

**PEMODELAN DAN ESTIMASI SUMBERDAYA GALENA  
MENGUNAKAN METODE GEOSTATISTIK PADA  
ENDAPAN SKARN**

**TESIS**

**Oleh :**

**EPAFRAS MEIHAGA**

**212221009**



**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN  
PROGRAM MAGISTER  
FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL DAN ENERGI  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL "VETERAN"  
YOGYAKARTA  
2025**

**PEMODELAN DAN ESTIMASI SUMBERDAYA GALENA  
MENGUNAKAN METODE GEOSTATISTIK PADA  
ENDAPAN SKARN**

**TESIS**

Disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Magister Teknik  
dari Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Oleh :

**EPAFRAS MEIHAGA**

**212221009**



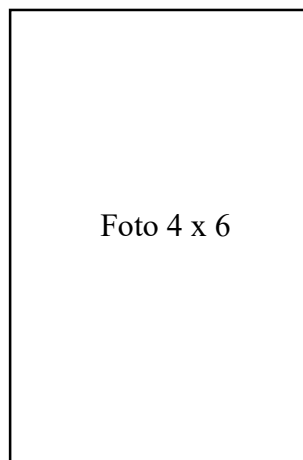
**PROGRAM STUDI TEKNIK PERTAMBANGAN  
PROGRAM MAGISTER  
FAKULTAS TEKNOLOGI MINERAL DAN ENERGI  
UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL “VETERAN”  
YOGYAKARTA  
2025**

**PEMODELAN DAN ESTIMASI SUMBERDAYA GALENA  
MENGUNAKAN METODE GEOSTATISTIK PADA  
ENDAPAN SKARN**

Oleh :

**EPAFRAS MEIHAGA**

**212221009**



Disetujui untuk

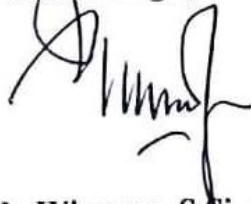
Program Studi Teknik Pertambangan - Program Magister

Fakultas Teknologi Mineral dan Energi

Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta

Tanggal : .....

**Pembimbing I,**



**Dr. Ir. Eddy Winarno, S.Si., M.T.**

**Pembimbing II,**



**Prof. Ir. D. Haryanto, M.Sc., Ph.D.**

**Dipersembahkan untuk**

Bapak, ibu, kakak-adik serta keluarga besar yang saya cintai dan teman-teman  
yang saya sayangi.

## RINGKASAN

PT. Generasi Muda Bersatu merupakan perusahaan pertambangan yang berfokus pada eksploitasi galena (PbS) dan mineral ikutannya seperti sphalerite (ZnS). Keterbatasan titik bor pada daerah penelitian mempengaruhi ketepatan dalam memodelkan distribusi spasial Pb dan Zn. Metode *ordinary kriging* dianggap lebih unggul dibandingkan metode konvensional karena memanfaatkan konsep korelasi spasial antar data. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kondisi geologi dan alterasi daerah penelitian, menentukan model variogram dan arah anisotropi yang terbaik untuk estimasi, serta mengklasifikasikan sumberdaya Pb-Zn. Berdasarkan hasil pengolahan data kondisi geologi di daerah penelitian didominasi oleh perselingan antara batugamping dan batuan vulkanik. Bentuk perselingan ini umum terjadi pada tipe endapan skarn dengan alterasi didominasi oleh argilik. Model variogram *exponential* dengan arah azimuth 135° pada domain north dan 0° pada domain south menunjukkan hasil fitting terbaik dengan nilai RMSE paling rendah. Klasifikasi sumberdaya menggunakan RKSD dan KE menunjukkan hasil yang berbeda. Total keseluruhan sumberdaya pada daerah penelitian adalah 605.340 ton dengan kadar rata-rata Pb 3,85% dan Zn 6,18%.

**Kata Kunci : Estmasi sumberdaya, ordinary kriging, skarn**

## **SUMMARY**

*PT. Generasi Muda Bersatu is a mining company focused on the exploitation of galena (PbS) and its associated mineral such as sphalerite (ZnS). The limited number of drilling points in the study area affects the accuracy in modeling the spatial distribution of Pb and Zn. The ordinary kriging method is considered superior to conventional methods due to its use of spatial correlation concepts between data points. The study aims to determine the geological and alteration conditions of the research area, establish the best variogram model and anisotropy direction for estimation and classify the Pb-Zn resources. Base on the geological data processing, the research area is dominated by the alternations of limestone and volcanic rocks. The alternation is commonly found in skarn deposits, with alteration predominantly characterized by argillic types. The exponential variogram model with an azimuth direction of 135° in north domain and 0° in the south domain the best fitting results with the lowest RMSE. Resource classification using RKSD dan KE methods yielded different results. Total resources in the research area are 605.340 tons with an average grade of Pb 3,85% dan Zn 6,18%.*

**Keywords : Resource estimation, ordinary kriging, skarn**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan kuasa-Nya sehingga penyusunan Tesis dengan judul **“Pemodelan dan Estimasi Sumberdaya Galena Menggunakan Metode Geostatistik Pada Endapan Skarn”** ini dapat diselesaikan. Penelitian dilaksanakan bulan Juli 2024 – September 2024. Atas selesainya penyusunan tesis penelitian ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Mohamad Irhas Effendi, M.Si., selaku Rektor UPN “Veteran” Yogyakarta
2. Dr. Ir. RM. Basuki Rahmad, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Mineral dan Energi UPN “Veteran” Yogyakarta
3. Dr. Ir. Rika Ernawati, S.T, M.Si., selaku Ketua Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral dan Energi UPN “Veteran” Yogyakarta.
4. Dr. Ir. Nurkhamim, S.T., M.T., selaku Koordinator Program Studi Magister Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral dan Energi UPN “Veteran” Yogyakarta dan Pembahas I.
5. Dr. Ir. Eddy Winarno, S.Si, M.T., selaku pembimbing I.
6. Prof. Ir. D. Haryanto, M.Sc., Ph.D. selaku Pembimbing II.
7. Dr. Ir. Tedy Agung Cahyadi, S.T., M.T., IPM., selaku pembahas II.
8. Semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan tesis ini.

Semoga penelitian ini bermanfaat bagi penulis maupun untuk pengembangan ilmu pengetahuan kedepan serta sebagai langkah awal dalam penelitian selanjutnya.

Yogyakarta, Januari 2025  
Penulis,

(Epafra Meihaga)

## DAFTAR ISI

|                                                    | Halaman |
|----------------------------------------------------|---------|
| <b>RINGKASAN .....</b>                             | v       |
| <b><i>SUMMARY</i>.....</b>                         | vi      |
| <b>KATA PENGANTAR.....</b>                         | vii     |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                             | viii    |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                         | x       |
| <b>DAFTAR TABEL .....</b>                          | xii     |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                     | 1       |
| 1.1. Latar Belakang .....                          | 1       |
| 1.2. Rumusan Masalah .....                         | 2       |
| 1.3. Maksud dan Tujuan Penelitian.....             | 3       |
| 1.4. Batasan Masalah.....                          | 3       |
| 1.5. Tinjauan Pustaka .....                        | 4       |
| 1.6. Hipotesis Penelitian .....                    | 8       |
| 1.7. Manfaat Penelitian .....                      | 8       |
| 1.8. Metode Penelitian .....                       | 8       |
| <b>BAB II TINJAUAN UMUM .....</b>                  | 11      |
| 2.1. Profil PT. Generasi Muda Bersatu .....        | 11      |
| 2.2. Lokasi dan Kesampaian Daerah.....             | 11      |
| 2.3. Geologi Regional .....                        | 13      |
| 2.4. Stratigrafi Regional .....                    | 15      |
| <b>BAB III DASAR TEORI .....</b>                   | 16      |
| 3.1. Endapan Skarn .....                           | 16      |
| 3.1.1 Endapan Skarn .....                          | 16      |
| 3.1.2 Klasifikasi Endapan Skarn.....               | 17      |
| 3.1.3 Genesis Endapan Skarn.....                   | 18      |
| 3.2. Analisis Statistik .....                      | 21      |
| 3.2.1 Statistik Deskriptif .....                   | 21      |
| 3.2.2 Statistik Bivariat.....                      | 23      |
| 3.2.3 Statistik Spasial.....                       | 26      |
| 3.2.4 Prinsip Penaksiran.....                      | 30      |
| 3.2.5 Analisis Akurasi Taksiran .....              | 35      |
| 3.3. Klasifikasi Sumberdaya Mineral.....           | 36      |
| 3.3.1 Klasifikasi Sumberdaya Berdasarkan RKSD..... | 37      |

