

SKRIPSI

ESTIMASI SUMBERDAYA ENDAPAN BIJIH EMAS EPITERMAL SULFIDASI TINGGI MENGGUNAKAN METODE ORDINARY KRIGING

(Studi Kasus: Blok X, *Site* Bakan, PT J Resources Bolaang Mongondow, Kabupaten
Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara)

Disusun dan diajukan oleh:

HUSNUL KHATIMA
D111 19 1006



PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK PERTAMBANGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024



LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

ESTIMASI SUMBERDAYA ENDAPAN BIJIH EMAS EPITERMAL SULFIDASI TINGGI MENGGUNAKAN METODE ORDINARY KRIGING

(Studi Kasus: Blok X, Site Bakan, PT J Resources Bolaang Mongondow, Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara)

Disusun dan diajukan oleh

HUSNUL KHATIMA
NIM D111191006

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 8 Mei 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

Ketua Program Studi,

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



PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : HUSNUL KHATIMA
NIM : D111 19 1006
Program Studi : TEKNIK PERTAMBANGAN
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul:

ESTIMASI SUMBERDAYA ENDAPAN BIJIH EMAS EPITERMAL
MENGUNAKAN METODE *ORDINARY KRIGING*
(Studi Kasus: Blok X, Site Bakan, PT J Resources Bolaang Mongondow, Kabupaten
Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara)

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

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

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

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

Gowa, 8 Mei 2023

Yang Menyatakan



HUSNUL KHATIMA
D111 19 1006



ABSTRAK

HUSNUL KHATIMA. Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Emas Epitermal Menggunakan Metode *Ordinary Kriging* (Studi Kasus: Blok X, Site Bakan, PT J Resources Bolaang Mongondow, Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara), (dibimbing oleh Dr. Ir. Irzal Nur, M.T. dan Dr. phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T.).

Berdasarkan informasi dari Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral, cadangan emas di Indonesia kira-kira 3.000 ton dengan sumber dayanya mencapai 6.000 ton. Data Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sulawesi Utara menunjukkan, terdapat 46 IUP yang tersebar di Sulawesi Utara dengan komoditas terbanyak yang dikelola adalah emas dan salah satu perusahaan yang bergerak di bidang usaha pertambangan emas adalah PT. J Resources Bolaang Mongondow yang sampai saat ini masih memperluas kegiatan eksplorasi dengan mencari sumberdaya emas yang memiliki nilai ekonomis. Tujuan dari penelitian ini yaitu melakukan analisis univariat terhadap kadar Au pada titik pengeboran serta mengetahui hasil estimasi dan klasifikasi sumberdaya endapan bijih emas di Blok X PT J Resources Bolaang Mongondow, *site* Bakan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu metode *ordinary kriging* (OK) menggunakan bantuan *software Micromine 2023*. Hasil analisis univariat kadar Au setelah *top cut* dan komposit didapatkan jumlah sampel 1.270, nilai minimum 0,01 g/t, nilai maksimum 4,78 g/t, *mean* 0,28, *median* 0,17, varians 0,17, dan koefisien varians 1,46. Hasil analisis variogram didapatkan *range* arah strike 21,3 m, *range* arah dip 17,6 m, *range* arah pitch 19,1 m, nilai *nugget effect* sebesar 0,2, dan *sill* sebesar 2,1. Hasil estimasi menggunakan metode *ordinary kriging* didapatkan sumberdaya terukur sebesar 124.492,040 ton dengan kadar Au 0,29 g/t, sumberdaya tertunjuk sebesar 1.098.415,610 ton dengan kadar Au 0,35 g/t, dan sumberdaya tereka sebesar 4.476.670,320 ton, sehingga total sumberdaya bijih emas di Blok X sebesar 5.699.577,970 ton dengan kadar 0,30 g/t.

Kata Kunci: *Ordinary Kriging*, Emas, Estimasi Sumberdaya, *Micromine 2023*



ABSTRACT

HUSNUL KHATIMA. *Resource Estimation of Epithermal Gold Ore Deposits Using Kriging Methods (Case Study: Block X, PT J Resources Bolaang Mongondow, Site Bakan, Bolaang Mongondow Regency, North Sulawesi Province), (supervised by, Dr. Ir. Irzal Nur, M.T. and Dr. Phil. Nat. Sri Widodo, S.T., M.T.).*

Based on information from the Center for Data and Information Technology on Energy and Mineral Resources, gold reserves in Indonesia are approximately 3,000 tonnes with resources reaching 6,000 tonnes. Data from the North Sulawesi Province Energy and Mineral Resources Service shows that there are 46 IUP spread across North Sulawesi with the largest commodity managed being gold and one of the companies operating in the gold mining business is PT. J Resources Bolaang Mongondow is currently still expanding its exploration activities by looking for gold resources that have economic value. The aim of this research is to carry out a univariate analysis of the Au content at the drilling point and determine the results of the estimation and classification of gold ore deposit resources in Block X PT J Resources Bolaang Mongondow, Bakan site. The method used in this research is the ordinary kriging (OK) method using Micromine 2023 software. The results of univariate analysis of Au content after top cut and composite showed a sample size of 1,270, minimum value 0.01 g/t, maximum value 4.78 g/t, mean 0.28, median 0.17, variance 0.17, and coefficient of variance 1.46. The results of the variogram analysis showed that the strike direction range was 21.3 m, the dip direction range was 17.6 m, the pitch direction range was 19.1 m, the nugget effect value was 0.2, and the sill was 2.1. The estimation results using the ordinary kriging method obtained measured resources of 124,492,040 tonnes with an Au content of 0.29 g/t, indicated resources of 1,098,415,610 tonnes with an Au content of 0.35 g/t, and inferred resources of 4,476,670,320 tonnes, so the total ore resources gold in Block X was 5.699.577,970 tones with an Au content of 0.30 g/t.

Keywords: Ordinary Kriging, Gold, Resource Estimation, Micromine 2023



DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
ABSTRAK	iii
ABSTRACT.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	ix
DAFTAR LAMPIRAN.....	x
KATA PENGANTAR	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	3
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	3
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Geologi Regional	5
2.2 Endapan Epitermal.....	12
2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral.....	13
2.4 Analisis Geostatistik	15
2.5 Estimasi Sumberdaya.....	22
2.6 <i>Kriging</i> dan <i>Ordinary Kriging</i>	24
BAB III METODE PENELITIAN.....	28
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	28
3.2 Variabel Penelitian.....	29
3.3 Alat Penelitian.....	29
3.4 Teknik Pengumpulan Data.....	30
3.5 Sumber Data.....	30
3.6 Pengolahan Data	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Pemodelan Geologi	43
4.2 Analisis Statistik dan Geostatistik.....	44
4.3 Hasil Analisis Semivariogram <i>Map</i>	49
4.4 Hasil Analisis Variogram.....	51
4.5 Estimasi Sumberdaya.....	53
4.6 Validasi Model	54
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	57
DAFTAR PUSTAKA	59



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1	Geomorfologi dan struktur regional Sulawesi bagian Utara. Daerah Bakan ditunjukkan dengan simbol bintang berwarna kuning.	5
Gambar 2	Tatanan tektonik Busur Sulawesi Utara. Lengan utara memanjang dari 1°S yang meliputi leher Sulawesi dan Busur Sulawesi Utara. Inset peta menunjukkan ketiga lempeng besar yang berkontribusi terhadap evolusi tektonik Kenozoikum di Asia Tenggara. Lokasi eksplorasi ditunjukkan dengan kotak berwarna merah.	6
Gambar 3	Tipe alterasi Bakan.....	9
Gambar 4	Distribusi tipe dan distrik mineralisasi di Lengan Utara Sulawesi	10
Gambar 5	Peta sebaran lokasi-lokasi bekas tambang emas, perak dan logam dasar serta prospek-prospek endapan emas di Lengan Utara Pulau Sulawesi.	11
Gambar 6	(a) Batuan <i>dacitic lithic tuff</i> (b) batuan <i>hydrothermal breccia</i>	11
Gambar 7	Model fluida sulfidasi tinggi dan rendah.....	13
Gambar 8	Hubungan hasil eksplorasi, sumberdaya dan cadangan mineral	15
Gambar 9	Komponen penyusun variogram	17
Gambar 10	Pencarian pasangan data dalam perhitungan variogram eksperimental	17
Gambar 11	Semivariogram eksperimental berdasarkan jarak <i>lag</i>	18
Gambar 12	Semivariogram eksperimental dengan <i>sawtooth</i> dan <i>smooth curve</i>	18
Gambar 13	Contoh model variogram sferis	20
Gambar 14	Contoh model variogram eksponensial	21
Gambar 15	Contoh model variogram <i>hole-effect</i>	22
Gambar 16	Peta tunjuk lokasi penelitian	28
Gambar 17	Peta Izin Usaha Pertambangan.....	29
Gambar 18	Tampilan pembuatan <i>database</i> pada <i>Micromine</i> 2014	33
Gambar 19	<i>Display Drillhole</i> pada <i>Micromine</i> 2014.....	34
Gambar 20	<i>String</i> zona alterasi pada <i>Micromine</i> 2014.....	34
Gambar 21	<i>String</i> zona mineralisasi pada <i>Micromine</i> 2014	35
Gambar 22	Tampilan <i>assign wireframe</i> pada <i>Micromine</i> 2014.....	36
Gambar 23	Tampilan <i>Top Cut Wireframe</i> pada <i>Micromine</i> 2014	36
Gambar 24	Tampilan <i>Composite Wireframe</i> pada <i>Micromine</i> 2014.	37
Gambar 25	Tampilan semivariogram <i>map</i> pada <i>Micromine</i> 2014.....	38
Gambar 26	Nilai satu <i>cell</i> ditentukan oleh <i>directional overlap</i> dan <i>lag overlap</i> , dimana pairs dimasukkan ke dalam semua <i>cell</i> yang ada pada grup 3x3.....	38
Gambar 27	Tampilan <i>variogram</i> pada <i>Micromine</i> 2014.....	39
Gambar 28	Tampilan blok model kosong pada <i>Micromine</i> 2023.....	40
Gambar 29	Tampilan <i>ellipsoid</i> yang digunakan pada <i>running</i> blok model pada <i>Micromine</i> 2023	41
Gambar 30	Diagram alir penelitian.....	42
Gambar 31	Bentuk penampang lubang bor A-A' yang menampilkan kedalaman dan nilai kadar Au.	44
Gambar 32	Tampilan 3D <i>solid ore</i> Blok X.....	44
Gambar 33	Histogram kadar Au pada <i>drillhole</i>	45



