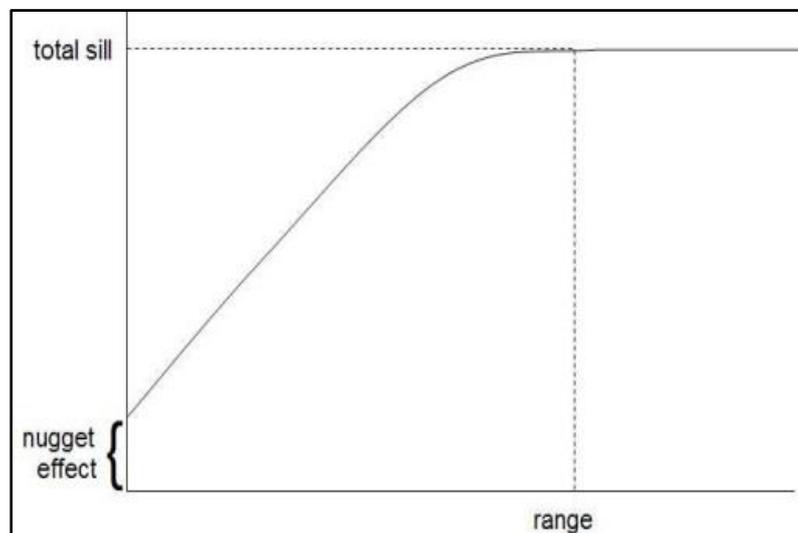
Di mana $Z(x_i)$ merupakan nilai dari variable tereregional pada lokasi x_i dan $Z(x_{i+h})$ merupakan nilai variabel tereregional lain pada jarak dan arah tertentu (h) dari titik sebelumnya. Setengah dari variogram dapat didefinisikan sebagai semivariogram (*gamma h*).

Menurut Coombes (2008) komponen penyusun variogram dan semivariogram *nugget effect*, *sill*, dan *range* (Gambar 2.6).

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

dan biasanya dinyatakan dalam satuan persen (Isaaks *and* Srivastava, 1989).

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

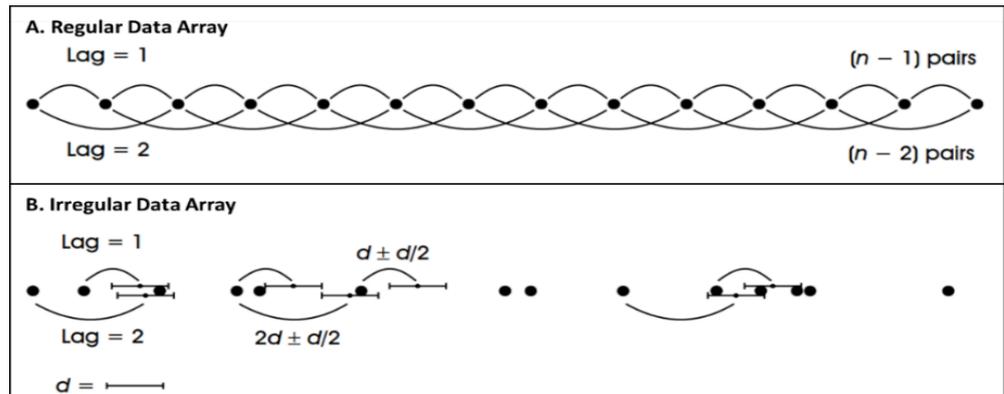


Gambar 2. 4 Komponen penyusun *variogram* (Coombes, 2008).

2.3.2 Eksperimental Semi-Variogram

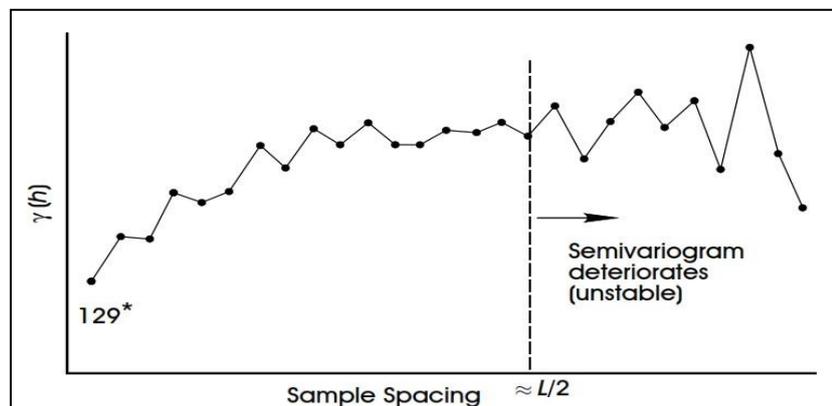
Variogram eksperimental diperoleh dari pengukuran data di lapangan yang merepresentasikan ukuran korelasi spasial antar data sampel yang terpisah oleh suatu jarak tertentu. Pembangunan variogram eksperimental dilakukan dengan pencarian pasangan data dalam variogram berdasarkan *lag* (h) tertentu. Pada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

diilustrasikan oleh Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pencarian pasangan data dalam perhitungan *variogram eksperimental* (Sinclair and Blackwell, 2004)