|                                                         | <b>Halaman</b> |
|---------------------------------------------------------|----------------|
| 3.3.2 Klasifikasi Sumberdaya Berdasarkan KE .....       | 38             |
| <b>BAB IV HASIL PENELITIAN .....</b>                    | <b>40</b>      |
| 4.1. Geologi Daerah Penelitian .....                    | 40             |
| 4.2. Estimasi Sumberdaya Pb-ZN .....                    | 48             |
| 4.2.1 Basis Data <i>Assay</i> .....                     | 48             |
| 4.2.2 Analisis Statistik.....                           | 51             |
| 4.2.3 Basis Data Komposit.....                          | 52             |
| 4.2.4 Kontruksi Model Blok .....                        | 53             |
| 4.2.5 Analisis Variogram .....                          | 56             |
| 4.2.6 Studi Variogram.....                              | 57             |
| 4.2.7 Estimasi Teknik <i>ordinary kriging</i> .....     | 58             |
| 4.2.8 Analisis Akurasi Taksiran.....                    | 61             |
| 4.3. Klasifikasi Sumberdaya Mineral.....                | 64             |
| <b>BAB V PEMBAHASAN.....</b>                            | <b>66</b>      |
| 5.1. Analisis Geologi Daerah Penelitian .....           | 66             |
| 5.1.1 Kondisi Geologi Lokal.....                        | 66             |
| 5.1.2 Geometri Endapan.....                             | 69             |
| 5.2. Pemilihan Model Variogram dan Arah Anisotropi..... | 69             |
| 5.3. Klasifikasi Sumberdaya Mineral.....                | 71             |
| 5.4. Pembuktian Hipotesis .....                         | 73             |
| <b>BAB VI KESIMPULAN .....</b>                          | <b>75</b>      |
| 6.1. Kesimpulan .....                                   | 75             |
| 6.2. Saran.....                                         | 75             |
| <br>DAFTAR PUSTAKA .....                                |                |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                          | <b>Halaman</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Gambar 1.1 Bagan Alir Penelitian .....                                                   | 10             |
| Gambar 2.1 Peta Lokasi Penelitian .....                                                  | 12             |
| Gambar 2.2 Peta Geologi Daerah Desa Cihaur .....                                         | 14             |
| Gambar 3.1 Kemencengan Kurva ( <i>Skewness</i> ) dan Kurtosis .....                      | 22             |
| Gambar 3.2 Contoh <i>Scatter Plot</i> Variabel X dan Y .....                             | 25             |
| Gambar 3.3 Variogram dan Parameter <i>Nugget</i> , <i>Range</i> , dan <i>Sill</i> .....  | 28             |
| Gambar 3.4 Model Variogram <i>Spherical</i> , <i>Exponential</i> , <i>Gaussian</i> ..... | 29             |
| Gambar 3.5 <i>Ellipsoid</i> 3D Pada Kondisi Isotropi .....                               | 30             |
| Gambar 3.6 <i>Ellipsoid</i> 3D Pada Kondisi Anisotropi .....                             | 30             |
| Gambar 3.7 Contoh Visualisasi Data dan Model .....                                       | 36             |
| Gambar 3.8 Hubungan Eksplorasi sumberdaya dan cadangan .....                             | 37             |
| Gambar 4.1 Peta Geologi .....                                                            | 41             |
| Gambar 4.2 Peta Alterasi .....                                                           | 42             |
| Gambar 4.3 Tabulasi Data Litologi .....                                                  | 43             |
| Gambar 4.4 Hasil Implisit Model Geologi .....                                            | 44             |
| Gambar 4.5 Hasil Implisit Model Alterasi .....                                           | 46             |
| Gambar 4.6 Tabulasi Data <i>Assay</i> .....                                              | 48             |
| Gambar 4.7 Tabulasi Data <i>Collar</i> .....                                             | 49             |
| Gambar 4.8 Tabulasi Data Survei .....                                                    | 49             |
| Gambar 4.9 Sebaran Titik Bor .....                                                       | 50             |
| Gambar 4.10 Histogram <i>Raw Data</i> .....                                              | 51             |
| Gambar 4.11 Histogram Data Komposit .....                                                | 52             |
| Gambar 4.12 Model Topografi .....                                                        | 53             |
| Gambar 4.13 <i>Ore Body</i> .....                                                        | 54             |
| Gambar 4.14 <i>Block Model</i> .....                                                     | 55             |
| Gambar 4.15 Model Blok Hasil Estimasi Teknik OK .....                                    | 59             |
| Gambar 4.16 Model Blok Hasil Estimasi Pb Teknik OK .....                                 | 59             |

|                                                                              | <b>Halaman</b> |
|------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Gambar 4.17 Model Blok Hasil Estimasi Zn Teknik OK .....                     | 59             |
| Gambar 4.18 Histogram Blok Model Hasil Estimasi OK Domain <i>North</i> ..... | 60             |
| Gambar 4.19 Histogram Blok Model Hasil Estimasi OK Domain <i>South</i> ..... | 60             |
| Gambar 4.20 Hasil <i>Scatter Plot True &amp; Estimated Pb-Zn</i> .....       | 62             |
| Gambar 4.21 <i>Plan View Section Block Model North A-A'</i> .....            | 62             |
| Gambar 4.22 <i>Section Block Model A-A'</i> .....                            | 63             |
| Gambar 4.23 <i>Plan View Section Block Model South B-B'</i> .....            | 63             |
| Gambar 4.24 <i>Section Block Model B-B'</i> .....                            | 64             |
| Gambar 5.1 Model Geologi.....                                                | 67             |
| Gambar 5.2 <i>Section Model Geologi dan Alterasi A-A'</i> .....              | 67             |
| Gambar 5.3 <i>Section Model Geologi dan Alterasi B-B'</i> .....              | 68             |
| Gambar 5.4 <i>Section Model Geologi dan Alterasi C-C'</i> .....              | 68             |
| Gambar 5.5 Grafik Klasifikasi Sumberdaya Domain <i>North</i> .....           | 72             |
| Gambar 5.6 Grafik Klasifikasi Sumberdaya Domain <i>South</i> .....           | 72             |

## DAFTAR TABEL

|                                                                               | <b>Halaman</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Tabel 1.1 Tinjauan Pustaka .....                                              | 4              |
| Tabel 3.1 <i>General nature of major metalliferous skarn types</i> .....      | 20             |
| Tabel 3.2 Tabel Dasar Pemilihan Metode Estimasi .....                         | 30             |
| Tabel 5.1 Analisis Statistik <i>Raw Data</i> .....                            | 51             |
| Tabel 5.2 Analisis Statistik Data Komposit.....                               | 52             |
| Tabel 5.3 Parameter Model Blok.....                                           | 55             |
| Tabel 5.4 Parameter Variogram.....                                            | 57             |
| Tabel 5.5 <i>Fitting Variogram</i> .....                                      | 57             |
| Tabel 5.6 Parameter <i>Search Distance</i> .....                              | 58             |
| Tabel 5.7 Hasil Analisis Statistik Estimasi Metode <i>OK</i> .....            | 60             |
| Tabel 5.8 Hasil Estimasi Sumberdaya.....                                      | 61             |
| Tabel 5.9 Hasil <i>Scatter Plot True &amp; Estimated Pb-Zn</i> .....          | 61             |
| Tabel 5.10 Klasifikasi Sumberdaya Menggunakan RKSD .....                      | 64             |
| Tabel 5.11 Klasifikasi Sumberdaya Menggunakan <i>Kriging Efficiency</i> ..... | 65             |

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

PT. Generasi Muda Bersatu (PT GMB) merupakan perusahaan pertambangan yang berfokus pada eksploitasi galena (PbS), yaitu mineral bernilai ekonomis tinggi yang menjadi sumber utama timbal (Pb). Timbal memiliki berbagai aplikasi penting seperti dalam pembuatan baterai, pelindung radiasi, dan berbagai kebutuhan industri lainnya. Selain itu, galena sering mengandung seng (Zn), yang digunakan dalam galvanisasi baja, produksi kuningan, dan berbagai kebutuhan teknologi serta industri. Dengan meningkatnya permintaan global terhadap logam-logam ini, PT GMB menghadapi tantangan untuk menjaga pasokan bahan baku yang berkelanjutan.

Galena pada tambang PT GMB ditemukan dalam endapan skarn, yaitu jenis endapan mineral yang terbentuk akibat proses metasomatisme kontak antara magma dan batuan karbonat. Endapan skarn dikenal dengan kompleksitas geologi yang tinggi, meliputi variasi mineralogi, tekstur, dan geometri deposit. Keberagaman ini menimbulkan tantangan dalam eksplorasi dan penaksiran sumber daya mineral. Selain itu, biaya eksplorasi yang tinggi serta kendala teknis yang muncul selama pengeboran mengakibatkan terbatasnya jumlah titik bor yang tersedia.

Keterbatasan titik bor ini berdampak langsung pada distribusi data, yang pada akhirnya memengaruhi ketepatan dalam memodelkan distribusi spasial mineral Pb dan Zn. Variasi spasial yang tinggi dapat meningkatkan ketidakpastian estimasi sumber daya, sehingga memengaruhi perencanaan tambang dan keputusan investasi. Untuk mengatasi keterbatasan ini, diperlukan metode penaksiran yang optimal dan sesuai dengan karakteristik geologi deposit serta kondisi pendanaan eksplorasi.

Berdasarkan penelitian terdahulu nilai *coefficient of varians* (cv) untuk mineral deposit seng (Zn) diangka 0.85 dan timbal (Pb) 0.57 (Heriawan, 2011). *Coefficient of varians* dengan nilai lebih dari 0.5 menunjukkan variabilitas nilai data tidak teratur (*eratic*), sehingga dapat mempengaruhi hasil estimasi (Bargawa, 2018). Menurut buku *Society for Mining, Metallurgy and Exploration* (SME, 2011) *base metal skarns* memiliki variabilitas moderat dengan nilai cv 0.25 – 0.75 dan geometri yang kompleks dengan rekomendasi metode estimasi menggunakan *ordinary kriging*. Metode *ordinary kriging* dianggap lebih unggul dibandingkan metode konvensional karena memanfaatkan konsep korelasi spasial antar data. Metode ini tidak hanya dipengaruhi oleh jarak antar titik sampel, tetapi juga mempertimbangkan hubungan spasial antara titik-titik sampel dalam ruang. Korelasi spasial tersebut dinyatakan melalui variogram.

Variogram digunakan untuk menghitung tingkat kemiripan suatu titik data terhadap data lainnya dalam rentang jarak tertentu. Hasil konstruksi variogram dapat bervariasi berdasarkan arah, hal ini menunjukkan suatu variabel memiliki sifat anisotropi. Pemodelan atau *fitting* anisotropi ellipsoid berdasarkan beberapa arah azimuth menunjukkan hasil yang berbeda (Fikri, 2016). Menurut Winarno (2020) *fitting* model variogram teoritis dilakukan sebagai proses pencocokan antara variogram eksperimental dengan model variogram yang sesuai, tiga model yang digunakan yaitu model *spherical*, *exponential* dan *gaussian*. Dari analisis variogram ini diperoleh parameter *nugget*, *sill*, dan *range* (*major range* dan *minor range*) serta bentuk anisotropi yang akan digunakan dalam proses analisis data menggunakan metode *ordinary kriging*. Dengan kemampuan menangani variabilitas yang tinggi dan keterbatasan data, *ordinary kriging* menjadi metode yang sesuai untuk diterapkan pada daerah penelitian.

## 1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang terjadi dalam penelitian ini ialah:

1. Bagaimana kondisi geologi dan alterasi daerah penelitian?
2. Bagaimana pemilihan model variogram dan arah anisotropi terbaik pada penaksiran sumber daya Pb-Zn?

3. Bagaimana klasifikasi sumberdaya teknik *ordinary kriging* berdasarkan perhitungan *Relative Kriging Standard Deviation (RKSD)* dan *Kriging Efficiency (KE)*?

### 1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis kondisi geologi dan alterasi daerah penelitian.
2. Menganalisis model variogram dan arah anisotropi terbaik pada hasil penaksiran sumber daya Pb-Zn.
3. Mengklasifikasi sumberdaya teknik *ordinary kriging* berdasarkan perhitungan *Relative Kriging Standard Deviation (RKSD)* dan *Kriging Efficiency (KE)*.

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memperoleh informasi mengenai kondisi geologi dan alterasi di daerah penelitian.
2. Menentukan model variogram dan arah anisotropi yang terbaik untuk penaksiran sumberdaya Pb-Zn.
3. Menghasilkan klasifikasi sumberdaya menggunakan *ordinary kriging* berdasarkan perhitungan *Relative Kriging Standard Deviation (RKSD)* dan *Kriging Efficiency (KE)*.

### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah penelitian ini adalah

1. Penelitian dilakukan di PT. Generasi Muda Bersatu.
2. Data *assay* dikompositkan dengan interval 1 meter.
3. Ukuran blok model dalam penelitian ini adalah 7,5m x 7,5m x 1m diperoleh dari perhitungan  $\frac{1}{4}$  (satu per empat) dari jarak antar sampel 30m (Hustrulid dan Kuchta, 1995).
4. Aplikasi perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah *micromine 2024* lisensi laboratorium simulasi dan komputasi jurusan Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta.

## 1.5 Tinjauan Pustaka

Beberapa tinjauan pustaka yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1. Tinjauan Pustaka

| No | Referensi             | Judul                                                                                             | Metode                                                                                                                  | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|----|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Usman, F., dkk 2022   | Model semivariogram dalam menaksir sebaran kadar Ni menggunakan metode <i>ordinary kriging</i>    | Penelitian ini menggunakan pendekatan masalah dengan permodelan semivariogram <i>spherical, exponential, gaussian</i> . | Model semivariogram terpilih yang cocok untuk menginterpolasi kadar Ni pada lapisan limonit adalah model eksponensial, lapisan saprolit adalah model <i>spherical</i> , dan lapisan <i>bedrock</i> adalah model <i>gaussian</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| 2  | Anggara, B., dkk 2021 | Penentuan model variogram berdasarkan <i>root mean square error</i> di PT. X Sulawesi Utara       | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical, exponential</i> dan <i>gaussian</i> .   | Dari hasil penelitian maka dapat diambil kesimpulan bahwa model variogram yang paling sesuai untuk kadar nikel lapisan limonit dan saprolit adalah model <i>exponential</i> dengan nilai RMSE 0,186369 dan 0,303487. Hasil estimasi sumberdaya nikel laterit pada daerah penelitian dengan metode <i>ordinary kriging</i> yaitu 1.595.570 ton. Berdasarkan hasil klasifikasi sumberdaya nikel berdasarkan <i>kriging</i> efisiensi, didapatkan jumlah sumberdaya terukur 899.375 ton, tertunjuk 223.563 ton dan tereka 473.032 ton. |
| 3  | Amelia R., dkk 2020   | Pendekatan semivariogram anisotropi dalam metode <i>ordinary kriging</i> terhadap pola penyebaran | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical, exponential</i> dan <i>gaussian</i> .   | Pencocokan semivariogram secara teoritis menghasilkan model yang berbeda-beda untuk tiap mineral. Model yang lebih cocok                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

|   |                          |                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                          | mineral ikutan timah.                                                                                             |                                                                                                                                                                                   | untuk mineral hematit dan zirkon adalah model <i>exponential</i> , sedangkan timah menggunakan model <i>Gaussian</i> . Sedangkan arah penyebaran yang tepat dalam melakukan penambangan dapat dilakukan pada arah timur dari lokasi penelitian                                                                                                                                                                      |
| 4 | Bargawa, W.S. (2020) (B) | Analisis pengaruh perubahan model variogram untuk estimasi memakai Teknik blok kriging                            | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical</i> , <i>exponential</i> dan <i>gaussian</i> dan orientasi isotropi dan anisotropi.                | Simulasi model variogram diperlukan untuk menentukan model yang paling cocok untuk diterapkan pada data di daerah penelitian Berdasarkan penentuan diskritisasi block kriging 2x2 model variogram <i>spherical</i> paling baik untuk diterapkan dengan nilai <i>regression coefficient</i> sebesar 1,056; R <sup>2</sup> sebesar 0,414; Yint sebesar -0,01 dan SE <i>prediction</i> sebesar 0,158.                  |
| 5 | Bargawa, W.W (2020) (A)  | Analisis pengaruh perubahan model variogram dan arah anisotropi terhadap metode geostatistik Teknik point kriging | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>linear</i> , <i>spherical</i> , <i>exponential</i> dan <i>gaussian</i> dan orientasi isotropi dan anisotropi | Berdasarkan parameter regresi linier aplikasi metode point kriging memakai model variogram <i>spherical</i> dan orientasi anisotropi menghasilkan nilai koefisien regresi 1,056; SE 0,112; R <sup>2</sup> 0,414; Y-intercept -0,010; dan SE <i>Prediction</i> 0,158. Analisis penaksiran kadar Pb dengan metode <i>point kriging</i> memakai model variogram <i>spherical</i> dan orientasi anisotropi cukup akurat |

|   |                           |                                                                                                         |                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|---|---------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                           |                                                                                                         |                                                                                                                                               | dibandingkan dengan parameter lainnya                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 6 | Rashad. M.Z., dkk (2020)  | <i>Selection of variogram models</i>                                                                    | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical</i> , <i>exponential</i> dan <i>gaussian</i> , <i>linear</i> . | Secara statistik model <i>spherical</i> , <i>exponential</i> , <i>gaussian</i> dapat mewakili akuifer di wilayah Saqqara, namun model <i>spherical</i> lebih cocok digunakan. Model <i>linear</i> tidak cocok dalam penelitian ini.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| 7 | Hidayat, M.K., dkk (2022) | Permodelan dan estimasi sumberdaya bijih emas di PT. DEF Kec. Simpenan, Kab. Sukabumi, Prov. Jawa Barat | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical</i> .                                                          | Dari hasil estimasi sumberdaya yang telah dilakukan pada daerah penelitian Blok A mendapatkan volume total sebanyak 243.373 BCM dengan kadar rata-rata 0,93 ppm, dengan klasifikasi kadar <i>low grade</i> sebanyak 112.895 BCM kadar rata-rata 0,62 ppm, <i>medium garde</i> sebanyak 126.271 BCM kadar rata-rata 1,16 ppm dan <i>high grade</i> sebanyak 4.207 BCM kadar rata-rata 2,22 ppm, dan untuk Blok B didapatkan volume total sebanyak 133.460 BCM dengan kadar rata-rata 0,95 ppm, dengan klasifikasi kadar <i>low grade</i> sebanyak 71.937 BCM kadar rata-rata 0,62 ppm, <i>medium garde</i> sebanyak 53.894 BCM kadar rata-rata 1,16 ppm dan <i>high grade</i> sebanyak 7.629 BCM kadar rata-rata 2,46 ppm |
| 8 | Fikri H., dkk (2016)      | Analisis daerah pengaruh berpola anisotropi <i>ellipsoid</i> terhadap hasil estimasi sumberdaya         | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical</i> .                                                          | Fitting terhadap pola anisotropi <i>ellipsoid</i> berdasarkan metode <i>direct least square</i> dan manual                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |

|   |                        |                                                                                      |                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|---|------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                        | batubara dengan pendekatan geostatistik                                              |                                                                                                           | 4 arah utama menunjukkan hasil <i>range</i> dan <i>azimuth</i> pada sumbu panjang (utama) yang berbeda terutama pada kualitas batubara (kandungan abu, nilai kalori, dan total sulfur), sementara untuk ketebalan seam hasilnya hampir sama. Perbedaan nilai <i>range</i> berkisar antara 4.94 – 40.2 m, sedangkan perbedaan pada arah <i>azimuth</i> berkisar antara 40 – 67.5o                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| 9 | Amri N. A., dkk (2017) | <i>Consistency of the semivariogram fitting error on ordinary kriging prediction</i> | Pendekatan penelitian dilakukan dengan pendekatan model variogram <i>spherical</i> , <i>exponential</i> . | Nilai RMSE terkecil dari <i>fitting</i> klasik kelompok semivariogram diamati melalui OLS berdasarkan fungsi <i>exponential</i> , yang digambarkan sebagai Model 4, yaitu, 0207. Model yang kuat berlaku untuk Model 8, yaitu, 0683. Model 4 juga menempati peringkat pertama berdasarkan TOPSIS model untuk validasi silang <i>jackknifing</i> dan <i>kriging</i> prediksi menggunakan reduksi data. Model ini prediksi didasarkan pada parameter klasik (dalam tambahan untuk Model 1). Basis parameter yang kuat berlaku untuk Model 8 (selain Model 7). Ada hubungan antara ketepatan dalam pemasangan semivariogram dan "derajat presisi" dalam "prediksi kriging biasa." |

Penelitian ini mempertimbangkan pengaruh model variogram dan arah anisotropi terhadap penaksiran sumberdaya. Model variogram yang digunakan adalah *spherical*, *exponential* dan *gaussian* serta empat arah utama anisotropi (*N-S*, *NE-SW*, *E-W*, *NW-SE*) yang dapat mengatasi keterbatasan data dan meningkatkan akurasi penaksiran sumberdaya.

### **1.6 Hipotesis Penelitian**

Hipotesis dari penelitian ini adalah:

1. Kondisi geologi daerah penelitian didominasi oleh batuan vulkanik, batugamping dan alterasi didominasi oleh silifikasi.
2. Model variogram *spherical* dan arah anisotropi azimuth *N-S* lebih optimal dalam penaksiran sumber daya Pb-Zn.
3. Klasifikasi sumberdaya dengan perhitungan *Relative Kriging Standard Deviation (RKSD)* dan *Kriging Efficiency (KE)* menghasilkan klasifikasi yang berbeda.

### **1.7 Manfaat Penelitian**

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat sebagai penerapan model variogram dan arah anisotropi dengan hasil yang terbaik untuk penaksiran sumberdaya galena dengan tipe endapan skarn.