Gambar 34 Histogram kadar Au pada <i>drillhole</i> setelah <i>top cut</i>	47
Gambar 35 Histogram kadar Au pada <i>drillhole</i> setelah <i>top cut</i> dan <i>composite</i>	48
Gambar 36 Semivariogram <i>map (strike)</i> mengarah ke NE - SW.....	49
Gambar 37 Semivariogram <i>map (dip)</i> mengarah ke NNE – SSE.....	50
Gambar 38 Semivariogram <i>map (pitch)</i> mengarah NE - SE.....	50
Gambar 39 Variogram (<i>strike</i>).....	51
Gambar 40 Variogram (<i>dip</i>).....	52
Gambar 41 Variogram (<i>thickness</i>).....	52
Gambar 42 Blok model hasil <i>ordinary kriging</i> dengan kadar di bawah 0,1 g/t sampai di atas 2,0 g/t.....	53
Gambar 43 Klasifikasi material <i>ore</i> dan <i>waste</i> hasil estimasi menggunakan metode <i>ordinary kriging</i>	53
Gambar 44 Perbandingan data kadar Au <i>ordinary kriging</i> dengan data kadar <i>drillhole</i> sisi <i>easting</i>	55
Gambar 45 Perbandingan data kadar Au <i>ordinary kriging</i> dengan data kadar <i>drillhole</i> sisi <i>northing</i>	55
Gambar 46 Perbandingan data kadar Au <i>ordinary kriging</i> dengan data kadar <i>drillhole</i> sisi <i>elevation</i>	56



DAFTAR TABEL

Tabel 1 Contoh data <i>assay</i>	30
Tabel 2 Contoh data <i>collar</i>	31
Tabel 3 Contoh data <i>survey</i>	31
Tabel 4 Contoh data <i>geology</i>	32
Tabel 5 Hasil analisis statistik univariat pada data <i>assay</i>	46
Tabel 6 Hasil analisis statistik univariat pada data <i>assay</i> setelah <i>composite</i>	47
Tabel 7 Hasil analisis statistik univariat pada data <i>assay</i> setelah <i>composite</i> dan <i>top cut</i>	49
Tabel 8 Hasil estimasi dengan metode <i>ordinary kriging</i>	54



DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
Ha	Hektar
IUP	Izin Usaha Pertambangan
PT	Perseroan Terbatas
OK	<i>Ordinary Kriging</i>
KCMI	Komite Cadangan Mineral Indonesia
JORC	<i>Joint Ore Reserves Committee</i>
pH	Potential Hydrogen
BLUE	<i>Best Linear Unbiased Estimator</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
COG	<i>Cut-off Grade</i>
Au	Aurum
NE	<i>North East</i>
SE	<i>South East</i>
S	<i>South</i>
COV	<i>Coefficient of Variation</i>



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Sebaran Titik Bor Blok X.....	60
Lampiran 2 Peta Alterasi Permukaan Blok X.....	60
Lampiran 3 <i>Ore Zone</i>	60
Lampiran 4 <i>Alteration Section A-A'</i>	60
Lampiran 5 <i>Alteration Section B-B'</i>	60
Lampiran 6 <i>Overall Blockmodel</i> Blok X	60
Lampiran 7 <i>Overall Blockmodel Resources Category</i> Blok X.....	60
Lampiran 8 <i>Overall Blockmodel</i> Blok X <i>Section A-A'</i>	60
Lampiran 9 <i>Overall Blockmodel</i> Blok X <i>Section B-B'</i>	60



KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim.

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan judul “Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Emas Epitermal Menggunakan Metode *Ordinary Kriging* (Studi Kasus: Blok X, *Site* Bakan, PT J Resources Bolaang Mongondow, Kabupaten Bolaang Mongondow, Provinsi Sulawesi Utara),”

Tugas akhir ini disusun sebagai syarat mendapatkan gelar sarjana di Departemen Teknik Pertambangan, Universitas Hasanuddin. Penulis menyadari dengan segala kerendahan hati bahwa dalam proses penulisan banyak mengalami kendala, namun berkat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak serta berkat dari Tuhan Yang Maha Esa, penulis dapat melalui dan mengatasi kendala-kendala tersebut.

Selama proses penyusunan laporan banyak hal yang telah dilakukan dan dibantu oleh berbagai pihak sehingga laporan ini dapat disusun dengan sebaik mungkin. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT J Resources Bolaang Mongondow selaku perusahaan yang telah menerima penulis untuk melaksanakan Tugas Akhir, Bapak Arief Hermawan selaku *General Manager Mine Geology Department* yang telah memberikan kesempatan penulis untuk melaksanakan Tugas Akhir di *site* Bakan dan juga Bapak Hermadi selaku pembimbing yang telah membantu mengarahkan serta membantu selama Tugas Akhir dan penyusunan laporan.

Penulis juga berterima kasih kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, M. T., selaku kepala Laboratorium Eksplorasi Mineral dan pembimbing utama Tugas Akhir dan Bapak Dr. phil. nat. Sri Widodo, S.T., M.T. selaku pembimbing kedua yang telah membimbing dan mengarahkan selama Tugas Akhir dan penyusunan laporan dan



Dosen Departemen Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas lin yang telah memberikan ilmu yang sangat bermanfaat sampai pada chir.

Tidak lupa juga kepada kedua orang tua saya yang telah memberikan banyak dukungan moril dan materil selama kegiatan Tugas Akhir dan penyusunan laporan Tugas Akhir hingga selesai. Lalu juga saudara IGNEOUZ 19 (Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin Angkatan 2019) yang telah memberikan banyak dukungan, bantuan dan semangat kepada penulis. Penulis menyadari banyak kekurangan yang mungkin terdapat dalam laporan Tugas Akhir ini. Terlepas dari hal itu, penulis berharap bahwa laporan Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bukan hanya untuk penulis sendiri tapi juga dapat bermanfaat bagi para pembaca.

Amin ya rabbal alamin.

Gowa, 8 Mei 2024

Husnul Khatima



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sumberdaya mineral adalah suatu konsentrasi atau keterjadian dari material yang memiliki nilai ekonomi pada atau di atas kerak bumi, dengan bentuk, kualitas dan kuantitas tertentu yang memiliki keprospekan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis (KCMI, 2017). Indonesia merupakan kepulauan yang berada pada zona pertemuan Lempeng Eurasia dan Lempeng Indoaustralia, berakibat munculnya jajaran busur magmatik. Busur magmatik tersebut meliputi Busur Besar Sunda–Banda, Busur Sulawesi Utara, Busur Halmahera, dan Busur Papua (Amsah & Umar, 2020). Posisi geologis ini menjadikan Indonesia kaya akan sumberdaya mineral, salah satunya adalah mineral emas. Berdasarkan informasi dari Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral (2013), cadangan emas di Indonesia kira-kira 3.000 ton dengan sumber dayanya mencapai 6.000 ton sedangkan berdasarkan data dari *United States Geological Survey* (USGS) cadangan logam emas di seluruh dunia mencapai 57.000 ton (Jewell and Kimball, 2017).

Provinsi Sulawesi Utara merupakan salah satu Provinsi di Indonesia yang memiliki sumber daya alam Mineral dan Batubara. Data Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sulawesi Utara menunjukkan, terdapat 46 IUP (Izin Usaha Pertambangan) dan 6 KK (Kontrak Karya) yang tersebar di Sulawesi Utara dengan komoditas terbanyak yang dikelola adalah emas. Data potensi Sumber Daya Mineral dan Migas Provinsi Sulawesi Utara, emas yang terdata kurang lebih 51.150.448 Ton yang tersebar di wilayah Minahasa Selatan, Minahasa Tenggara, Minahasa Utara dan Bolaang Mongondow (Wowiling, et al., 2021).

PT J Resources Bolaang Mongondow (JRBM) anak perusahaan J Resources Nusantara (JRN) adalah salah satu perusahaan yang bergerak di bidang usaha pertambangan emas dengan metode tambang terbuka. PT J Resources Bolaang

low (JRBM) merupakan perusahaan nasional Indonesia pemegang kontrak ierasi ke-6 dengan 2 lokasi operasi-produksi dan beberapa lokasi prospek wilayah Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara salah satunya di Blok



Bakan. Perusahaan berkomitmen untuk terus melanjutkan eksplorasi di Blok Bakan dan sekitarnya untuk menambah perolehan sumber daya mineral dan cadangan bijih baru yang secara langsung dapat memperpanjang umur operasi Tambang Emas Bakan, disamping menemukan potensi - potensi lainnya untuk membangun operasi - operasi tambang yang baru lainnya.

Eksplorasi merupakan salah satu tahapan yang perlu dilakukan dalam mencari sumberdaya emas yang memiliki nilai ekonomis. Aktifitas eksplorasi dalam konteks sumberdaya emas perlu mempertimbangkan dua aspek, yaitu aspek teknis dan aspek ekonomis. Kedua aspek tersebut merupakan langkah awal untuk mengevaluasi kegiatan eksplorasi, apakah sumberdaya emas tersebut layak atau tidak secara ekonomis untuk ditambang. Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan eksplorasi tambang yang mengkaji aspek teknis terkait penaksiran sumberdaya emas berdasarkan metode geostatistika. Metode ini merupakan bagian dari statistika yang mempertimbangkan kadar sebagai hasil pengesaian yang merupakan variabel spasial dalam struktur spasial (Kurniawan dan Amri, 2019). Beberapa metode digunakan untuk penaksiran sumberdaya emas, tetapi pada penelitian ini penaksiran menggunakan metode *ordinary kriging*. *Kriging* dikembangkan oleh D.L. Krige untuk memperkirakan nilai distribusi bijih tambang berdasarkan data dari beberapa lokasi sampel. Pada perkembangannya banyak metode kriging yang dikembangkan seperti *simple kriging*, *ordinary kriging*, dan *universal kriging*. Namun, pada penelitian ini akan dibahas tentang metode *ordinary kriging* karena data memiliki rata-rata populasi dan *trend* yang belum diketahui.