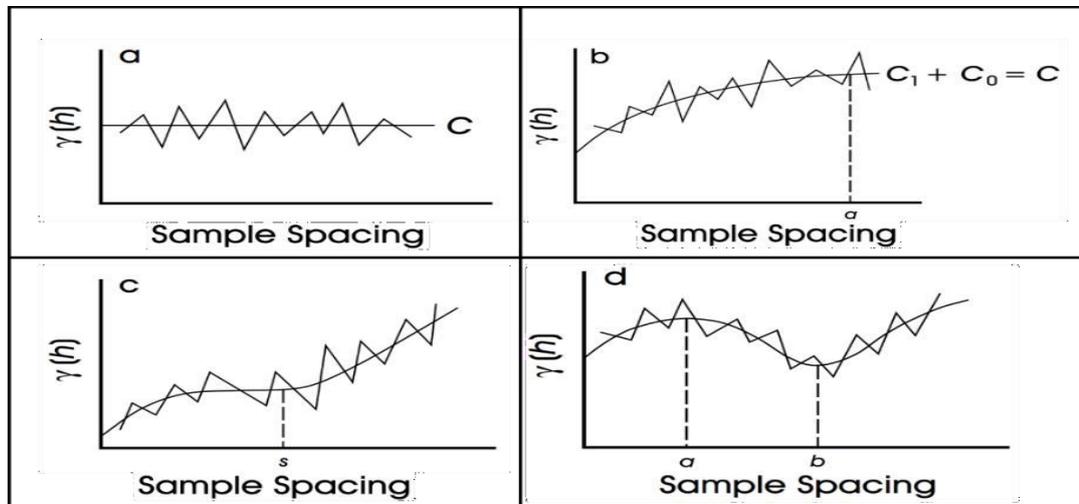
Hasil dari perhitungan variogram kemudian diplot dalam grafik hubungan antara jarak antar pasangan data (h) dan variogram $\gamma(h)$. Semivariogram eksperimental umumnya ditampilkan dengan pola grafik yang bergerigi (*sawtooth*) tergantung pada jumlah data yang digunakan (Gambar 2.6). Ketika jumlah data melimpah, semivariogram eksperimental umumnya menunjukkan fluktuasi variogram yang lebih kecil dan menerus. Secara umum, $\gamma(h)$ akan meningkat seiring dengan peningkatan jarak *lag*.



Gambar 2. 6 Semivariogram eksperimental berdasarkan jarak *lag* (Sinclair and Blackwell, 2004).

Semivariogram merupakan fungsi perbedaan pada pasangan data yang dapat digunakan untuk mengetahui aspek stasioneritas data terutama terhadap jarak maksimum di mana kestasioneran data dapat diasumsikan

(*quasi-stationerity*). Contoh ideal dari semivariogram eksperimental yang menampilkan struktur bergerigi (*sawtooth curve*) dan *smooth curve* ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Semivariogram eksperimental dengan sawtooth dan smooth curve. (a) *pure nugget effect*, (b) pola umum *semivariogram*, (c) *semivariogram eksperimental parabolik dengan stasioner lokal hingga jarak s*, (d) *hole effect* dengan karakter siklus distribusi spasial variabel. (Sinclair and Blackwell,2004).