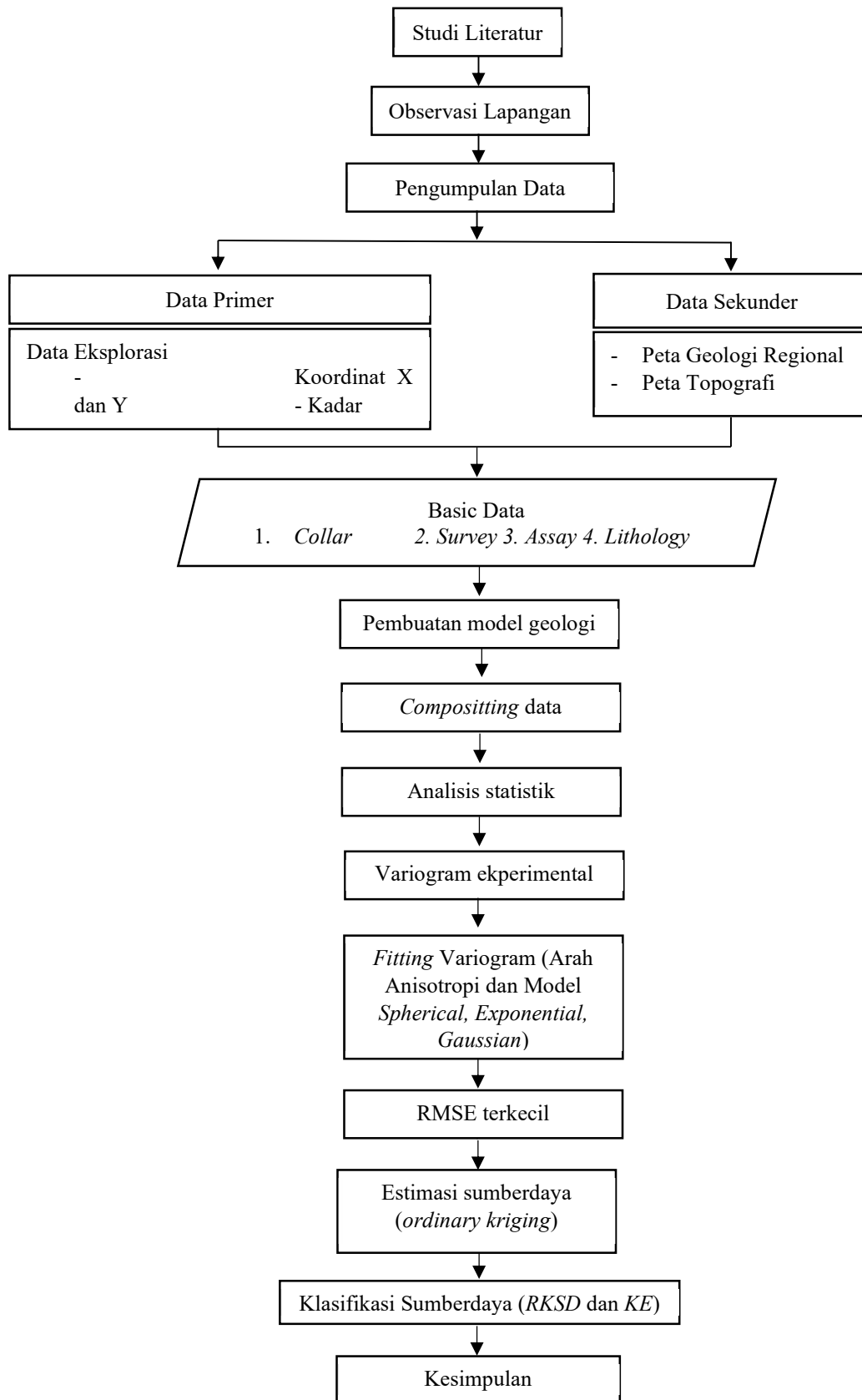
### **1.8 Metode Penelitian**

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah deskriptif kuantitatif dengan mengumpulkan data primer dan data sekunder yang representatif di daerah penelitian. Kemudian data tersebut diolah dan dianalisis dengan bantuan *software micromine 2024*. Metode pengumpulan dan analisis data dalam penelitian ini sebagai berikut :

1. Melakukan studi literatur yang berkaitan dengan penelitian melalui studi kasus dari jurnal ilmiah internasional maupun nasional, buku, dan artikel di internet.
2. Melakukan observasi lapangan berupa pengamatan langsung di lapangan, tepatnya di PT. Generasi Muda Bersatu, Kabupaten Sukabumi, Provinsi Jawa

Barat.

3. Melakukan pengambilan data pemboran pada 66 titik pemboran dengan spasi 30 meter. Data hasil pemboran yang diperoleh meliputi analisa sampel inti bor, koordinat (*easting, northing*) dan elevasi lokasi titik bor, kedalaman lubang bor, serta deskripsi litologi dan alterasi lubang bor. Selain data bor, data penunjang lainnya yaitu peta geologi regional, peta kesampaian daerah dan peta topografi lokasi penelitian.
4. Melakukan pengolahan data dengan bantuan *software Microsoft excel*, dan *micromine 2024* yang meliputi pengolahan basis data, validasi data, analisis statistik analisis variogram, estimasi kadar dengan metode *ordinary kriging*, dan validasi hasil estimasi. Kemudian melakukan tabulasi sumberdaya dan analisis tingkat akurasi metode estimasi serta analisis *relative kriging standart deviation* dan *kriging efficiency* sebagai dasar klasifikasi sumberdaya. Gambar 1.1 menunjukan alur penelitian.



Gambar 1.1 Bagan Alir Penelitian

## **BAB II**

### **TINJAUAN UMUM**

#### **2.1 Profil PT. Generasi Muda Bersatu (GMB)**

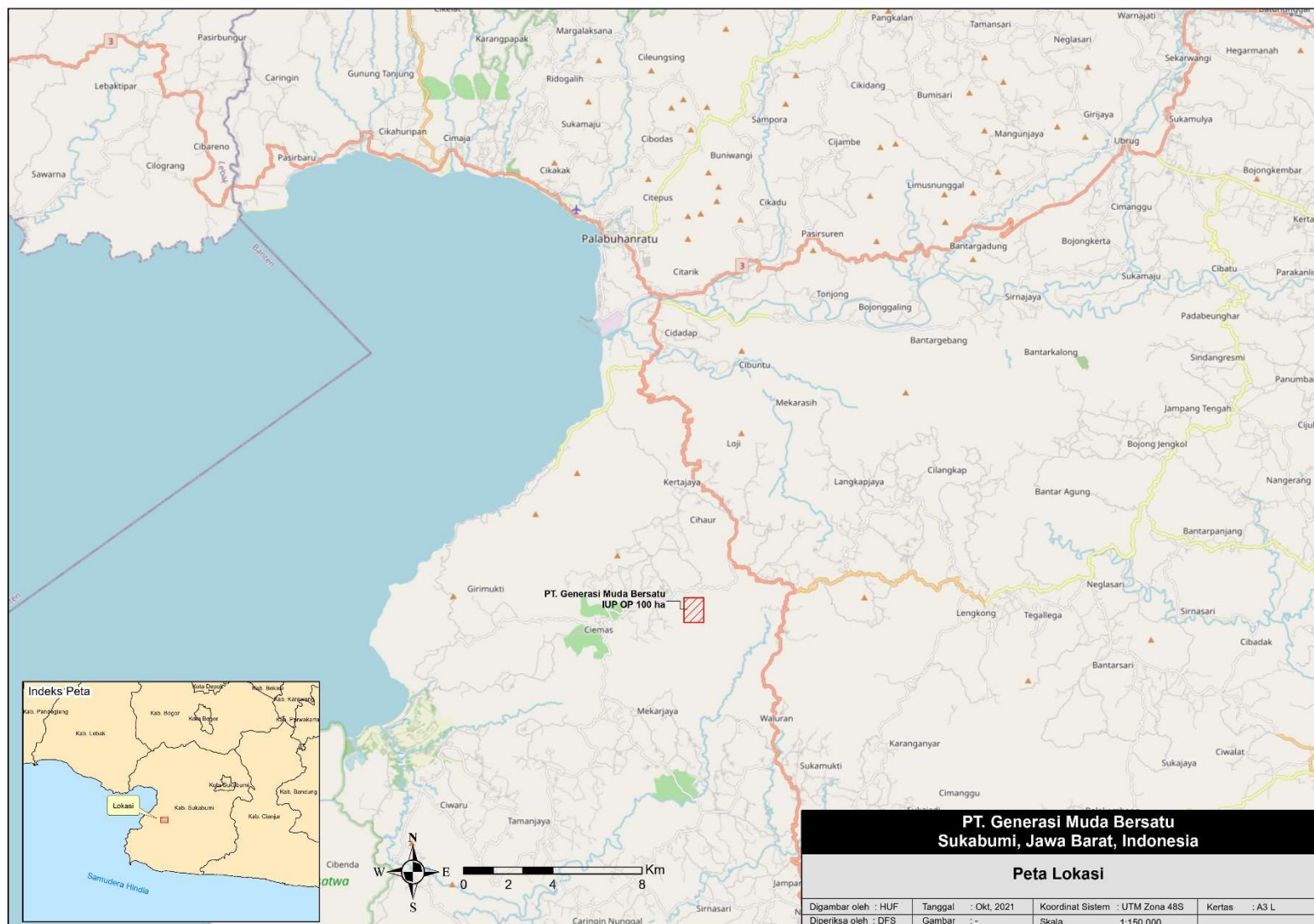
PT. Generasi Muda Bersatu (GMB) merupakan perusahaan swasta yang bergerak di bidang penambangan bijih galena di Jawa Barat, Indonesia. Salah satu lokasi yang menjadi target eksplorasi galena yaitu di daerah Simpenan, Kabupaten Sukabumi. Luas wilayah Ijin Usaha Penambangan (IUP) PT. GMB ialah sebesar 100 hektar

##### **Identitas Perusahaan**

- Nama Perusahaan : PT Generasi Muda Bersatu
- Penanggung Jawab : Rusli Beramsah
- Jabatan : Direktur
- Kode Wilayah : 2.2.32.02.2.34.2020.054
- Alamat Perusahaan : Kp. Mariuk RT 002 RW 002 Desa Cidadap, Kec.Simpenan, Kab. Sukabumi, Prov. Jawa Barat
- Lokasi Kegiatan : Blok Cibujang dan Sabau, Desa Cihaur, Kec.Simpenan, Kab. Sukabumi, Prov. Jawa Barat
- Jenis Komoditas : Mineral Logam Galena Luas100 hektar