Berdasarkan latar belakang di atas, maka dilakukan penelitian dengan mengangkat judul “Estimasi Sumberdaya Endapan Bijih Emas Epitermal Sulfidasi Tinggi di Blok X Menggunakan Metode *Ordinary Kriging*, studi kasus *Site* Bakan PT J Resources Bolaang Mongondow Sulawesi Utara”.

1.2 Rumusan Masalah



masalah dari penelitian ini sesuai dengan latar belakang di atas yaitu:
 dimana analisis univariat terhadap kadar Au terhadap titik hasil pengeboran blok X PT J Resources Bolaang Mongondow?

2. Bagaimana analisis semivariogram *map* dan variogram terhadap kadar Au terhadap titik hasil pengeboran di Blok X PT J Resources Bolaang Mongondow?
3. Bagaimana klasifikasi dan hasil estimasi sumberdaya bijih emas berdasarkan *Cut Off Grade* yang telah ditentukan?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Tujuan dari dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Menganalisis kadar Au secara univariat terhadap titik hasil pengeboran di Blok X PT J Resources Bolaang Mongondow.
2. Menganalisis semivariogram *map* dan variogram kadar Au terhadap titik hasil pengeboran di Blok X PT J Resources Bolaang Mongondow.
3. Mengestimasi sumberdaya bijih emas berdasarkan *Cut Off Grade* yang telah ditentukan.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Manfaat dari dilakukannya penelitian ini yaitu:

1. Perusahaan
Memberikan hasil dan masukan terhadap estimasi sumberdaya kepada perusahaan dalam mengestimasi sumberdaya emas menggunakan metode *ordinary kriging*.
2. Akademi
Penelitian ini dapat dijadikan sebagai referensi dalam menambah wawasan mengenai metode estimasi sumberdaya menggunakan metode *ordinary kriging* endapan emas khususnya bagi mahasiswa Teknik Pertambangan.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Ruang lingkup dari penelitian ini terbatas pada salah satu blok dari IUP PT J Resources Bolaang Mongondow, *site* Bakan, Kabupaten Bolaang Mongondow, Sulawesi Utara. Blok ini masih dalam tahap eksplorasi sehingga data-data, nama blok, dan nama titik bor tidak dapat di cantumkan secara spesifik.



Data bor yang di dapatkan akan dilakukan analisis dan diestimasi menggunakan metode *ordinary kriging* (OK) dengan aplikasi *Micromine 2023*.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geologi Regional

Bakan terletak di bagian Selatan dari lengan utara Pulau Sulawesi. Geologi regional Sulawesi Utara di dominasi oleh batuan vulkanik berumur Kenozoikum dan berasosiasi dengan batuan terobosan (intrusi) yang bergabung membentuk busur kepulauan. Busur ini diyakini menjadi lebih tebal dan batuan dasarnya adalah batuan kerak samudera. Busur ini terbentuk selama pembentukan Laut Sulawesi pada masa Eosen (Van Leeuwen and Muharjo, 2005).

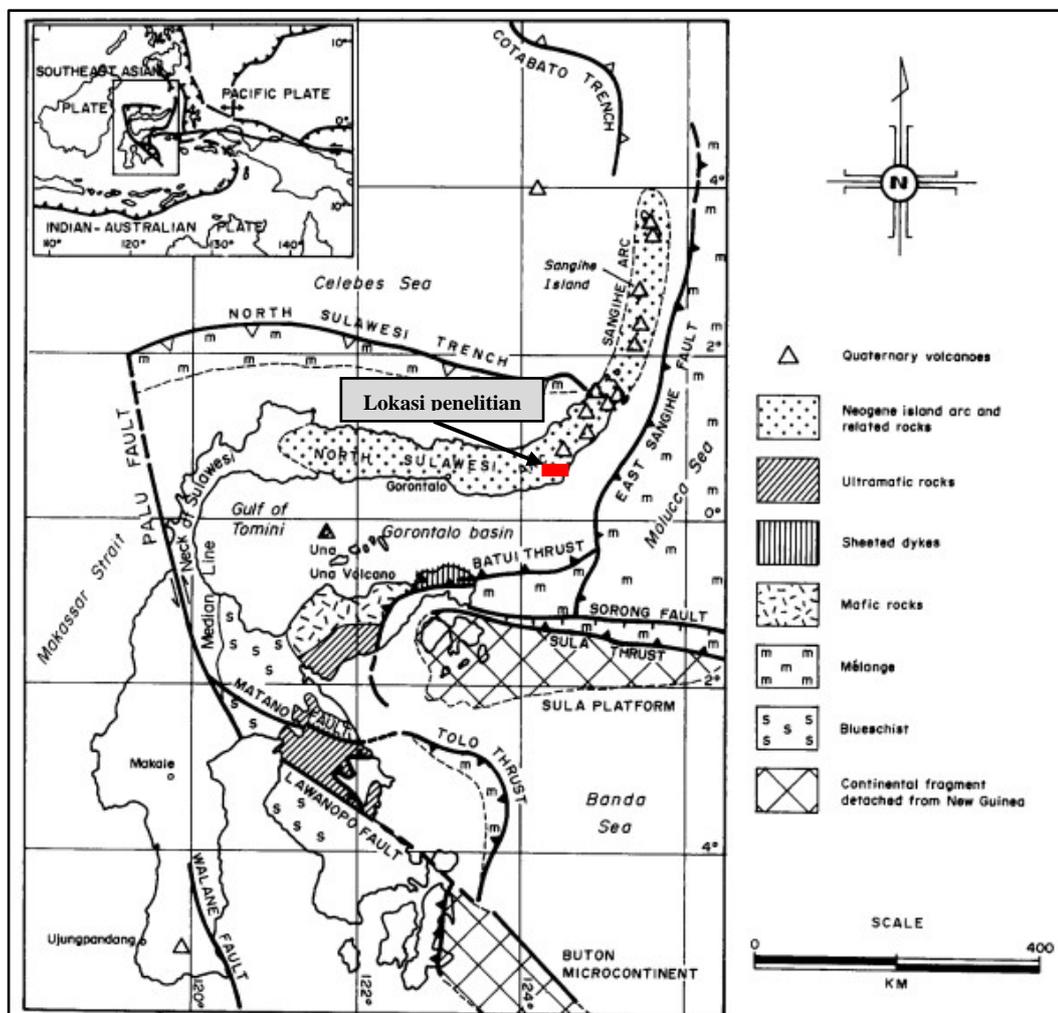
Geomorfologi daerah Sulawesi Utara diterangkan oleh Van Leeuwen dan Pieters (2011) secara umum merupakan morfologi pegunungan yang memiliki ketinggian hingga mencapai 2000 m di atas permukaan laut. Bentang lahan dari daerah Sulawesi Utara di dominasi oleh kehadiran pegunungan yang secara umum memanjang dengan arah NW-SE dan NNE-SSW dan kerucut-kerucut gunung api yang sebagian/telah tererosi. Beberapa daerah juga terdapat adanya graben yang menyerupai depresi. Daerah Geomorfologi dan struktur regional Sulawesi bagian Utara dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Geomorfologi dan struktur regional Sulawesi bagian Utara. Daerah Bakan ditunjukkan dengan simbol kotak berwarna merah.



Daerah Bakan dalam skala yang lebih rinci dicirikan oleh kehadiran morfologi berupa kelurusan punggung berarah NNE-SSW dan NW-SE serta depresi yang disebut depresi Kotamobagu. Depresi Kotamobagu merupakan depresi yang berupa graben dengan arah ENE-WSW. Depresi ini terbentuk akibat dari adanya pelepasan gaya setelah kompresi Neogen yang menghasilkan gerakan gravitasi besar-besaran pada daerah tersebut. Akibat dari adanya tunjaman Sangihe berarah E-W pula, di sepanjang depresi Kotamobagu muncul gunung api yang dipercaya membawa mineralisasi di daerah Bakan (Kavalieris, Leeuwen, & Wilson, 1992). Peta tatanan tektonik Pulau Sulawesi yang menggambarkan jalur-jalur penunjaman dan lajur gunung api di Sulawesi Utara dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Tatanan tektonik Busur Sulawesi Utara. Lengan utara memanjang dari 1°S meliputi leher Sulawesi dan Busur Sulawesi Utara. Inset peta menunjukkan ketiga lempeng besar yang berkontribusi terhadap evolusi tektonik Kenozoikum di Asia Tenggara. Lokasi eksplorasi ditunjukkan dengan kotak berwarna merah. Gambar telah dimodifikasi dari (Kavalieris, Leeuwen, & Wilson, 1992).

2.2 Geologi Lokal

Struktur geologi yang dipetakan di Blok Bakan pada umumnya terdiri atas pasangan-pasangan struktur yang berarah baratlaut-tenggara dan utara-timurlaut – selatan-baratdaya dengan kemiringan yang mendekati vertikal. Struktur-struktur ini menjadi tempat naiknya cairan hidrotermal yang kaya akan asam yang membentuk alterasi tipikal epitermal sulfidasi tinggi. Secara umum litologi yang teridentifikasi dari hasil pengeboran telah mengkonfirmasi satuan litologi yang sudah terpetakan di permukaan. Secara lebih detail berdasarkan dari pemerian batuan inti bor terdiri atas (PT. JRBM, 2020):

1. Breksi diatrema

Batuan breksi yang terbentuk akibat proses preatomagmatik yang dicirikan oleh hadirnya komponen *juvenile clast* dan *rock flour matrix*. Litologi ini merupakan batuan yang menjadi *hostrock* mineralisasi paling baik di Blok Bakan.