2.3.3 Variogram Model Teoritis

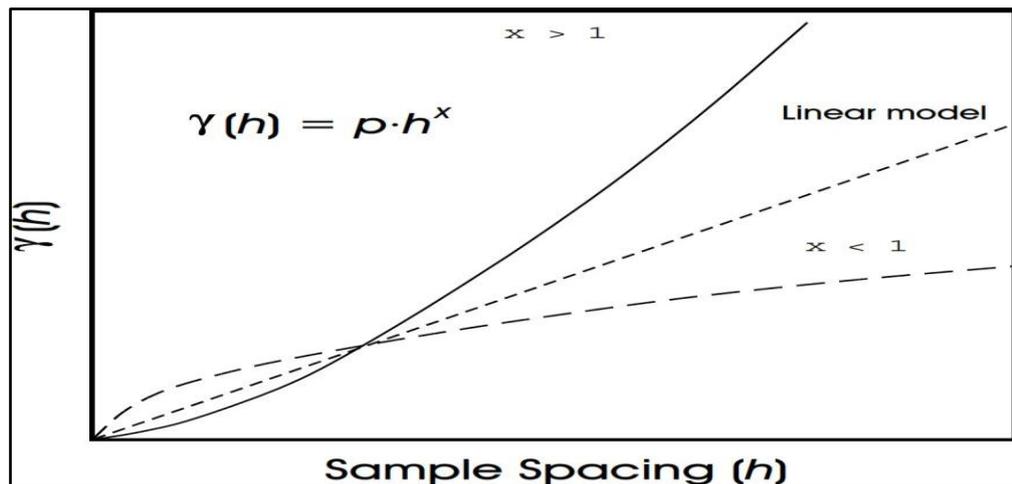
Variogram model teoritis merupakan model variogram yang diekspresikan dalam suatu model matematis dan dijadikan sebagai acuan dalam melakukan *fitting* variogram sesuai dengan pola data variogram eksperimental. *Nugget*, *sill* dan *range* diinterpretasikan melalui proses *fitting* pada variogram eksperimental berdasarkan variogram model teoritis. Terdapat beberapa model variogram teoritis yang meliputi

1. Model Linear

Model linear merupakan model yang tidak mencapai *sill* dan dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$\gamma(h) = C_0 + p.h^x$$

Di mana C_0 adalah *nugget effect*, p adalah konstanta (*slope* dalam model linear), h adalah *lag*, dan x merupakan eksponen dari h dengan nilai $0 \leq x \leq 2$ ($x = 1$, dalam kasus linear). Grafik model linear ditampilkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Model umum power pada *semivariogram* di mana p adalah konstanta, h adalah jarak sampel (Sinclair and Blackwell,2004).

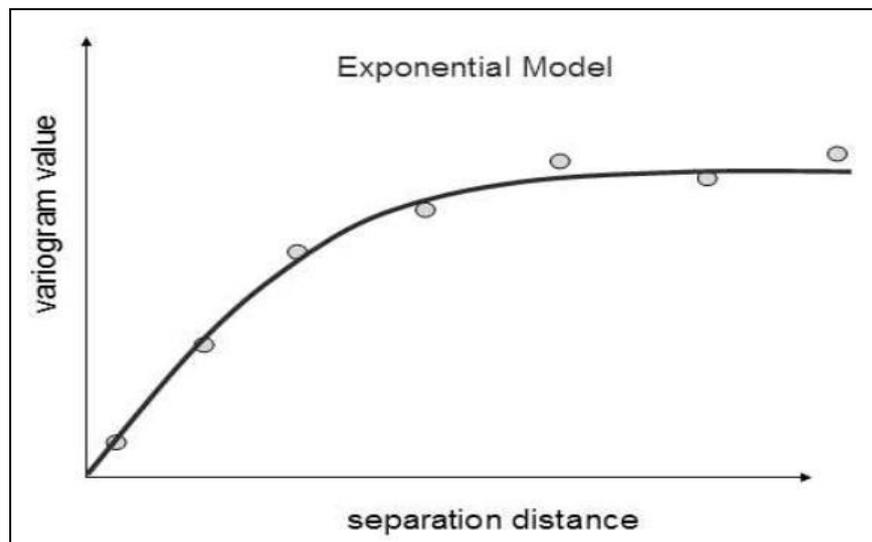
2. Model Eksponensial

Dalam model eksponensial terjadi peningkatan semivariogram yang curam dan nilai *sill* dicapai secara asimtotik. Nilai efektif *sill* diperoleh pada $h = a'$

3a. Model ini dinyatakan dalam persamaan matematis :

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)].$$

Model variogram eksponensial ditampilkan dalam Gambar 2.9.