#### **2.2 Lokasi dan Kesampaian Daerah**

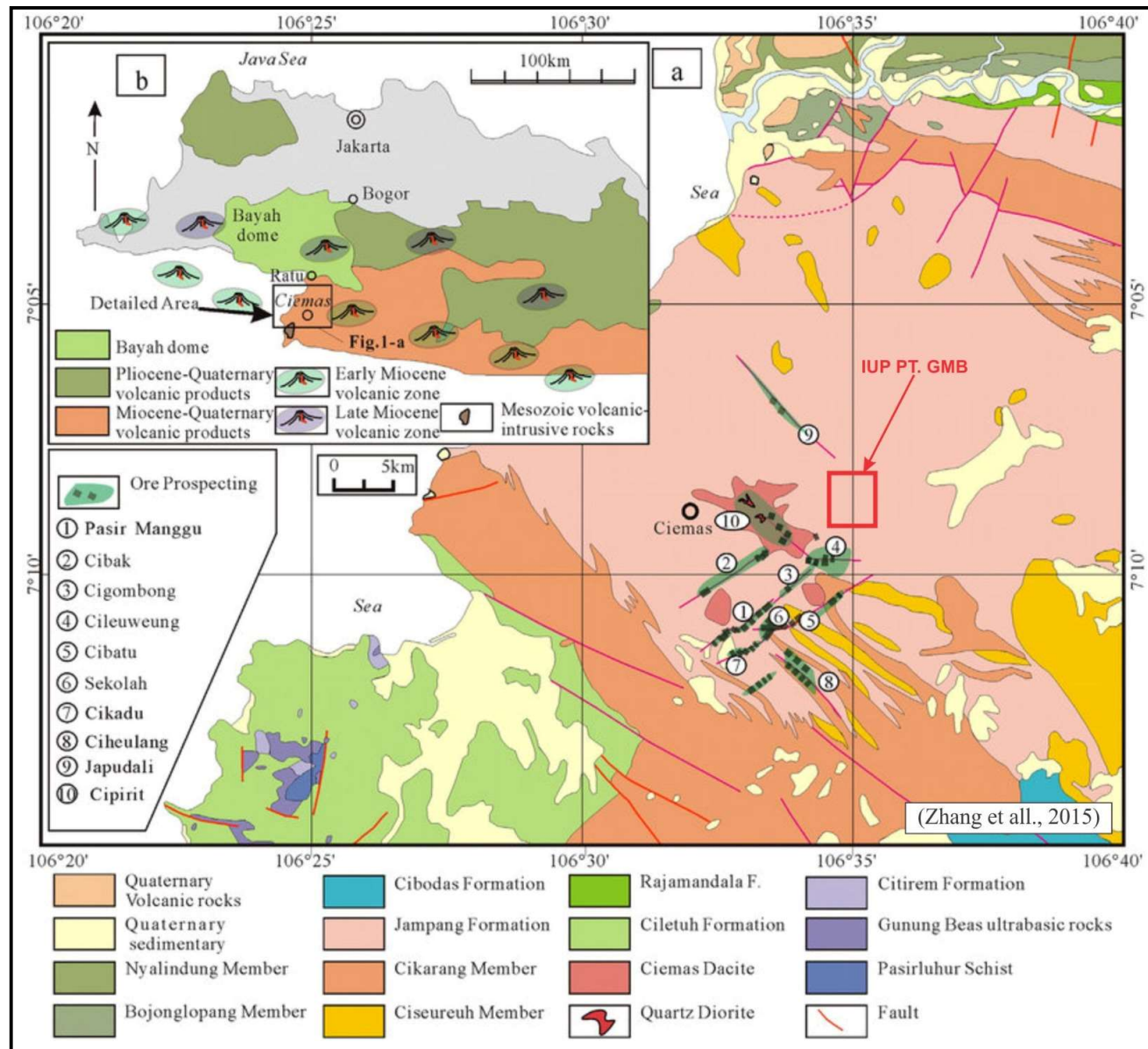
Lokasi penelitian berada di daerah eksplorasi PT. GMB dan sekitarnya dengan luasan 100 ha. Secara administratif, lokasi tersebut berada di Desa Cihaur, Kecamatan Simpenan, Kabupaten Sukabumi (Gambar 2.1). Kesampaian daerah dapat dijangkau melalui perjalanan darat dari Jakarta ke selatan menuju Kota Bogor, kemudian menuju Kota Pelabuhan Ratu ke arah Jalan Raya Simpenan. Total jarak dari menuju lokasi peninjauan yaitu 172 km dengan jarak tempuh kurang lebih 4 jam 14 menit.



Gambar 2.1 Peta lokasi penelitian di Cihaur (PT. GMB)

### 2.3 Geologi Regional

Geologi regional daerah Cihaur dan sekitarnya merupakan bagian dari Formasi Jampang (Tmjv) yang berumur Miosen bawah, dan yang juga berada di sekitar batuan intrusif dasit Ciemas (Tmcd). Formasi Jampang merupakan kelompok batuan vulkanik yang memiliki anggota batuan ekstrusif seperti lava dan vulkaniklastik anggota Cikarang (Tmja), anggota Ciseuruh (Tmjc). Pada bagian terluar terdapat juga batuan karbonat dan sedimen klastika berumur Miosen anggota Formasi Lengkong dan Bojonglopang (Gambar 2.2). Pada sisi selatan dan barat, dijumpai kompleks batuan tertua yaitu kompleks ofiolit dan metamorfik dari Formasi Citerem, yang berumur Mesozoikum. Pada bagian selatan juga terdapat batuan sedimen tertua adalah batuan klastika laut dari Formasi Ciletuh yang berumur Eosen. Berdasarkan data regional, tampak jelas bahwa daerah IUP GMB berada pada lingkungan batuan vulkanik dan intrusi yang berada diantara lingkungan laut yang diperlihatkan adanya juga endapan pantai dan batuan karbonat pada sisi utara dan timur IUP. Kondisi geologi daerah IUP-OP GMB, merupakan bagian dari distrik geologi dan mineralisasi Ciemas yang secara umum terbentuk dari sisa vulkanisme pada Miosen dan kemungkinan terdapat batuan berumur Pliopleistosen. Intrusi daerah Ciemas yang berumur sekitar 16,9 - 17,5 jtl (juta tahun lalu). Diorite kuarsa Ciemas memiliki 63.79–65.44% (average 64.63%) SiO<sub>2</sub>, tinggi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (16.81– 17.92%, average 17.20%) dan rendah MgO (1.01–2.08%, average 1.55%) dengan afinitas Calc Alkali (Wu et al, 2014). Berdasarkan interpretasi distrik, secara kasar, sebagai preliminary study, terlihat adanya evolusi vulkanisme yang intensif. Dimana sistem kaldera (stratovolcano) awal memiliki radius yang signifikan yang membentuk 15 km, dimana pusat sistem vulkanisme diperkirakan berada pada Ciemas (Ciparit), yang terbukti adanya kelompok intrusi dasitik yang sangat luas.



Gambar 2.2 Peta geologi daerah Desa Cihaur (Sumber : Zhang, 2015)

## **2.4 Stratigrafi Regional**

Daerah penelitian dan sekitarnya terletak dalam peta geologi regional lembar Jampang dan Balekambang skala 1 : 100.000 yang dipublikasikan oleh Sukanto (1975). Unit litologi yang menyusun sekitar daerah penelitian dari tua ke muda terdiri dari :

- a. Formasi Jampang, merupakan satuan yang mendominasi di sekitar lokasi penelitian dan terdiri dari litologi breksi vulkanik, tufa dari anggota Cikarang, dan lava dari anggota Ciseureuh.
- b. Dasit Ciemas, merupakan intrusi dasit di sekitar Desa Ciemas yang disinyalir sebagai pembawa zona mineralisasi emas. Satuan dasit ini menerobos Formasi Jampang.
- c. Sedimen Pasir.
- d. Endapan Undak, berupa undak-undakan di sekitar sungai yang tersusun atas aluvial berupa pasir lepas, lempung, dan sedimen lepas berukuran kerakal hingga bongkah.
- e. Alluvium. Mengacu pada peta geologi regional maka daerah penelitian secara keseluruhan termasuk ke dalam Formasi Jampang.

## **BAB III**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **3.1. Endapan Skarn**

##### **3.1.1. Endapan Skarn**

Banyak endapan bijih terbentuk melalui penggantian batuan yang sudah ada pada suhu rendah hingga sedang ( $<400^{\circ}\text{C}$ ), misalnya, endapan magnesit pada sedimen, bijih pirofilit dalam piroklastik yang telah mengalami alterasi, dan endapan siderit dalam batu kapur. Proses penggantian lainnya terjadi pada suhu tinggi, di daerah kontak dengan intrusi beku berukuran sedang hingga besar. Oleh karena itu, endapan semacam ini disebut metamorf kontak. Istilah "skarn" sekarang lebih populer dan lebih umum digunakan. Badan-badan bijih ini ditandai dengan perkembangan mineral kals-silikat seperti diopsid, wollastonit, garnet andradit, dan aktinolit. Endapan ini memiliki bentuk yang sangat tidak teratur, tonjolan bijih dapat menjulur sepanjang struktur planar yang tersedia—perlapisan, retakan, patahan, dan distribusinya dalam aureol kontak sering kali tampak acak. Perubahan struktural dapat menyebabkan terhentinya badan bijih secara tiba-tiba. Material utama yang dihasilkan dari endapan skarn meliputi: besi, tembaga, tungsten, grafit, seng, timbal, molibdenum, timah, uranium, garnet, talk, dan wollastonit. (Evans, A. M. 1993)

Endapan ini seringkali, namun tidak selalu, berkembang di daerah kontak antara pluton intrusif dan batuan karbonat di sekitarnya. Batuan karbonat ini diubah menjadi marmer, hornfels kals-silikat, dan/atau skarn oleh efek metamorf kontak. Mineral kalk-silikat, seperti diopside, andradit, dan wollastonit, yang sering kali merupakan mineral utama dalam skarn yang mengandung bijih ini, membuktikan suhu tinggi yang terlibat, dan berbagai bukti menunjukkan kisaran  $650\text{--}400^{\circ}\text{C}$  untuk pembentukan skarn awal, tetapi pada beberapa skarn, khususnya Zn-Pb, suhu yang lebih rendah. Tekanan pada saat pembentukan sangat bervariasi karena kedalaman pembentukan mungkin dari satu hingga beberapa kilometer. (Evans, A.

M. 1993). Skarn dapat terbentuk karena (i) rekristalisasi metamorf dari batuan karbonat, (ii) reaksi metasomatik antara batuan dengan jenis yang berbeda, atau (iii) metasomatisme infiltrasi yang disebabkan oleh fluida hidrotermal. (Edwards, R. and Atkinson, K. 1986).

Endapan skarn seng-timbal terdapat di seluruh dunia dalam berbagai pengaturan geologi, biasanya sebagai badan pengganti dalam batugamping pada jarak tertentu dari kontak intrusif (endapan distal), meskipun endapan proksimal diketahui. Ciri khas dari jenis skarn ini meliputi : (a) kemunculan di sepanjang kontak struktural atau litologi; (b) tidak adanya aureol metamorf yang signifikan yang berpusat pada skarn; (c) rasio piroksen:garnet yang relatif tinggi, (d) mineral kaya Mn dan Fe yang khas (misalnya, piroksen johannesenitik awal dan garnet andraditik minor, dan bustamit akhir, rhodonit, dannemorit, dan ilvait); dan (d) banyaknya sulfida (misalnya, sfalerit, galena, pirit, pirotit) yang berasosiasi dengan piroksen daripada dengan garnet atau mineral silikat lainnya. Endapan tersebut umumnya terlokalisasi di celah-celah yang berhubungan dengan patahan, yang tampaknya telah menyediakan jalur saluran untuk pergerakan fluida. (Misra, K. C. 2000).