2. Breksi hidrotermal

Satuan batuan ini merupakan produk infiltrasi dari larutan hidrotermal pada zona struktur geologi yang terbentuk selama dan/atau sesudah proses mineralisasi. Dicirikan dengan fragmen tersusun batuan samping menyudut dengan semen tersusun atas silika. Breksi rekahan ini berkembang menerobos satuan batuan Breksi diatrema, Breksi rekahan, Litik tuf dasitik, Tuf dasitik, tuf andesitik.

3. Litik tuf dasitik

Batuan fragmental yang tersusun atas fragmen menyudut berukuran lapilli dan matrik tersusun atas material debu piroklastik berkomposisi dasitik yang dapat ditemukan dengan dominasi fragmen maupun dominasi matriks.

4. Tuf dasitik

Batuan ini merupakan produk piroklastika berukuran debu (*ash*) dengan komposisi yang bersifat andesitik, kehadiran fragmental batuan tidak lebih dari 20%.



Breksi polimik vulkanik

Merupakan batuan fragmental polimik yang tersusun atas rombakan batuan yang lebih kasar seperti andesit, batugamping dan diorit dengan bentuk menyudut hingga

membundar. Matriks batuan ini tersusun atas litik yang berukuran lebih halus (pasiran).

6. Batuan terobosan diorit

Batuan ini dicirikan dengan warna gelap hingga terang, faneritik dan mempunyai banyak *interlocking plagioklas*, hornblende dan kuarsa.

7. Lava andesit

Satuan batuan ini dicirikan dengan warna gelap dengan mineral penyusun tidak terlihat oleh mata langsung (afanitik).

2.2 Alterasi dan Mineralisasi

Zona alterasi pada daerah penelitian meliputi zona alterasi silika *vuggy* (kuarsa), silika - *clay* (kuarsa - pirofilit), argilik lanjut (alunit - kaolinit), dan argilik (ilit - kaolinit - smektit - dikit). Mineral bijih ditemukan dalam bentuk disseminasi dan dapat dijumpai pada seluruh zona alterasi. Mineral - mineral bijih tersebut meliputi emas, enargit, bornit, arsenopirit, pirit, kovelit, hematit, dan goetit, dimana pembentukan emas berasosiasi dengan enargit, bornit, arsenopirit, dan pirit pada tahap awal mineralisasi. Berikut merupakan jenis alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian. Berdasarkan karakteristik mineralogi dan alterasi, beserta karakteristik tekstur tersebut, maka dapat diketahui bahwa endapan epitermal pada daerah penelitian merupakan endapan epitermal sulfidasi tinggi dengan kedalaman menengah 500 m - 1000 m (PT JRBM, 2020).

2.2.1 Alterasi Hidrotermal Blok Bakan

Endapan bijih di Blok Bakan diklasifikasikan ke dalam tipe endapan emas epitermal sulfidasi tinggi (*high sulphidation epithermal*). Alterasi (ubahan) hidrotermal di Blok Bakan dikelompokkan sebagai berikut (PT JRBM, 2020):

1. Alterasi *silica vuggy* (SV)

Alterasi *silica vuggy* dicirikan oleh ubahan kuarsa/*silica vuggy* dan kuarsa/*silica massive* akibat pencucian secara intensif oleh asam serta sulfida

jumlah besar dan sedang menggantikan mineral asli mencirikan jalur masuknya gas dan larutan sisa magma (*hydrothermal feeder*) dalam sistem. Terdapat mineralisasi oleh mineral alterasi kuarsa, alunit, dickite, dan pyrophyllite.



2. Alterasi *advanced argillic* (AA)

Zona pembungkus dari inti *silica* yang berupa zona silika-alunit dan alunit-dickite dengan kandungan sulfida yang cukup besar hingga sedang. Alterasi ini dapat dibagi menjadi dua jenis berdasarkan kandungan mineral *clay*, seperti *Silica Advanced Argilic* (SAA) didominasi oleh kandungan *silica* dibandingkan kandungan *clay*. Sedangkan *Clay Advanced Argilic* (CAA) didominasi oleh kandungan *clay*.

3. Alterasi *argilic* (AR)

Alterasi *argilic* (AR) yang membungkus zone alterasi *advanced argillic* kearah luar menggambarkan berlangsungnya proses pendinginan larutan asam yang keluar dari alur yang bergerak ke atas (*feeder*), yang tersusun atas mineral-mineral lempung berupa kaolinit, ilit, dan smektit.

4. Alterasi *chloritic* (CH)

Alterasi *chloritic* (CH) adalah zona alterasi terluar dimana pengaruh larutan asam sudah berkurang dengan pH (tingkat keasaman) yang semakin mendekati netral. Tipe alterasi pada batuan dapat dilihat pada Gambar 3.



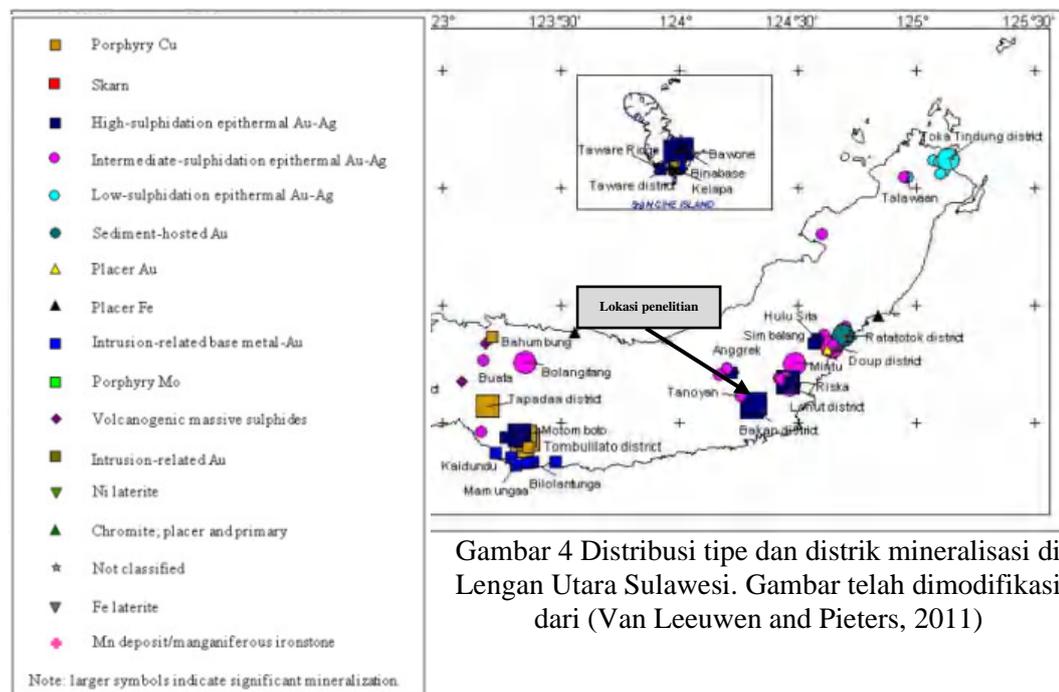
Gambar 3 Tipe alterasi Batuan (PT. JRBM, 2020)

2.2.2 Mineralisasi Blok Bakan

Lengan Utara Sulawesi, di mana lokasi penelitian berada, yang seperti telah diuraikan di atas termasuk ke dalam Busur Vulkanik Tersier Sulawesi Barat dan Busur Vulkanik Kuarter Minahasa-Sangihe, merupakan region yang kaya akan jenis endapan mineral. Di region ini aktivitas penelitian dan pertambangan logam-logam ekonomis lainnya telah berlangsung sejak dahulu hingga Endapan mineral bijih yang terdapat di Sulawesi Utara yaitu endapan



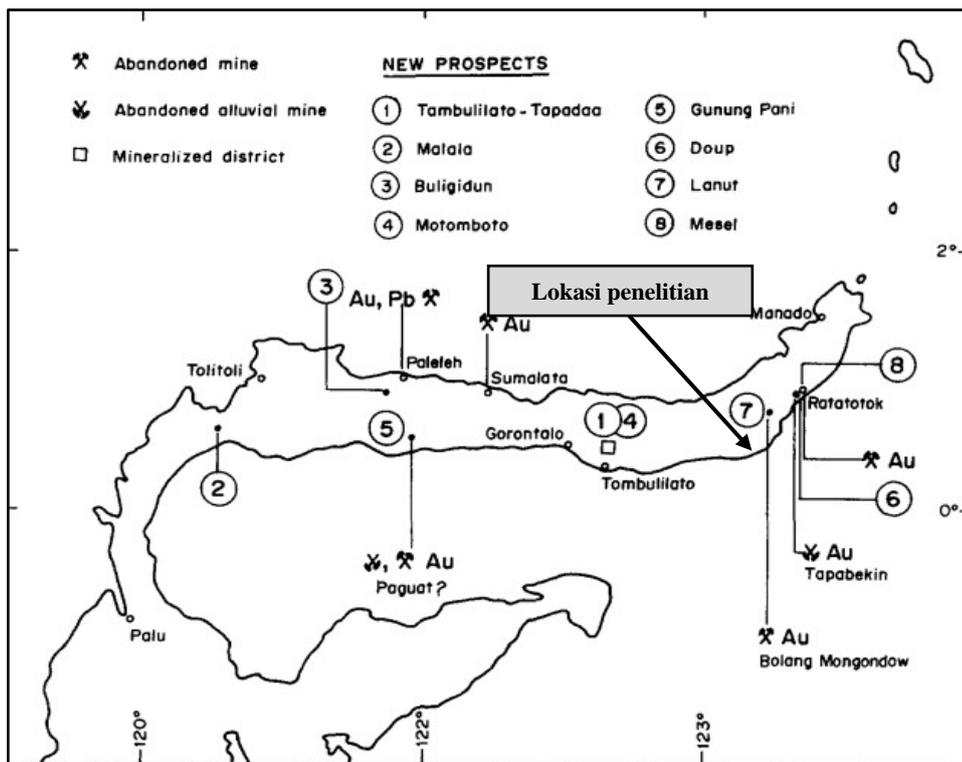
mineral bijih dengan tipe *porphyry Cu-Au±Mo*; *high-, intermediate- and low-sulphidation epithermal Au-Ag*; *sediment hosted-Au*; *breccia-hosted base metal-Au*; *intrusion-related base metal-Au veins*; *Fe±Au skarns*; dan *Cu-Pb-Zn volcanogenic massive sulphides (VMS)*, Keterdapatannya dari mineralisasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 4 (Van Leeuwen dan Pieters, 2011).