Gambar 2. 9 Model *variogram eksponensial* (Coombes, 2008)

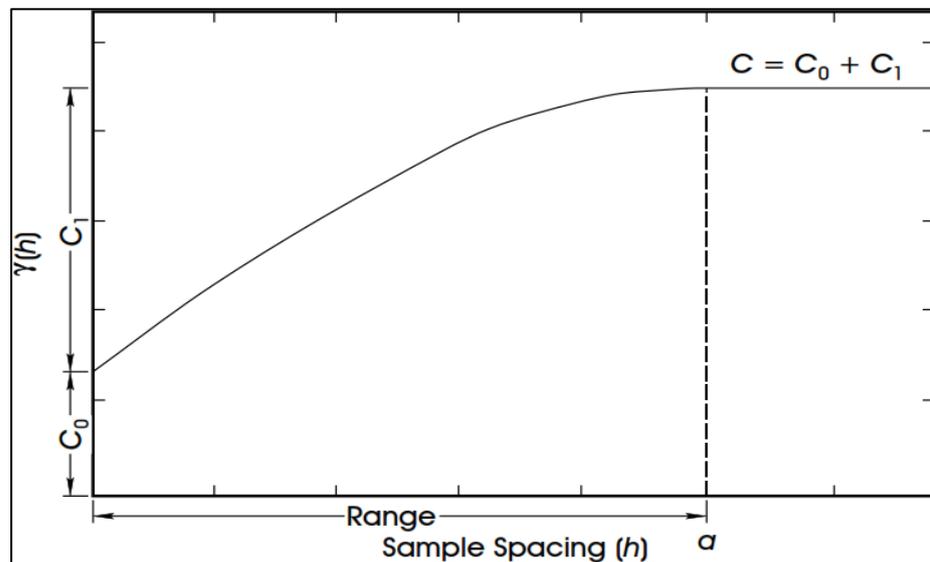
3. Model *Spherical* (Matheron)

Model *spherical* (matheron) merupakan model variogram yang paling umum digunakan dalam bidang aplikasi mineral (Sinclair and Blackwell, 2004).

Model *spherical* dicirikan dengan dua (2) komponen utama yaitu : komponen acak murni yang biasa disebut sebagai *nugget effect* (C_0) dan komponen struktur yang dicirikan dengan *range* (a) dari fungsi autokorelasi (Gambar 2.10). *Range* didefinisikan sebagai jarak di mana variabilitas rata - rata komponen struktur naik dari *nugget* (C_0) ke *sill* (C_1). Model *spherical* (matheron) dinyatakan dalam persamaan matematis sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad \text{for } h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C_1 \quad \text{for } h > a \end{aligned}$$

Di mana, $a = \text{range}$ variogram *spherical*, $C_0 = \text{nugget effect}$, $C_1 = \gamma(h) - C_0$.



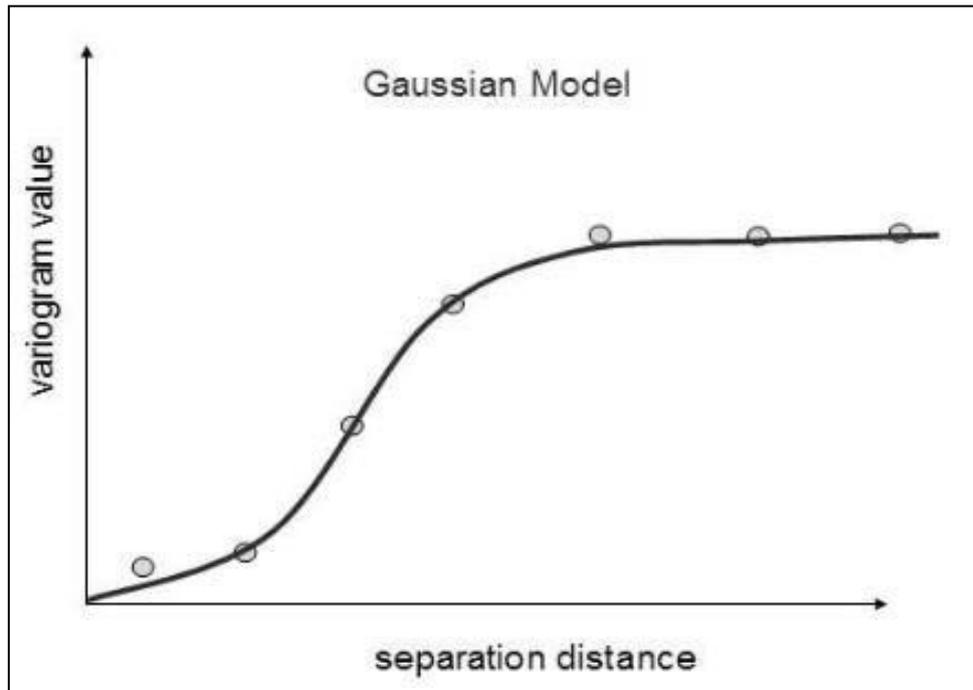
Gambar 2.10 Model *variogram spherical* (Sinclair and Blackwell, 2004)