### **3.1.2. Klasifikasi Endapan Skarn**

Skarn dapat diklasifikasikan menurut jenis batuan yang digantikannya dan istilah 'eksoskarn' dan 'endoskarn' telah diterapkan pada penggantian karbonat dan batuan intrusif masing-masing di zona kontak tempat batuan intrusif diasumsikan terkait secara genetis dengan fluida pembentuk skarn. Endoskarn lebih disukai di daerah tempat aliran fluida dianggap dominan ke dalam pluton atau ke atas sepanjang kontak dengan karbonat daripada tempat aliran fluida metasomatik sebagian besar keluar dari pluton. Endoskarn menunjukkan zonasi mineral yang mencerminkan penambahan kalsium. Dalam kondisi reduksi, urutan menuju batugamping adalah biotit-amfibol-piroksen (garnet). Feldspar kalium apa pun menghilang, sedangkan biotit dan plagioklas tetap penting, kecuali dalam kasus langka di mana garnet menjadi dominan. Eksoskarn dapat diklasifikasikan berdasarkan kumpulan mineral kalk-silikat dominan, yang pada gilirannya mencerminkan komposisi batuan karbonat yang digantikan, menjadi (a) skarn

magnesian - skarn yang menggantikan dolomit dan sebagian besar terdiri dari silikat magnesia (misalnya forsterit dan serpentin) dan (b) skarn kalk - skarn yang menggantikan batu kapur dan sebagian besar terdiri dari silikat Fe-Ka (misalnya andradit dan hedenbergit). Sebagian besar endapan skarn ekonomi dunia terjadi di eksoskarn kalk ini.

### **3.1.3. Genesis Endapan Skarn**

Pola umum dalam evolusi skarn proksimal (skarn dekat atau pada kontak beku) telah dikenali yang mengambil bentuk (1) metamorfisme isokimia awal, (2) beberapa tahap metasomatisme, dan (3) alterasi retrograde. Tahap pertama ini melibatkan rekristalisasi batuan di sekitar intrusi penyebab, menghasilkan marmer dari batu kapur, hornfels dari serpih, kuarsit dari batu pasir, dll. Skarn reaksi dapat terbentuk di sepanjang kontak litologi. Jika marmer tidak murni maka berbagai kalsium dan magnesium silikat dapat terbentuk dan kita memiliki hornfels kalk-silikat yang mungkin mengandung mineral yang bernilai ekonomis, seperti talk dan wollastonit. Proses utama yang terlibat dalam metamorfisme isokimia ini adalah difusi unsur-unsur dalam apa yang pada dasarnya dapat menjadi cairan stasioner, selain dari pengusiran beberapa air metamorf. Batuan secara keseluruhan dapat menjadi lebih rapuh dan lebih rentan terhadap infiltrasi cairan pada tahap dua.

Infiltrasi batuan kontak oleh fluida hidrotermal-magmatik menyebabkan perubahan marmer murni dan tidak murni, dan jenis batu lainnya, menjadi skarn dan modifikasi batuan tanduk silikat kalk pada tahap satu. Ini adalah proses metamorf dan metasomatik prograde yang beroperasi pada suhu sekitar 800-400°C di mana fluida bijih berevolusi, pengendapan bijih awal terjadi dan pluton mulai mendingin. Mineral-mineral baru yang terbentuk (Tabel 3.1) sebagian besar anhidrat. Pengendapan oksida (magnetit, kasiterit) dan sulfida dimulai pada tahap akhir ini, tetapi umumnya mencapai puncaknya selama tahap tiga.

Ini adalah tahap retrograde (destruktif) yang menyertai pendinginan pluton terkait dan melibatkan alterasi hidrous mineral skarn awal dan bagian intrusi oleh waler meleolic yang bersirkulasi. Kalsium cenderung terlindi dan zat volatil diperkenalkan dengan perkembangan mineral seperti epidot rendah besi, klorit,

aktinolit, dll. (lihat Tabel 3.1). Penurunan suhu menyebabkan presipitasi sulfida. Alterasi biasanya dikontrol secara struktural dan memotong pola skarn awal dengan pengendapan sulfida yang sering meluas melampaui batas skarn menjadi marmer atau hornfels. Di sini reaksi pada kontak marmer dapat menyebabkan netralisasi larutan hidrotermal dan pengembangan bijih sulfida bermutu tinggi. Pada skarn distal, tahap satu, atau bahkan tahap dua, mungkin tidak berkembang dan penelitian inklusi fluida menunjukkan suhu pembentukan 350-210°C. Seperti yang ditunjukkan Meinert (1983), tingkat perkembangan tahap tertentu pada skarn tertentu akan bergantung pada lingkungan geologisnya. Metamorfisme selama tahap 1 dan 2 cenderung lebih luas dan bermutu lebih tinggi di sekitar skarn yang berkembang pada tingkat kerak yang dalam daripada yang terbentuk pada kedalaman yang dangkal. Sebaliknya, alterasi retrograde selama pendinginan dan kemungkinan masuknya air meteorik (tahap 3) mungkin akan lebih intens di tingkat yang dangkal daripada di tingkat yang lebih dalam.

Tabel 3.1. *General nature of major metalliferous skarn types* (Evans, A. M. 1993)

| Type                                                      | Calcic copper                                            | Calcic iron                                     | Magnesian Iron                                           | Calcic tungsten                                          | Calcic zinc-lead                                                               | Calcic molybdenum                                             | Calcic tin                                                   | Magnesian tin                                                     |
|-----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|
| Metal association (minor metals)                          | Cu, Mo (W, Zn)                                           | Fe (Cu, Co, Au)                                 | Fe (Cu, Zn)                                              | W, Mo, Cu (Zn, Bi)                                       | Zn, Pb, Ag (Cu, W)                                                             | Mo, W, (Cu, Bi, Zn)                                           | Sn (Be, W)                                                   | Sn (Be)                                                           |
| Principal ore and opaque minerals                         | Chalcopyrite, bornite, pyrite, hematite, magnetite       | Magnetite (chalcopyrite, cobaltite, pyrrhotite) | Magnetite (pyrite, chalcopyrite, sphalerite, pyrrhotite) | Scheelite, molybdenite, chalcopyrite, pyrrhotite, pyrite | Sphalerite, galena, chalcopyrite, arsenopyrite                                 | Molybdenite, scheelite, bismuthinite, pyrite, chalcopyrite    | Cassiterite, arsenopyrite, stannite, pyrrhotite              | Cassiterite, minor arsenopyrite, pyrrhotite, stannite, sphalerite |
| Typical size (Mt)                                         | 1-100                                                    | 5-200                                           | 5-100                                                    | 0,1-2                                                    | 0,2-3                                                                          | 0,1-2                                                         | 0,1-3                                                        | 1                                                                 |
| Typical grade                                             | 2% Cu u.g. 1&Cu o.p.                                     | 40% Fe                                          | 40% Fe                                                   | 0,7% WO <sub>3</sub>                                     | 9% Zn, 6% Pb, 171 ppm Ag                                                       | 0,15-1% MoS <sub>2</sub>                                      | 0,1-0,7% Sn                                                  | Little data                                                       |
| Largest known deposit                                     | Twin Buttes, Arizona, 500 Mt, 8% Cu                      | Sarbai, USSR, 725 Mt. 46% Fe                    | Sherogesh, USSR, 234 Mt, 35% Fe                          | MacMillan Pass, Canada, 63 Mt. 0,95% WO <sub>3</sub>     | Naica, Mexico 21 Mt, 3,8% Zn, 4,5% Pb, 0,4% Cu, 150 ppm Ag, 0,3 ppm Au         | Little Boulder, Creek, Idaho, >100 Mt, 0,15% MoS <sub>2</sub> | Moia, Tasmania, 30 Mt, 0,15% Sn                              | ?                                                                 |
| Exoskarn gangue mineralogy : Early mineral (stages 1 & 2) | Andradite, diopside, wollastonite                        | Ferrosalite, grandite, epidote, magnetite       | Forsterite, calcite, spinel, diopside, magnetite         | Grandite, hedenbergite, idocrase, wollastonite           | Mn-Hedenbergite, andradite, bustamite, rhodonite                               | Hedenbergite, grandite, quartz                                | Malayaite, danburite, dactolite, grandite, idocrase          | Spinel, fassaite, forsterite, phlogopite, magnetite, humite       |
| Late minerals (stage 3)                                   | Actinolite, chlorite, montmorillonoids                   | Amphibole, chlorite, ilvaite                    | Amphibole, humite, serpentine, phlogopite                | Hornblende, biotite, plagioclase, epidote, MnFe garnet   | Mn-actinolite, ilvaite, chlorite, dannemorite, rhodochrosite                   | Amphibole, chlorite                                           | Amphibole, mica, chlorite, tourmaline, fluorite              | Cassiterite, fluorite, magnetite, micas, fluorite                 |
| Associated intrusives                                     | Granodiorite to monzogranite                             | Gabbro to syenite, mostly diorite               | Granodiorite to granite                                  | Quartz diorite to monzogranite                           | Plutons commonly absent, otherwise granodiorite to granite, diorite to syenite | Monzogranite and syenogranite                                 | Granite                                                      | Granite                                                           |
| Intrusive morphology                                      | Stock, dykes, breccia pipes                              | Large to small stocks, dykes                    | Small stocks, dyke, sills                                | Large plutons, batholiths                                | If present, stocks and dykes                                                   | Stocks                                                        | Stocks, batholiths                                           | Stocks, batholiths                                                |
| Tectonic setting                                          | Continental margins and island arcs, synto late orogenic | Oceanic island arcs, rifted continental margins | Continental margin arcs, synorogenic                     | Continental margin arcs, synto late orogenic             | Continental margin arcs, late orogenic                                         | Continental margin arcs, late orogenic                        | Continental margin arcs, late to post orogenic or anorogenic | Continental margin arcs, late to post-orogenic                    |

## 3.2. Analisis Statistik

### 3.2.1. Statistik Deskriptif

Statistik digunakan untuk menggambarkan suatu distribusi matematik untuk mengetahui nilai rata – rata (*mean*) dan perbedaan masing – masing nilai terhadap *mean* (Bargawa W. S, 2018). Adapun beberapa parameter yang sering digunakan dalam menggambarkan penyebaran data yaitu :

1. *Mean*, merupakan nilai rata – rata suatu distribusi dinotasikan  $\bar{x}$  dengan persamaan :

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots 3.1$$

Keterangan :

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  
 $x_i$  = data ke-i, dengan  $i = 1,2,3,\dots,n$ .  
 $n$  = banyaknya data

2. Variansi ( $S^2$ ) digunakan untuk menjelaskan homogenitas kelompok. Variansi merupakan jumlah kuadrat semua deviasi nilai-nilai individual terhadap rata-rata kelompok (Sugiyono, 2007). Variansi sangat penting untuk mengetahui seberapa besar kesalahan dalam taksiran yang dibuat, dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \dots\dots\dots 3.2$$

Keterangan :

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  
 $x_i$  = data ke-i, dengan  $i = 1,2,3,\dots,n$ .  
 $n$  = banyaknya data

3. Simpangan baku ( $S$ ) merupakan parameter *disperse* yang sering digunakan sebagai pengganti varian atau akar dari variansi, karena satuannya sama dengan variabel (Bargawa, 2018).