Tipe mineralisasi emas yang ada di sekitar lokasi penelitian kemungkinan memiliki tipe genetik yang sama, maka pada bagian ini diuraikan secara ringkas karakteristik mineralisasi-mineralisasi tersebut. Lokasi dan sebaran sejumlah mineralisasi emas di wilayah ini, termasuk Blok Bakan di Bolaang Mongondow juga telah digambarkan oleh Kavalieris et al. (1992) (Gambar 5).

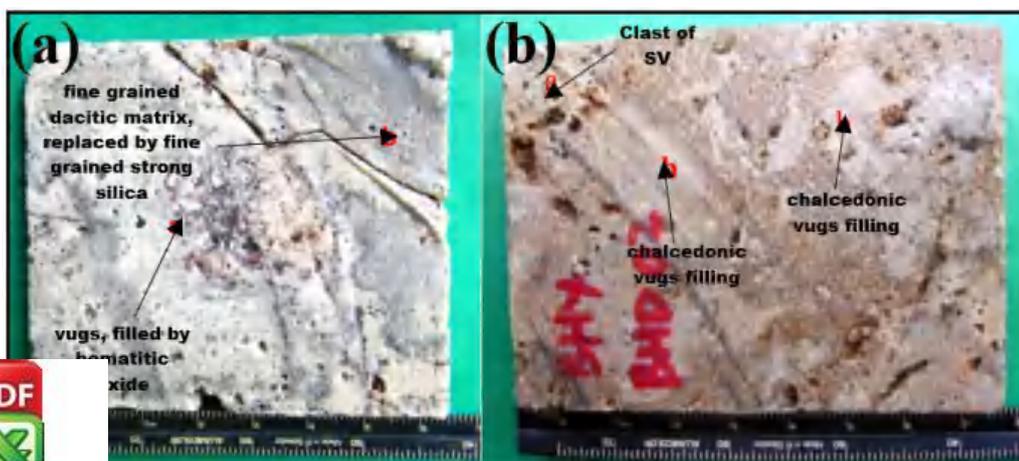
Mineralisasi yang berkembang di Blok Bakan diinterpretasikan sebagai tipe epitermal sulfidasi derajat tinggi (*high sulphidation epithermal-HSE*), yang ditandai dengan alterasi silika dengan tekstur *vuggy*, hadirnya mineral dengan pH rendah seperti *alunite*, *dickite*, *prophyllite*, dan *diaspore*. Kemudian ditemukan mineral pirit melimpah dan beberapa mineral sulfida lainnya seperti *enargite-covellite* dan *chalcocite*. Emas berukuran sangat halus (*invisible*) dan secara tersebar (*disseminated*) pada batuan sampling yang telah diubah silika hingga argilik lanjut.





Gambar 5 Peta sebaran lokasi-lokasi bekas tambang emas, perak dan logam dasar serta prospek-prospek endapan emas di Lengan Utara Pulau Sulawesi. Gambar telah dimodifikasi dari (Kavalieris et al., 1992).

Batuan dengan jenis alterasi *silica vuggy* dengan litologi *dacitic lithic tuff* pada Gambar 6a sangat tersilisifikasi, dengan oksida berwarna coklat kemerahan, bertekstur *vuggy*, pirit berbutir halus, *vugs* atau lubang diisi oleh pirit, limonit, dan belerang. Selain itu, batuan dengan jenis litologi *hydrothermal breccia* alterasi *silica vuggy* yang diisi dengan mineral silika sekunder dan limonit, ukuran *clast* 1mm-5cm, derajat kebulungan *angular-rounded*, dan sortasi buruk (Gambar 6b).



6 (a) Batuan *dacitic lithic tuff* (b) batuan *hydrothermal breccia* (Dimodifikasi dari PT. JRBM, 2020)



2.2 Endapan Epitermal

Eksplorasi emas dan tembaga yang dilakukan di Indonesia telah menghasilkan banyak temuan jenis deposit (Van Leeuwen, 1994). Hasil kegiatan tersebut menunjukkan hubungan antara mineralisasi dengan busur magmatik, serta memberikan informasi mengenai hubungan antara tatanan geologi dan lingkungan tempat terbentuknya mineralisasi (Carlile and Mitchell, 1994). Jenis-jenis endapan mineral yang ditemukan di Indonesia yaitu endapan emas-tembaga porfiri, skam, epitermal sulfidasi rendah dan sulfidasi tinggi, serta endapan emas yang berasosiasi dengan batuan metamorf (Van Leeuwen, 1994).

Endapan epitermal didefinisikan sebagai salah satu endapan dari sistem hidrotermal yang terbentuk pada kedalaman dangkal yang umumnya pada busur vulkanik yang dekat dengan permukaan (Simmon, White, & John, 2005). Lingkungan epitermal terdapat 2 (dua) kondisi sistem hidrotermal yang dapat dibedakan berdasarkan reaksi yang terjadi dan ketersediaan mineral-mineral alterasi dan mineral bijihnya yaitu epitermal *low sulphidation* dan *high sulphidation* (White and Hedenquist, 1995). Menentukan karakteristik suatu endapan bijih dapat dilihat dari bentuk, mineralogi, tekstur, dan zoning alterasi. Beberapa observasi karakteristik endapan epitermal sulfidasi rendah dan sulfidasi tinggi sering terjadi *overlap*, namun tetap terdapat perbedaan diantara keduanya (Puspita, 2021).

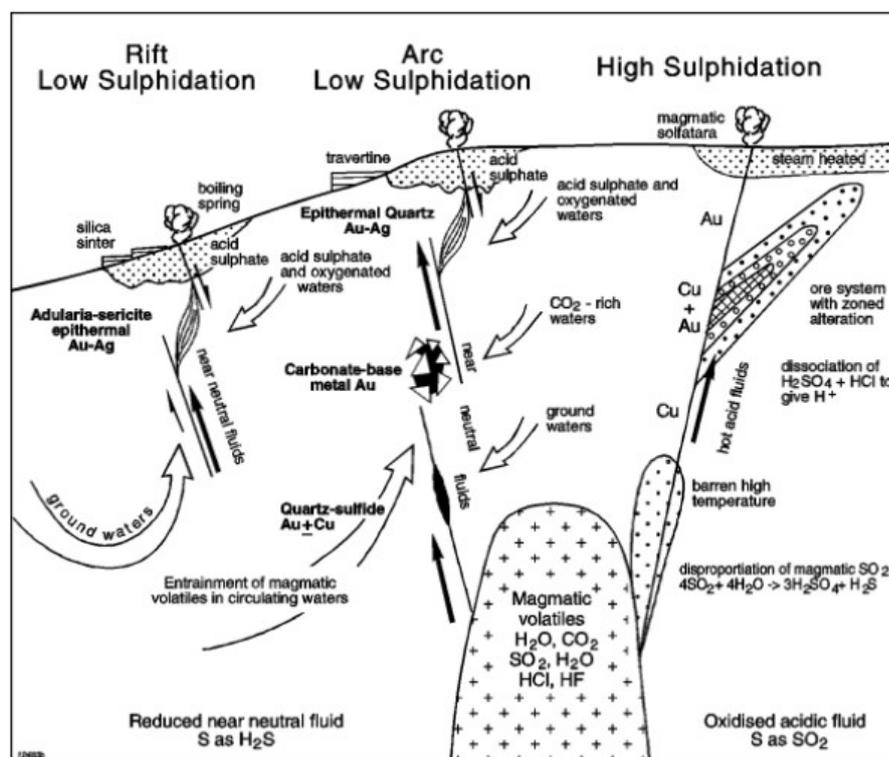
Endapan *epithermal high sulphidation* dicirikan dengan batuan induk berupa batuan vulkanik bersifat asam hingga intermediet dengan control struktur berupa sesar secara regional atau intrusi subvulkanik, kedalaman formasi batuan sekitar 500-2.000 meter dan temperatur (100-320)^o C. Endapan *epithermal high sulphidation* terbentuk oleh sistem dari fluida hidrotermal yang berasal dari intrusi magmatik yang cukup dalam, fluida ini bergerak secara vertikal dan horizontal menembus rekahan-rekahan pada batuan dengan suhu yang relatif tinggi (200-300^oC). fluida ini didominasi oleh fluida magmatik dengan kandungan *acidic* yang tinggi yaitu berupa HCl, SO₂, dan H₂S (Pirajno, 2009).



Endapan *epithermal low sulphidation system* dicirikan oleh larutan yang netral dalam kondisi reduksi yang mengandung S dan H₂S dan bahkan adanya interaksi antara komponen air meteorik dan air magmatik.

Pada tipe sulfidasi rendah, pengendapan mineral bijih, terutama emas dikontrol oleh adanya proses boiling yang disebabkan oleh adanya penurunan tekanan dari larutan yang mencapai permukaan. Proses *boiling* biasa diindikasikan dengan adanya kristal silika yang berbentuk pipih yang menggantikan kalsit

Endapan bijih di Blok Bakan diklasifikasikan ke dalam tipe endapan emas Epithermal Sulfidasi Tinggi (*High Sulphidation Epithermal*). Indikasi kehadiran endapan sistem urat juga teramati dalam wilayah yang terbatas, sedangkan dalam skala regional dilaporkan adanya tipe endapan porfiri dari umur Miosen. Gambar 7 menunjukkan model fluida sulfidasi tinggi dan rendah (Corbett and Leach, 1998).