4. Model Gaussian

Model gaussian memberikan model semivariogram yang relatif datar pada nilai gamma yang rendah (Gambar 2.11). Model gaussian memberikan nilai *sill* asimtotik dengan nilai *sill* didefinisikan oleh $h = a' = a \cdot 3^{1/2}$

Model gaussian dinyatakan dalam persamaan matematis :

$$\gamma(h) = C_0 + C [1 - \exp(-h^2/a^2)].$$



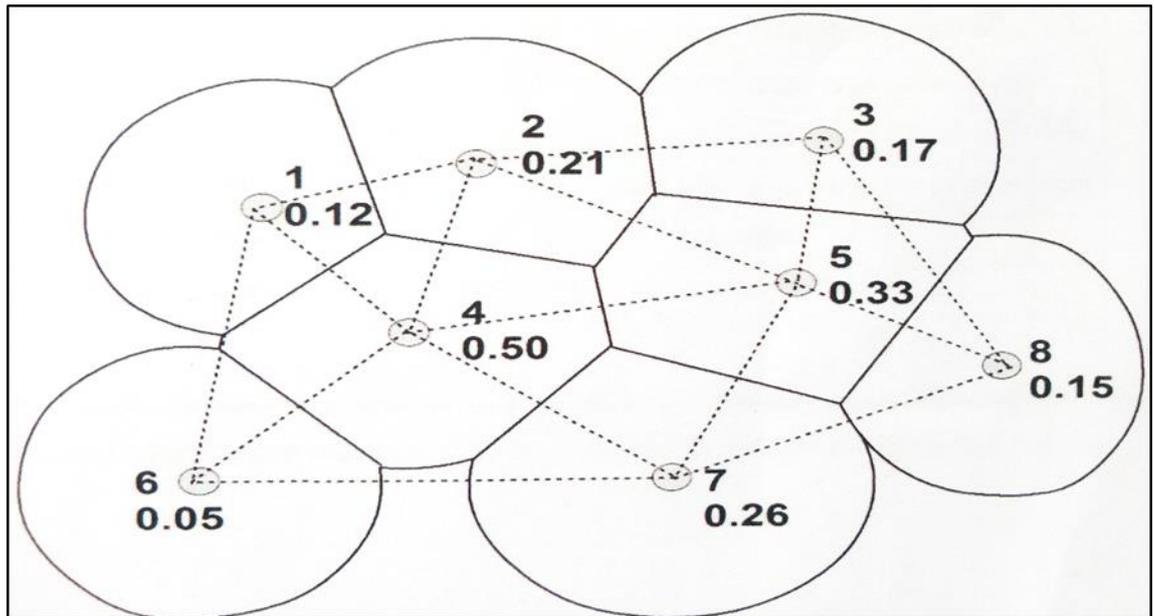
Gambar 2. 11 Model *variogram gaussian* (Coombes, 2008).

2.4 Metode Estimasi Sumberdaya

Metode untuk estimasi sumberdaya umumnya bergantung pada keadaan geologi endapan, metode eksplorasi, keakuratan data dan nilai koefisien variasi, manfaat serta tujuan estimasi sumberdaya. Dalam mengestimasi sumberdaya mineral biasanya digunakan berbagai metode seperti metode poligon, metode *inverse distance weighting* (IDW), dan metode *kriging*.

2.4.1 Metode Poligon

Metode poligon disebut juga metode daerah pengaruh (*area of influence*). Pada metode ini semua faktor ditentukan untuk suatu titik tertentu pada endapan mineral, diekstensikan sejauh setengah jarak dari titik di sekitarnya yang membentuk suatu daerah pengaruh. Batas daerah pengaruh terluar dari poligon ini bisa hanya sampai pada titik-titik bor terluar saja (*included area*), atau diekstensikan sampai sejauh setengah jarak (*extended area*) (Hartman, 1992).



Gambar 2. 12 Metode estimasi sumberdaya menggunakan poligon (Hartman, 1992).

Estimasi sumberdaya dengan metode poligon dapat dilakukan dengan:

1. Setiap lubang bor ditentukan suatu batas daerah pengaruh yang dibentuk oleh garis-garis berat antara titik tersebut dengan titik-titik terdekat di sekitarnya.
2. Masing-masing daerah atau blok diperlakukan sebagai suatu poligon yang mempunyai kadar dan ketebalan yang konstan yaitu sama dengan kadar dan ketebalan titik bor di dalam poligon tersebut.
3. Sumberdaya endapan diperoleh dengan menjumlahkan seluruh tonase tiap blok/ poligon, sedangkan kadar rata-ratanya dihitung memakai pembobotan tonase.