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \dots\dots\dots 3.3$$

Keterangan :

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  
 $x_i$  = data ke-i, dengan  $i = 1,2,3,\dots,n$ .  
 $n$  = banyaknya data

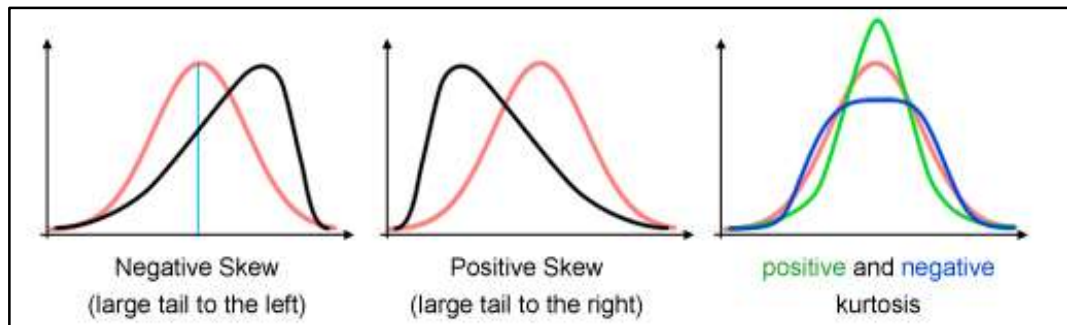
4. Ukuran kemencengan kurva (*skewness*) merupakan ukuran untuk

mengetahui kemencengan distribusi suatu data. Jika distribusi simetris sekitar rata – ratanya  $\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^3 = 0$ , sehingga  $\sigma_3 = 0$ . Sebaliknya jika distribusi menceng sekitar rata – ratanya, maka  $\sigma_3$  akan menghasilkan nilai positif atau negatif sesuai dengan arah kemencengan distribusi (Nuryadi, 2017).

$$\text{Skewness} = \frac{\mu_3}{\sigma^3} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^3 f(x) dx}{\sigma^3} \dots\dots\dots 3.4$$

Keterangan :

- $\mu$  = rata – rata/mean distribusi
- $f(x)$  = adalah fungsi kepadatan probabilitas dari distribusi x
- $\sigma$  = standar deviasi



Gambar 3.1 Kemencengan kurva (*skewness*) dan *kurtosis* (Marwanza I., 2023)

5. *Kurtosis* adalah suatu ukuran tingkat keruncingan dari distribusi suatu data (Marwanza, 2023). Jika *kurtosis* sama dengan 3 (tiga) berarti keruncingan distribusi data sama dengan normal, jika *kurtosis* lebih kecil dari 3 (tiga) maka distribusi data lebih runcing dari distribusi normal, dan jika *kurtosis* lebih dari 3 (tiga) maka data lebih lebar dari normal.

$$\text{Kurtosis} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{\sigma^2} \dots\dots\dots 3.5$$

Keterangan :

- $\bar{x}$  = rata – rata/mean
- $x_i$  = data ke-i, dengan i = 1,2,3,...n.
- $\sigma^2$  = variansi

6. Koefisien variansi atau *coefficient of variation* (CV) digunakan sebagai alternatif untuk mengGambarkan bentuk distribusi. Nilai CV dengan angka lebih dari 1 menunjukkan maka sifat data semakin heterogen dan sebaliknya adalah homogen, sehingga dapat mempengaruhi hasil penaksiran akhir.

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}} \dots\dots\dots 3.6$$

Keterangan :

$\bar{x}$  = rata – rata/mean

$\sigma$  = standar deviasi

### 3.2.2. Statistik Bivariat

Statistik bivariat digunakan untuk menganalisis distribusi dua buah kumpulan peubah yang berbeda tetapi terletak pada lokasi yang sama. Data bivariat secara umum digambarkan melalui diagram pencar (*scatterplot*). Dalam statistik bivariat hubungan antara dua peubah dinyatakan dalam koefisien korelasi (*r*) yang didefinisikan :

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \dots\dots\dots 3.7$$

Keterangan :

$n$  = banyaknya data

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  $x$

$x_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $x$

$\bar{y}$  = rata – rata/mean  $y$

$y_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $y$

$\sigma_x$  = standar deviasi  $x$

$\sigma_y$  = standar deviasi  $y$

Hasil diagram pencar dapat pula ditunjukkan melalui kovariansi dengan rumus :

$$C_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \dots\dots\dots 3.8$$

Keterangan :

$n$  = banyaknya data

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  $x$

$x_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $x$

$\bar{y}$  = rata – rata/mean  $y$

$y_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $y$

Kovariansi sulit ditafsirkan karena kedua variabel mungkin mempunyai satuan

yang berbeda dan nilai kovariansi tidak terbatas. Salah satu perangkat statistic untuk memperkirakan hubungan antara dua peubah yaitu regresi linier, yang dinyatakan dalam persamaan :

$$Y = aX + b \dots\dots\dots 3.9$$

Keterangan :

$y$  : nilai prediksi / variabel terikat

$x$  : nilai sebenarnya / variabel bebas

$a$  : nilai parameter *intercept* (garis potong kurva terhadap sumbu  $y$ )

$b$  : nilai koefisien regresi yang menunjukkan besarnya pengaruh  $x$  terhadap  $y$  secara grafik menunjukan *slope* (kemiringan garis regresi)

Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), nilai  $a$  dan  $b$  dapat diperoleh dari persamaan di bawah ini :

$$b = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum(x_i - \bar{x})^2} \dots\dots\dots 3.10$$

$$a = \frac{\sum y_i - b \sum x_i}{n} \dots\dots\dots 3.11$$

Keterangan :

$n$  = banyaknya data

$\bar{x}$  = rata – rata/mean  $x$

$x_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $x$

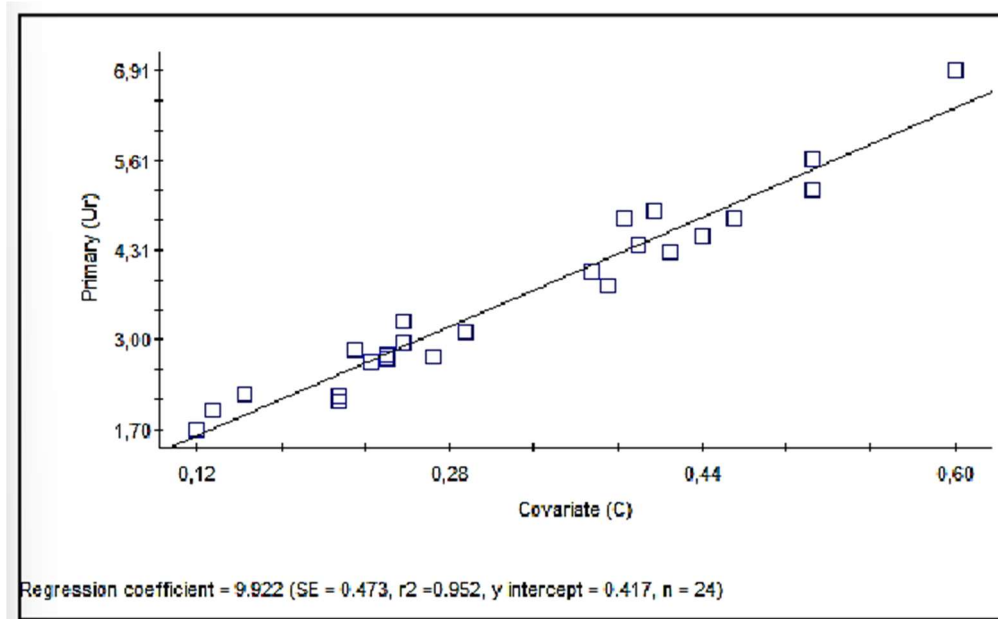
$\bar{y}$  = rata – rata/mean  $y$

$y_i$  = data ke- $i$ , dengan  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . variabel  $y$

Dalam statistika bivariat, hubungan antara dua perubah dinyatakan dengan koefisien korelasi ( $r$ ). Koefisien korelasi diketahui untuk mengetahui kuat lemahnya hubungan antara dua perubah yang terdiri variabel independent atau bebas ( $x$ ) dengan variabel dependen atau terikat ( $y$ ). Nilai koefisien korelasi ( $r$ ) berkisar  $-1 \leq r \leq +1$ , apabila nilai koefisien korelasi mendekati  $+1$  atau  $-1$ , berarti hubungan antarvariabel tersebut semakin kuat dan sebaliknya jika mendekati nilai 0 (nol) maka tidak ada korelasi antar variabel. Koefisien korelasi ( $r$ ) merupakan akar determenasi yang mendekati satu menunjukkan ukuran ketepatan dari hasil

estimasi (variabel dependen atau sumbu y) terhadap data sebenarnya (variabel independen atau sumbu x) pada garis regresi. Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), persamaan dari koefisien determinasi ( $r^2$ ) sebagai berikut :

$$r^2 = \frac{a(\sum y_i + b(\sum x_i - y_i) - n(\bar{y})^2)}{\sum (y_i)^2 - n(\bar{y})^2} \dots\dots\dots 3.12$$



Gambar 3.2 Contoh *scatter plot* variabel x dan y (Sumber : Nugraha, 2020)

Sedangkan persamaan koefisien korelasi ( $r$ ) menurut Isaaks dan Srivastava (1989), sebagai berikut :

$$r = \frac{\sum (x_i \bar{x})(y_i \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i \bar{x})^2 \sum (y_i \bar{y})^2}} \dots\dots\dots 3.13$$

Keterangan :

- $n$  : jumlah data
- $x_i$  : nilai data x ke-i
- $y_i$  : nilai data y ke-i
- $\bar{x}$  : nilai rata-rata x
- $\bar{y}$  : nilai rata-rata y

Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), ketika penaksiran telah dilakukan maka nilai hasil estimasi tersebut dapat dibandingkan dengan nilai data sebenarnya di lokasi titik sampel yang telah dikeluarkan dari *set* data sampel. Selisih antara nilai

data dengan nilai hasil interpolasi merupakan nilai kesalahan (*error*) di titik tersebut. Nilai *root mean squared error* (RMSE) digunakan untuk menunjukkan nilai kesalahan (*error*) yang dapat didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}} \dots\dots\dots 3.14$$

Keterangan:

- $\hat{y}_i$  : nilai prediksi untuk pengamatan ke-i
- $y_i$  : nilai aktual untuk pengamatan ke-i
- $n$  : jumlah pengamatan

### 3.2.3. Statistik Spasial

Statistik spasial (geostatistik) merupakan salah satu ilmu yang menggunakan analisis spasial. Analisis spasial merupakan analisis yang memiliki atribut lokasi absolut (koordinat). Geostatistik menganut teori regional variables yang menyatakan bahwa data yang diambil dalam satu zona saling berhubungan. Teknik perhitungan yang digunakan dalam metode ini tidak semata – mata berdasarkan jarak tetapi juga memperhitungkan korelasi ruang (spatial) antara contoh yang merupakan fungsi dari jarak juga (Marwanza, 2023). Geostatistik memungkinkan untuk mengkuantifikasikan korelasi antar tiap dua nilai yang dipisahkan oleh jarak  $h$  dan menggunakan informasi ini untuk membuat prediksi pada zona yang tidak diukur (Bargawa, 2018). Korelasi ruang antara contoh ini dikualifikasikan oleh variogram.