Gambar 7 Model fluida sulfidasi tinggi dan rendah (Corbett and Leach, 1998)

2.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral

Sumberdaya mineral adalah suatu konsentrasi atau keterjadian dari material yang memiliki nilai ekonomi pada atau di atas kerak bumi, dengan bentuk, kualitas dan kuantitas tertentu yang memiliki keprospekkan yang beralasan untuk pada akhirnya dapat diekstraksi secara ekonomis. Aspek yang perlu diketahui dalam upaya mineral yaitu lokasi, kuantitas, kadar, karakteristik geologi, dan asan, sehingga dapat dilakukan estimasi atau intepretasi berdasar bukti-pengetahuan geologi yang spesifik, termasuk pengambilan contohnya.



Sumberdaya mineral dikelompokkan lagi berdasar tingkat keyakinan geologinya, kedalam kategori tereka, tertunjuk dan terukur (KCMI, 2017).

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

1. Sumberdaya mineral tereka

Sumberdaya mineral tereka yaitu kuantitas dan kualitas kadarnya diestimasi berdasarkan bukti-bukti geologi dan pengambilan conto yang terbatas. Bukti geologi tersebut memadai untuk menunjukkan keterjadiannya tetapi tidak memverifikasi kemenerusan kualitas atau kadar dan kemenerusan geologinya. Sumberdaya mineral tereka memiliki tingkat keyakinan lebih rendah dalam penerapannya dibandingkan dengan sumberdaya mineral tertunjuk dan tidak dapat dikonversi ke cadangan mineral.

2. Sumberdaya mineral tertunjuk

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

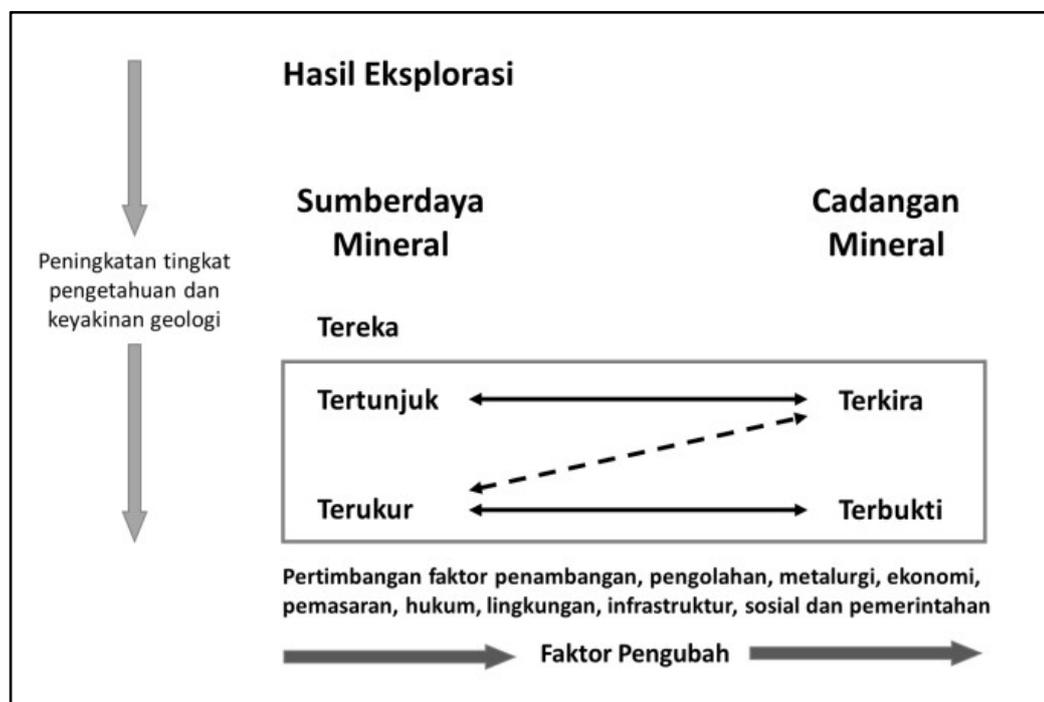
3. Sumberdaya mineral terukur

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



Sumberdaya Mineral Terukur memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi nya dibandingkan dengan sumberdaya Mineral Tertunjuk ataupun

sumberdaya Mineral Tereka. Sumberdaya Mineral Terukur dapat dikonversi ke Cadangan Mineral Terbukti atau Cadangan Mineral Terkira. Tingkat keyakinan dalam estimasi harus memadai untuk memungkinkan penerapan parameter keteknikan dan keekonomian, dan memungkinkan dilakukannya suatu evaluasi kelayakan ekonomi yang memiliki tingkat kepastian lebih tinggi dibandingkan dengan evaluasi yang berdasarkan atas sumberdaya Mineral Tertunjuk. Keterkaitan antara hasil eksplorasi, sumberdaya mineral dan cadangan mineral yang dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Hubungan hasil eksplorasi, sumberdaya dan cadangan mineral (KCMI, 2017)

2.4 Analisis Geostatistik

Dalam industri mineral, geostatistik telah banyak digunakan dalam mengestimasi sumberdaya mineral dan batubara. Geostatistik pada dasarnya merupakan penerapan dari konsep variabel terregional yang dapat digunakan dalam mengukur korelasi antar data geologi yang tersebar secara spasial. Fenomena geologi seperti kadar unsur dan ketebalan merupakan variabel terregional di mana

u sampel memiliki hubungan keruangan dengan sampel lainnya. Sebagai iabel terregional, sampel-sampel yang terletak berdekatan akan memiliki i keruangan yang semakin besar sehingga akan memiliki nilai yang mirip



namun tidak identik. Korelasi spasial antar data sampel dapat dilakukan melalui analisis dan pemodelan variogram (Matheron, 1963).

2.2.3 Variogram dan semivariogram

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

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

Di mana,

$2\gamma(h)$ = variogram

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

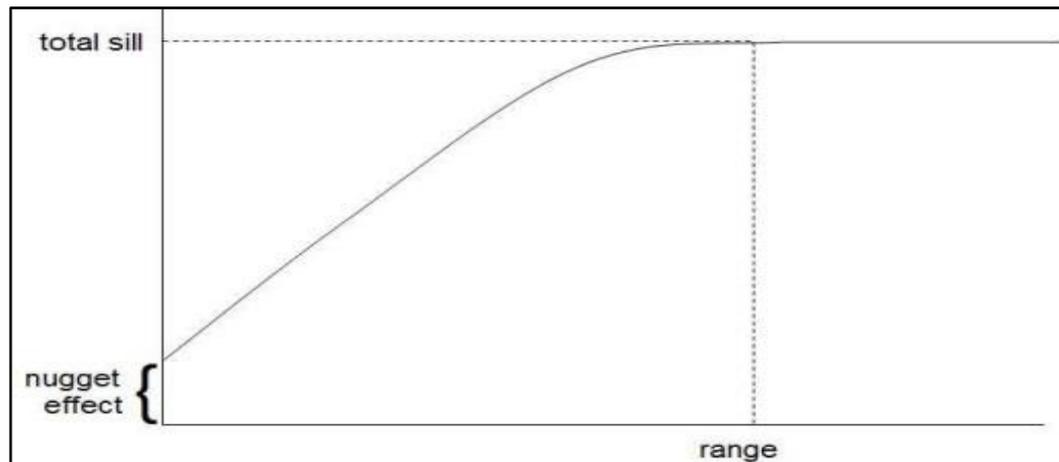
$Z(x_{i+h})$ = nilai kadar pada lokasi $x_i + h$

Terdapat beberapa komponen penyusun variogram dan semivariogram seperti *nugget effect*, *sill*, dan *range* (Coombes, 2008).

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



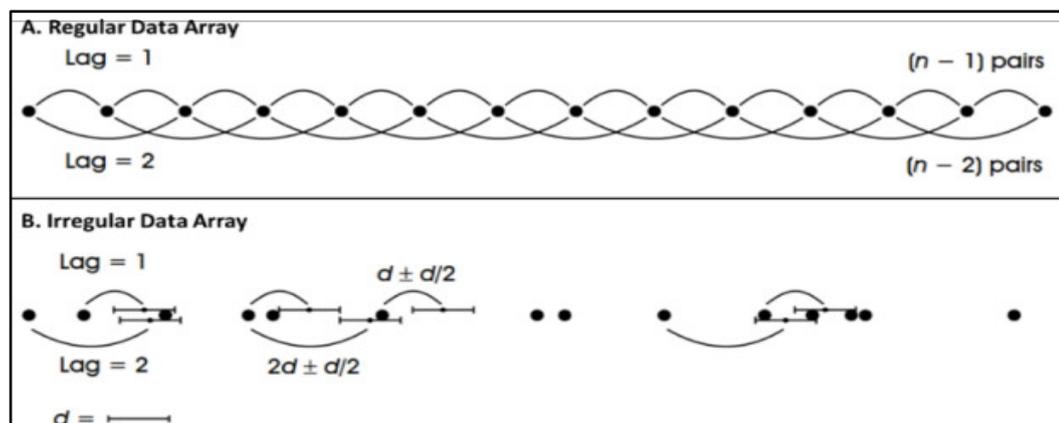
range, merepresentasikan jarak sampel di mana sampel data tidak saling korelasi secara spasial. Jarak *range* didapatkan ketika variogram telah mencapai total *sill*.



Gambar 9 Komponen penyusun variogram (Coombes, 2008)

2.4.2 Variogram eksperimental

Variogram eksperimental diperoleh dari pengukuran data di lapangan yang merepresentasikan ukuran korelasi spasial antar data sampel yang terpisah oleh suatu jarak tertentu. Pembangunan variogram eksperimental dilakukan dengan pencarian pasangan data dalam variogram berdasarkan *lag* (h) tertentu. Pada susunan data yang tidak seragam (*irregular*), pasangan data dapat dikumpulkan pada jarak tertentu (h) yang seragam dengan nilai toleransi tertentu seperti yang diilustrasikan pada Gambar 10 (Sinclair and Blackwell, 2004).