2.4.2 Metode *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Metode IDW merupakan suatu cara penaksiran yang telah memperhitungkan adanya hubungan letak ruang (jarak), merupakan kombinasi linear atau harga rata-rata pembobotan (*weighting average*) dari titik-titik data yang ada disekitarnya. Suatu cara penaksiran dimana harga rata-rata suatu blok merupakan suatu kombinasi linear atau harga rata-rata pembobotan (*weighting average*) dari data lubang bor di sekitar blok tersebut. Nilai data-data hasil taksiran tersebut merupakan nilai rata-rata

pembobotan (*weighting average*) dari data sampel yang telah ada (Bankes 2003). Dalam penaksiran data kadar dilakukan teknik-teknik pembobotan yang ada pada umumnya didasarkan pada:

1. Letak grid yang atau blok yang akan ditaksir terhadap letak data sampel.
2. Kecendrungan penyebaran kualitas data.
3. Orientasi setiap sampel yang menunjukkan hubungan letak ruang antar sampel.
4. Untuk mendapatkan efek penghalusan (pemerataan) data, dilakukan faktor pangkat. Pilihan dari pangkat yang digunakan (titik bor 1, titik bor 2, titik bor 3, dst) yang berpengaruh terhadap hasil taksiran. Semakin tinggi pangkat yang digunakan, hasilnya semakin mendekati metode poligon sampel terdekat.
5. Dalam metode ini, komputer memeriksa jarak antara sampel dari kumpulan blok dan menolak data yang berada diluar radius tertentu dan ditentukan dengan persamaan sebagai berikut (Annels, 1991).

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

dimana,

Z = kadar taksiran (%)

n = jumlah data

i = kadar ke-i (%)

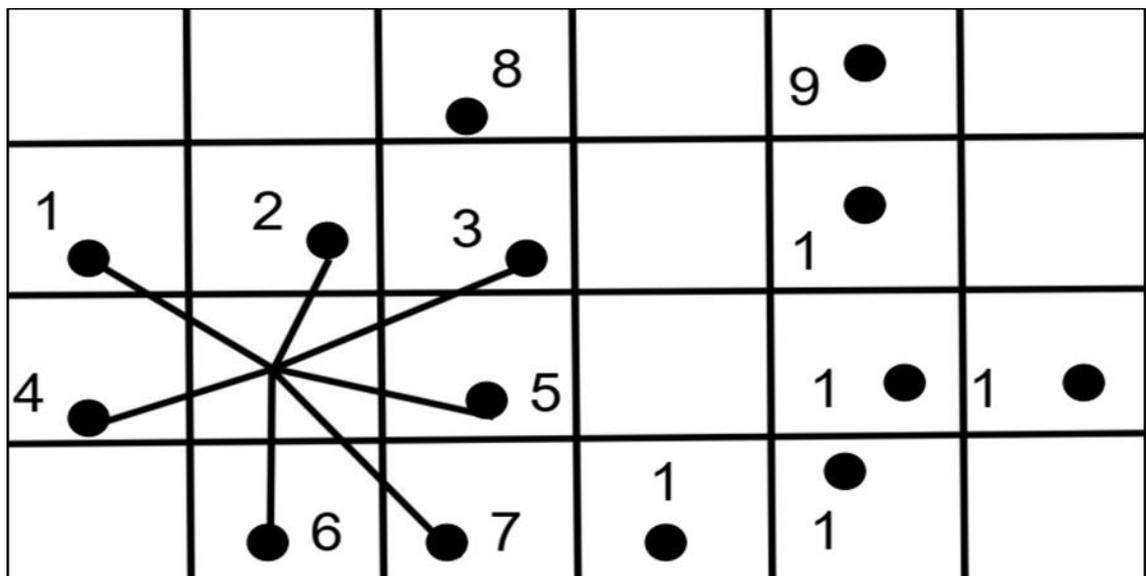
d_i = spasi antar titik taksiran dengan titik ke-i yang ditaksir (m)

k = pangkat (*script*)

Z_i = kadar awal (%)

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

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



Gambar 2. 13 Metode estimasi sumberdaya dengan IDW (Arifuddin Idrus, 2007).