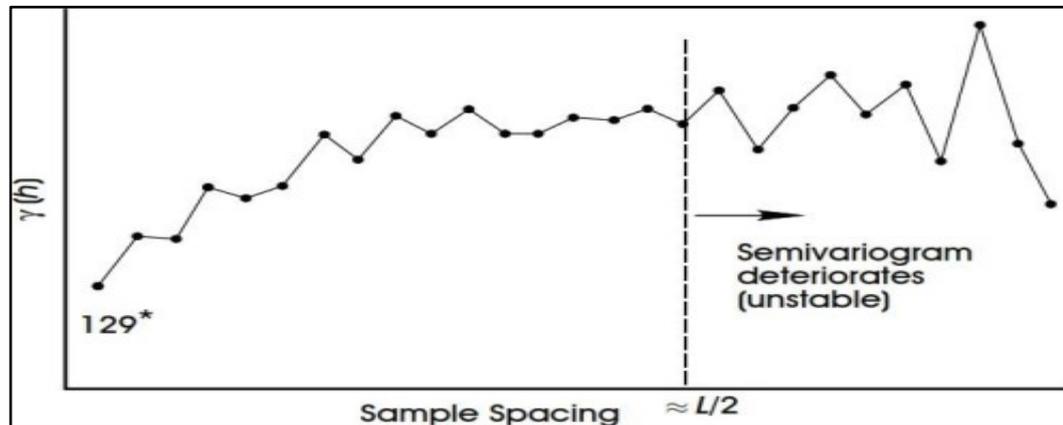


Gambar 10 Pencarian pasangan data dalam perhitungan variogram eksperimental (Sinclair and Blackwell, 2004)

Hasil dari perhitungan variogram kemudian diplot dalam grafik hubungan jarak antar pasangan data (h) dan variogram $\gamma(h)$. Semivariogram eksperimental umumnya ditampilkan dengan pola grafik yang bergerigi (*sawtooth*) pada jumlah data yang digunakan seperti yang terlihat pada Gambar 11. Jumlah data melimpah, semivariogram eksperimental umumnya

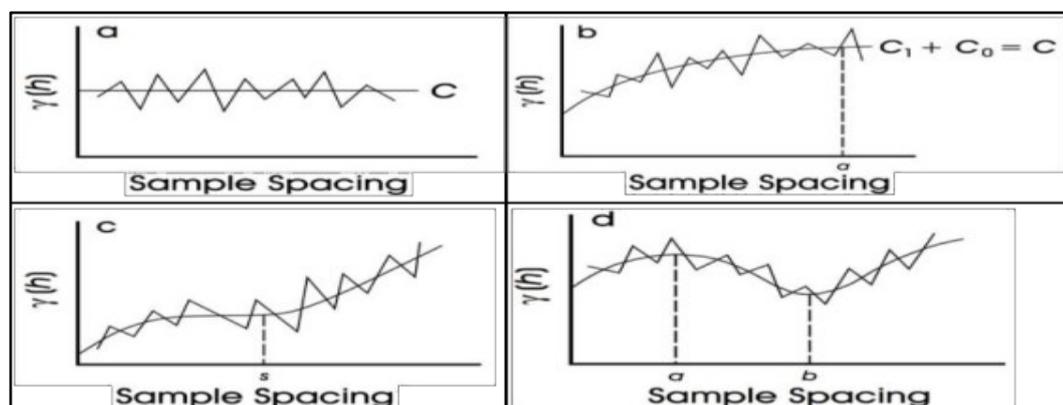


menunjukkan fluktuasi variogram yang lebih kecil dan menerus. Secara umum, $\gamma(h)$ akan meningkat seiring dengan peningkatan jarak *lag* (Sinclair and Blackwell, 2004).



Gambar 11 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 12 (Sinclair and Blackwell, 2004).



Gambar 12 Semivariogram eksperimental dengan *sawtooth* dan *smooth curve* (Sinclair and Blackwell, 2004)

Berdasarkan pada Gambar 12 diatas, Gambar (a) merupakan *pure nugget* gambar (b) merupakan pola umum semivariogram, Gambar (c) merupakan variogram eksperimental parabolik dengan stasioner lokal hingga jarak s ,



Gambar(d) merupakan *hole effect* dengan karakter siklus distribusi spasial variable (Sinclair and Blackwell, 2004).

2.4.3 Variogram model teoritis

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

1. Model variogram sferis

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

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

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

Di mana,

$\gamma(h)$ = variogram

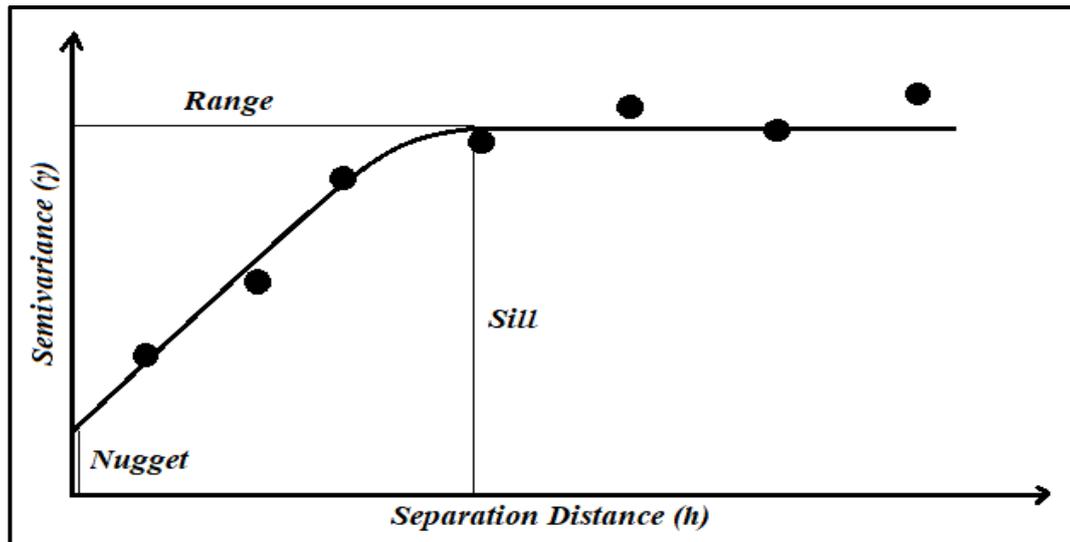
C_0 = *nugget*

C = selisih nilai *sill* dan *nugget*

a = *range* variogram

h = jarak





Gambar 13 Contoh model variogram sferis (Bargawa, 2018)

Gambar 13 memperlihatkan contoh sederhana model variogram sferis dicocokkan dengan variogram eksperimental. Pada saat garis mendatar variogram dan dipotongkan pada (h) disebut *range* variogram. Jika jarak lebih dari nilai (h) maka sampel tidak memiliki korelasi lagi. Nilai *sill* merupakan nilai maksimum variogram dan umumnya sama dengan variansi data yang digunakan untuk menghitung variogram. *Nugget* (C_0), yaitu nilai pada jarak yang pendek terjadi variansi yang besar dan dianggap sebagai komponen acak. Nilai (C) adalah selisih dari nilai *sill* dan *nugget* (Bargawa, 2018).

2. Model variogram eksponensial

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

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

Di mana,

$\gamma(h)$ = variogram

C_0 = *nugget*

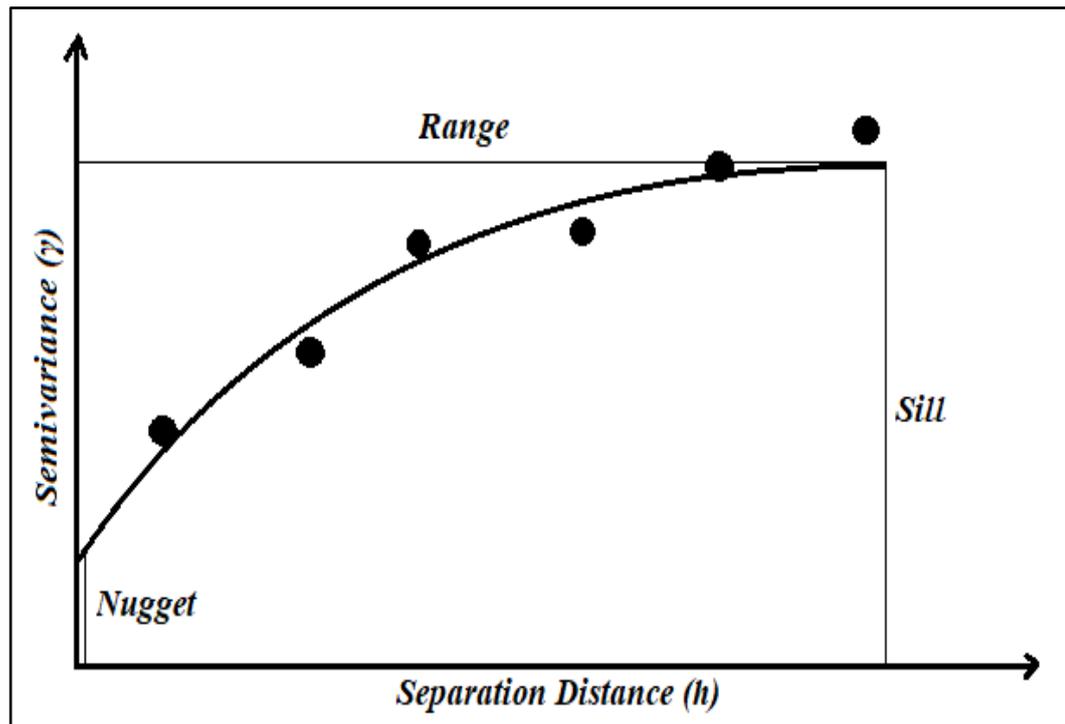
C = selisih nilai *sill* dan *nugget*

e = nilai konstanta

α = *range* variogram

h = jarak





Gambar 14 Contoh model variogram eksponensial (Bargawa, 2018)

Gambar 14 memperlihatkan contoh model variogram eksponensial. Model variogram eksponensial mendekati *sill* asimtotik dan nilai *sill* mempunyai jarak $3a$ (Bargawa, 2018).