Suatu penyederhanaan yang akan dilakukan dalam pembahasan IDW ini akan mempertimbangkan blok-blok lebih sebagai nilai titik dari pada sebagai volume dengan memperlakukan blok sebagai titik (*point*). Kadar blok dapat dihitung rata-rata berdasarkan jarak dari pusat blok ke titik sekelilingnya, apalagi blok ini dibagi menjadi blok-blok yang lebih kecil sehingga estimasinya dapat dilakukan untuk setiap sub blok dan hasilnya dapat dijumlahkan.

2.4.3 Metode *Kriging*

Pada tahun 1950, peneliti pertambangan bernama Daniel Gerhardus (DG)

Krige, merancang metode interpolasi untuk menentukan struktur bijih emas. Dia menginterpolasi suatu kandungan bijih emas berdasarkan data sampel. Dari sini *kriging* dijadikan sebuah nama metode interpolasi atas penemuannya tersebut.

G. Matheron memperkenalkan metode *kriging* dalam menonjolkan metode khusus dalam *moving average* terbobot (*weighted moving average*) yang meminimalkan variansi dari hasil estimasi. *Kriging* menghasilkan *best linear unbiased estimation* (BLUE) dari variabel yang ingin diketahui nilainya. Hasil prediksi *kriging* lebih akurat daripada metode regresi. Sebab, metode ini mampu membaca *error* yang berkorelasi, sehingga dapat diketahui nilai kedekatannya (Kleijnen *and* Van Beers, 2004).

Estimator kriging $\hat{Z}(s)$ dapat dirumuskan sebagai berikut (Bohling, 2005):

$$\hat{Z}(s)-m(s)=\sum_{a=1}^n \lambda_a \left(Z(s_i)-m(s_i) \right) \quad (2)$$

dimana,

s_i, s_i : lokasi untuk estimasi dan salah satu lokasi dari data yang berdekatan, dinyatakan dengan i

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

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

λ_i : faktor bobot

n : banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi.

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

Tujuan *kriging* adalah untuk menentukan nilai λ_i yang meminimalkan variansi

pada estimator, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma^2 = \text{var} [\hat{Z}(s) - (Z)(s)] \quad (3)$$

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

1. *Simple Kriging*

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

2. *Ordinary Kriging*

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

3. *Universal Kriging*

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

2.4.4 Metode *Ordinary Kriging*

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

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

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(s_1, s_1) & \gamma(s_1, s_2) & \dots & \gamma(s_1, s_n) & 1 \\ \gamma(s_2, s_1) & \gamma(s_2, s_2) & \dots & \gamma(s_2, s_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(s_n, s_1) & \gamma(s_n, s_2) & \dots & \gamma(s_n, s_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \gamma(s_1, s_0) \\ \gamma(s_2, s_0) \\ \vdots \\ \gamma(s_n, s_0) \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

dimana,

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

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

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

1. Asumsi Model

$$Z(s) = \mu + e(s), \quad s \in R \text{ dan } \mu \text{ tidak diketahui} \quad (5)$$

2. Asumsi Prediksi

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s) \text{ dengan } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (6)$$

dimana,

$Z(s)$: peubah acak bebas

μ : ekspektasi peubah acak $Z(s)$

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

R : bilangan *real*

N : banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi

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

merupakan suatu konstanta maka $E Z(s)=Z(s)$ terdapat *estimator error* $e(s)$, pada setiap lokasi merupakan perbedaan antara nilai estimasi $\hat{Z}(s)$ dengan nilai sebenarnya $Z(s)$ yang dinyatakan sebagai berikut:

$$e(s)=\hat{Z}(s) - Z(s) \quad (7)$$

dimana,

$e(s)$: *estimator error*

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

$Z(s)$: nilai sebenarnya

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

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

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

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

$$E e(s)= E \hat{Z}(s)-E Z(s) \quad (8)$$

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

$$E \hat{Z}(s)=Z(s) \quad (9)$$

2.5.5. *Global Estimation Variance (GEV)*

Varians estimasi adalah besarnya perbedaan yang timbul antara rata-rata nilai yang sudah diketahui dari sampel-sampel yang diambil dari suatu populasi terhadap rata-rata nilai yang belum diketahui dari seluruh sampel di dalam populasi tersebut, di mana rata-rata nilai yang belum diketahui ini ditaksir berdasarkan rata-rata nilai yang sudah diketahui dari sampel-sampel tersebut dengan menggunakan variogram eksperimental dan varians dispersi dari rata-rata nilai yang sudah

diketahui dari sampel-sampel tersebut. Untuk menghitung varians estimasi menggunakan rumus di bawah ini:

$$\sigma_e^2 = 2\bar{\gamma}(S, V) - \bar{\gamma}(V, V) - \bar{\gamma}(S, S) \quad (2)$$

dimana σ_e^2 adalah varians estimasi, $\bar{\gamma}(S, V)$ adalah nilai variogram rata-rata titik ke blok, $\bar{\gamma}(V, V)$ adalah nilai variogram rata-rata blok ke blok, dan $\bar{\gamma}(S, S)$ adalah nilai variogram titik ke titik.