3. Model variogram *hole-effect*

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

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

Di mana,

$\gamma(h)$ = variogram

C_0 = *nugget*

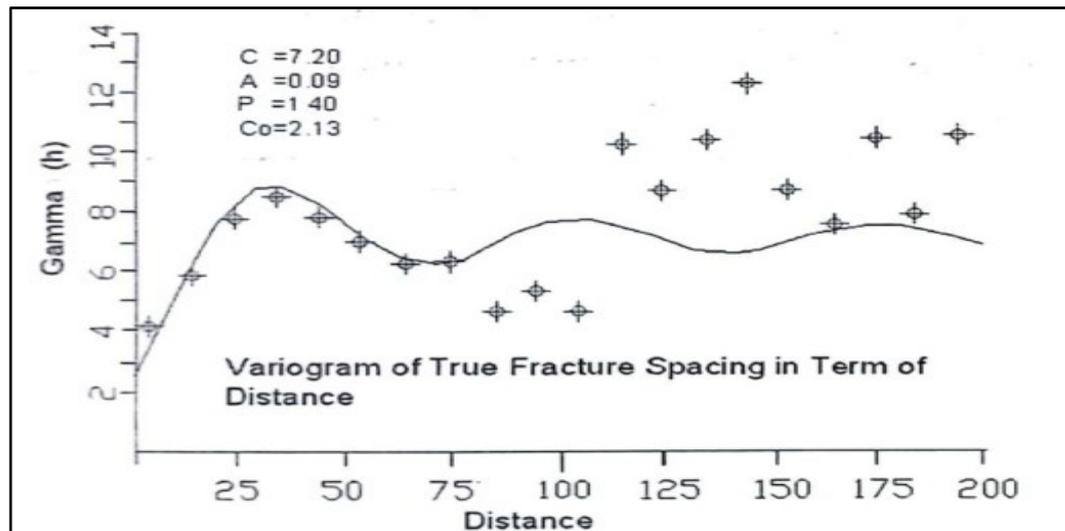
C = selisih nilai *sill* dan *nugget*

a = *range* variogram

h = jarak

p = parameter model





Gambar 15 Contoh model variogram *hole-effect* (Bargawa, 2018)

2.3 Estimasi Sumberdaya

Estimasi sumberdaya adalah estimasi dari bijih endapan mineral yang mana bagian dari perhitungan cadangan yang merupakan hal yang paling vital sebelum dilanjutkan ke tahap selanjutnya yaitu perhitungan cadangan yang mana akan dievaluasi apakah endapan mineral tersebut layak untuk dilanjutkan ke tahap eksplorasi selanjutnya (Widayat, 2005).

Hasil dari estimasi sumberdaya tersebut akan dapat dijadikan sebagai cadangan jika memenuhi beberapa ketentuan metode perhitungan yang digunakan harus memberikan hasil yang dapat diuji ulang atau diverifikasi. Setelah perhitungan sumberdaya selesai, yang harus dilakukan adalah memeriksa atau mengecek taksiran kualitas blok yang dibuat setelah proses pemodelan (Conoras, J.Rasai, & A.Djin, 2020). Pengestimasi sumberdaya mineral biasanya digunakan berbagai metode seperti metode Poligon, metode *Inverse Distance Weighting* (IDW), metode *Ordinary Kriging* dan lainnya (Sinclair and Blackwell, 2004).

1. Metode *Ordinary Kriging*

Interpolasi *kriging* dapat digolongkan dalam interpolasi stokastik. Interpolasi stokastik menawarkan penilaian kesalahan dengan nilai prediksi yang mengasumsikan kesalahan acak. Metode *kriging* menonjolkan metode ini dalam *moving average* terbobot yang meminimalkan variansi dari hasil prediksi. Asumsi dari metode ini adalah jarak dan orientasi antara sampel data



menunjukkan korelasi spasial. 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).

2. Metode Poligon

Metode poligon merupakan metode perhitungan yang konvensional dibandingkan dengan metode lainnya, karena metode ini tidak begitu memperhatikan data-data dari titik bor disekitarnya. Kadar pada suatu luasan di dalam poligon ditaksir dengan nilai contoh yang berada di tengah-tengah poligon sehingga metode ini sering disebut dengan metode poligon daerah pengaruh (*area of influence*). Batas daerah pengaruh terluar dari poligon ini bisa hanya sampai pada titik bor terluar saja (*included area*) atau diekstensikan sampai sejauh setengah jarak (*extended area*).

3. Metode *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Inverse Distance Weighting merupakan satu teknik interpolasi permukaan (*surface interpolation*) dengan prinsip titik inputnya dapat berupa titik pusat plot yang tersebar secara acak maupun tersebar merata. Metode bobot *inverse distance* atau jarak terbalik (IDW) memperkirakan nilai atribut pada titik-titik yang tidak disampel menggunakan kombinasi linier dari nilai-nilai sampel tersebut dan dibobotkan oleh fungsi terbalik dari jarak antar titik (NCGIA, 2007).

4. Metode *Nearest Neighbour Point*

Metode NNP (*Nearest Neighbour Point*) atau biasa juga disebut sebagai metode poligon contoh terdekat, dimana pengambilan nilai estimasi berdasarkan pada pengaruh masing-masing titik mengikuti titik terdekat. Metode ini umumnya digunakan pada endapan yang relatif homogen dan mempunyai geometri yang sederhana. Kerangka blok model, dikenal jenis penaksiran poligon dengan jarak titik terdekat (*rule of nearest point*), yaitu nilai hasil penaksiran hanya dipengaruhi oleh nilai contoh yang terdekat atau dengan kata lain titik terdekat memberikan nilai pembobotan satu untuk titik yang ditaksir

titik yang lebih jauh memberikan nilai pembobotan nol atau tidak mempunyai pengaruh (Hartman, 1992).



2.4 Kriging dan Ordinary Kriging

Kriging adalah suatu teknik perhitungan untuk estimasi atau simulasi dari suatu variabel terregional (*regionalized variable*) yang memakai pendekatan bahwa data yang dianalisis dianggap sebagai suatu realisasi dari suatu variabel acak (*random variable*), dan keseluruhan variabel acak dalam daerah yang dianalisis tersebut akan membentuk suatu fungsi acak dengan menggunakan model struktural variogram atau kovariogram (David, 1977). Metode *kriging* mempunyai keunggulan dan kelemahan, keunggulannya yaitu kemampuan untuk menguantifikasi variansi dari nilai yang diestimasi sehingga tingkat presisi dari hasil estimasi dapat diketahui. Metode *kriging* tetap dapat digunakan meskipun tidak ditemukan korelasi spasial antar data. Kelemahan *kriging* yaitu mengasumsikan data menyebar normal sementara kebanyakan data lapangan tidak memenuhi kondisi tersebut. Selain itu, semivariogram yang dihitung untuk suatu himpunan data tidak berlaku untuk himpunan data lainnya. Dengan demikian estimasi semivariogram akan sulit bila titik sampel yang digunakan tidak mencukupi (Largueche, 2006).

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

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

Di mana,

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

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

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

λ_i = faktor bobot

n = banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi

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



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

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

Di mana,

σ = variansi estimator

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya

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

Ordinary kriging dikenal sebagai teknik *kriging* linear karena menggunakan kombinasi linier terbobot dari data yang tersedia untuk proses estimasi (Isaaks and Srivastava, 1989). *Ordinary kriging* merupakan metode yang praktis dan sederhana dalam konsep model stasionaritas untuk menaksir kadar menggunakan data di sekeliling blok. Teknik *ordinary kriging* menggunakan parameter penaksiran yaitu variogram komposit, arah dan jarak pencarian sampel, serta jumlah sampel maksimum dan minimum. *Kriging* merupakan suatu teknik penaksiran yang memberikan *best linear unbiased estimator* (BLUE) (Bargawa, 2018). Hal tersebut berarti mempunyai variansi terkecil dibanding estimator lain. Data yang digunakan pada metode *ordinary kriging* merupakan data spasial dengan rata-rata populasi tidak diketahui dan diasumsi bersifat stasioner (Isaaks and Srivastava, 1989).

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



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

Di mana,

$\lambda_{(1,2,...n)}$ = vektor pembobot ke S_i

γ = semivariogram antara titik $(S_{1...n}, S_{1...n})$ yang terdapat pada jarak sebesar h

m = *lagrange multiplier*

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

1. Asumsi model

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

2. Asumsi prediksi

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

Di mana,

$Z(s)$ = peubah acak bebas

μ = ekspektasi peubah acak $Z(s)$

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

R = bilangan *real*

N = banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi

λ_i = faktor pembobot

Karena koefisien dari hasil penjumlahan prediksi linier adalah 1 dan memiliki syarat tak bias maka $E\hat{Z}(s) = \mu = EZ(s) = Z(s)$, untuk setiap $\mu \in R$ dan karena $Z(s)$ merupakan suatu konstanta maka $EZ(s) = Z(s)$ terdapat estimator *error* $e(s)$, pada setiap lokasi merupakan perbedaan antara nilai estimasi $\hat{Z}(s)$ dengan nilai sebenarnya $Z(s)$ yang dinyatakan sebagai berikut (Cressie, 1990):

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

Di mana,

$e(s)$ = estimator *error*

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya

Agar $Ee(s) = 0$. Selisih $\hat{Z}(s) - Z(s)$ disebut dengan galat estimasi atau bias. dengan nilai $i = 1, 2, \dots, n$ ditentukan berdasarkan kriteria (Cressie, 1990):



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

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

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

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

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

Di mana,

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

$Z(s)$ = nilai sebenarnya