Untuk menghitung Global Estimation Variance (GEV) menggunakan rumus di bawah ini:

$$GEV = \frac{\sigma_e^2}{N}$$

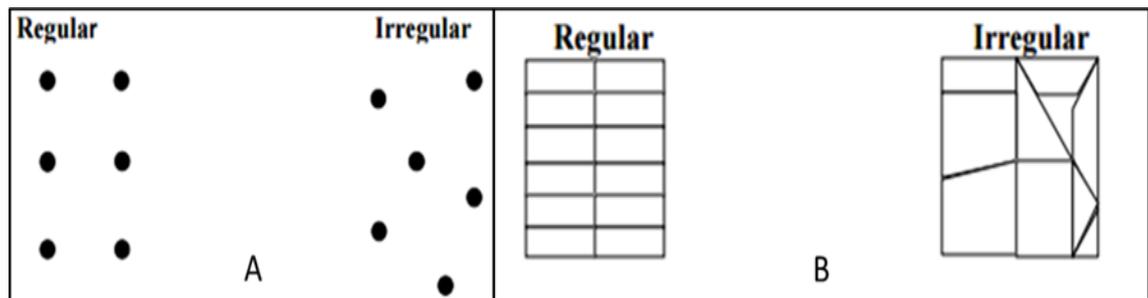
dimana GEV adalah Global Estimation Variance, σ_e^2 adalah varians estimasi, dan N adalah jumlah blok di suatu luasan daerah atau area. Untuk luas area dan jumlah N pada setiap skenario spasi bor pada daerah penelitian.

2.5 Data Spasial

Data spasial adalah data yang diperoleh dari hasil pengukuran suatu lokasi. Data spasial merupakan data dependen karena berasal dari lokasi spasial yang berbeda yang mengindikasikan ketergantungan antara nilai pengukuran dengan lokasi (Cressie, 1993).

Data spasial memiliki lokasi spasial yang beraturan (*regular*) dan tak beraturan (*irregular*). Data spasial merupakan salah satu model data dependen (variabel tak bebas), karena data spasial dikumpulkan dari lokasi berbeda yang mengindikasikan ketergantungan antara pengukuran data dan lokasi. Data spasial mempunyai dua bagian penting yang membuatnya berbeda dari data yang lain, yaitu informasi lokasi (spasial) dan informasi deskriptif (atribut). Data spasial dibagi menjadi tiga tipe mendasar yaitu data geostatistik (*geostatistical data*), data area (*lattice area*), dan pola

titik (*point pattern*) (Cressie, 1993). Berikut merupakan gambar beserta penjelasannya (Gambar 2.4).



Gambar 2. 14 (A) Data geostatistik (B) Data area.

1. Data geostatistik (*geostatistical*) mengarah pada data sampel yang berupa titik, baik beraturan (*regular*) atau tak beraturan (*irregular*) dari suatu distribusi spasial kontinu.
2. Data area (*lattice data*) terdiri dari dua bentuk, yaitu berupa *unit regular* dan *unit irregular* yang didukung pula oleh informasi lingkungan dan dihubungkan dengan batas-batas tertentu. Data area sendiri berhubungan dengan wilayah spasial, merupakan kumpulan data atribut diskrit yang merupakan hasil pengukuran pada wilayah tertentu. Data area merupakan sebuah konsep dari garis tepi dan persekitaran (*neighbour*).
3. Pola titik (*point pattern*) adalah pola yang muncul dari variabel yang dianalisis pada lokasi kejadian. Sampel yang digunakan adalah sampel yang tak beraturan (memiliki jarak yang berbeda). Lokasi pola titik diperoleh berdasarkan pada posisi koordinat kartesius (x, y) dari titik yang diamati sedangkan data pola titik spasial diperoleh dari informasi atribut pada objek yang bersesuaian. Hal penting pada analisis data pola titik adalah untuk mengetahui hubungan ketergantungan antar titik. Maksudnya adalah untuk mengetahui apakah lokasi titik-titik yang menjadi objek penelitian membentuk kluster atau regular, sehingga dapat dilihat apakah terjadi ketergantungan antar titik atau tidak.