Variogram merupakan perangkat dasar dari geostatistik yang digunakan untuk mengkuantifikasi korelasi ruang antar sampel (Bargawa, 2002). Variogram eksperimental merupakan variogram yang diperoleh dari data hasil pengukuran, sedangkan variogram model merupakan model matematis secara teoritis (Bargawa, 2018). Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), variogram merupakan suatu vektor yang dapat mengkuantifikasikan tingkat kemiripan antara dua sampel yang terpisah oleh jarak ( $h$ ). Variogram eksperimental didefinisikan sebagai setengah rata-rata penjumlahan selisih kuadrat pasangan data yang dinyatakan dengan persamaan berikut (Isaaks dan Srivastava, 1989) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \dots\dots\dots 3.15$$

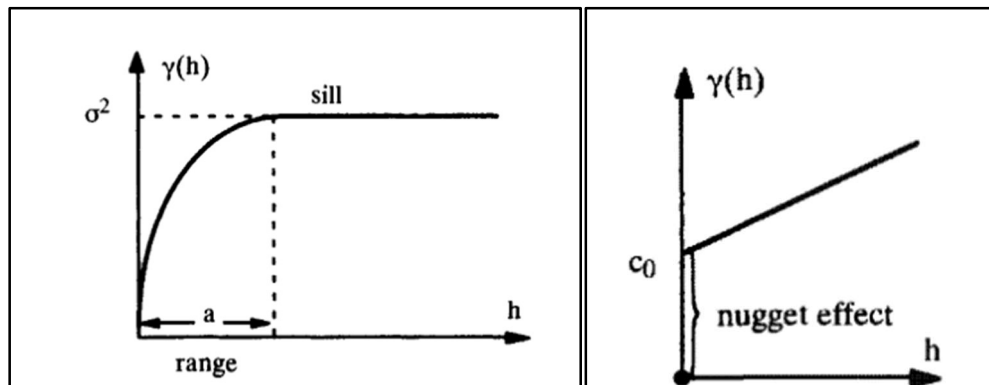
Keterangan :

- $\gamma(h)$  : fungsi variogram
- $n(h)$  : jumlah pasangan data
- $Z(x_i)$  : nilai kadar pada lokasi  $x_i$
- $Z(x_{i+h})$  : nilai kadar pada lokasi  $(x_{i+h})$
- $h$  : vektor yang menyatakan jarak antar dua titik

Parameter kecocokan (*fitting*) merupakan hubungan antara variogram eksperimental dengan model variogram. Langkah yang dilakukan selanjutnya untuk mendapatkan hubungan antara kedua variogram tersebut adalah dengan melakukan pencocokan (*fitting*) yang disebut juga dengan analisis struktural. Menurut Isaaks dan Srivastava (1989) analisis struktural ini dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter *nugget effect* ( $C_0$ ), *sill* dan *range* ( $a$ ) yang selanjutnya digunakan untuk parameter dalam penaksiran metode geostatistik, penjelasannya adalah sebagai berikut :

1. *Nugget effect* ( $C_0$ ) adalah kondisi nilai variogram pada jarak nol (origin). *Nugget effect* digunakan untuk mengkarakterisasi pengaruh residual dari semua variabilitas yang memiliki rentang ( $a_0$ ) jauh lebih kecil daripada jarak pengamatan yang tersedia ( $h > a_0$ ) (Journel, 1989). Beberapa faktor seperti kesalahan dalam pengambilan sampel dan variabilitas skala kecil dapat menyebabkan nilai sampel yang terpisah dengan jarak yang sangat kecil menjadi cukup berbeda. Hal ini menyebabkan diskontinuitas pada asal variogram. Lompatan vertikal dari nilai 0 di asal ke nilai variogram pada jarak pemisah yang sangat kecil disebut efek nugget (Isaaks dan Srivastava, 1989).
2. *Sill* adalah nilai varian ketika mencapai kondisi stabil variogram yang mencapai *range*-nya. Ini menunjukkan bahwa tidak ada lagi peningkatan variabilitas dengan peningkatan jarak (Journel, 1989).
3. *Range* merupakan jarak dimana variogram mencapai puncak atau mencapai

masa stabil atau sill. Ini menggambarkan jarak maksimum dimana data menunjukkan autokorelasi atau saling berkaitan. Di luar range data dianggap tidak berkorelasi (Journel, 1989).



Gambar 3.3 Variogram dan parameter *nugget effect*, *range*, dan *sill* (Sumber : Armstrong, 1998)

Adapun tiga model variogram teoritis yang secara luas digunakan dalam analisis struktural menurut Armstrong (1998) yaitu :

1. Model variogram *spherical* didefinisikan dengan persamaan berikut :

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

$$C + C_0, \text{ untuk } h \geq a \dots\dots\dots 3.16$$

2. Model variogram *exponential* didefinisikan dengan persamaan berikut :

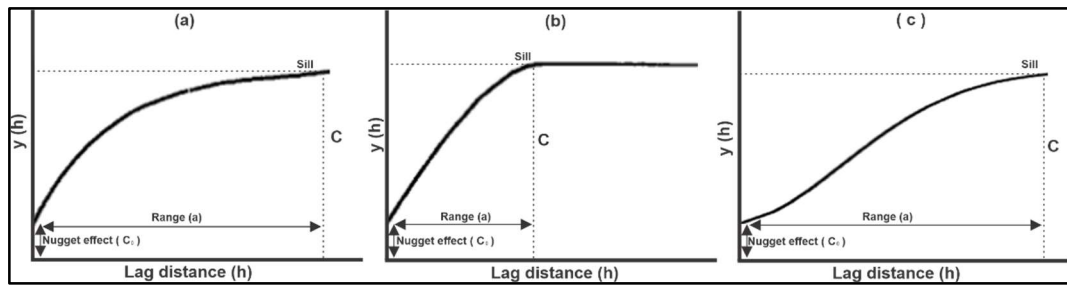
$$y(h) = C \left[ 1 - \exp \left( - \frac{3h}{a} \right) \right] + C_0 \dots\dots\dots 3.17$$

3. Model variogram *gaussian* didefinisikan dengan persamaan berikut:

$$y(h) = C \left[ 1 - \exp \left( - \frac{3h}{a} \right)^2 \right] + C_0 \dots\dots\dots 3.18$$

Keterangan :

- $C_0$  : nugget effect
- $C_0 + C$  : sill
- $a$  : range variogram
- $h$  : jarak lokasi antar sampel



Gambar 3.4 Model variogram (a) *spherical*, (b) *exponential*, dan (c) *gaussian*

(Sumber : Armstrong, 1998)

Keterangan :

$C_0$  : *nugget effect*

$C$  : *partial sill*

$C_0 + C$  : *sill*

$h$  : jarak lokasi antar sampel

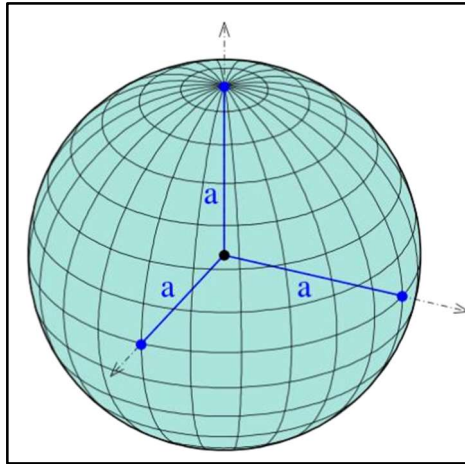
*Sill* dan *range* dari variogram dapat bervariasi dalam berbagai arah, mencerminkan adanya anisotropi jika sama ke berbagai arah maka disebut isotropi. Situasi yang sangat umum terjadi Ketika variabel terregionalisasi lebih kontinu di sepanjang satu arah tertentu dibandingkan arah lainnya. Ini bisa terjadi pada kadar logam dari mineralisasi stratiform yang biasanya lebih kontinu dalam arah horizontal daripada vertikal (Abzalov, 2016). Ada dua bentuk anisotropik secara umum yaitu :

1. Anisotropis Geometris

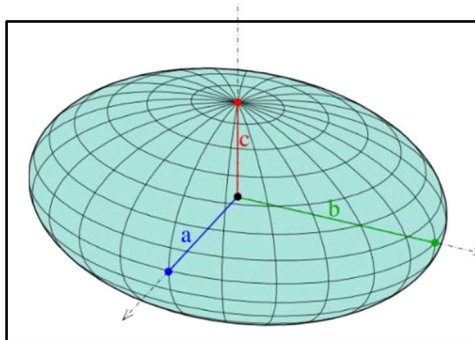
Bila pada beberapa  $\gamma(h)$  dengan arah yang berbeda memiliki nilai *sill* dan *nugget effect varian* yang sama, tetapi mempunyai *range (a)* yang berbeda (Armstrong, 1998).

2. Anisotropi Zonal

Bila pada beberapa  $\gamma(h)$  menunjukkan bentuk yang berbeda dalam berbagai arah. Ini berarti bahwa variogram dalam satu arah mungkin menunjukkan variasi yang sangat cepat, sementara dalam arah lain menunjukkan variasi yang lebih lambat atau pola yang berbeda sama sekali (Armstrong, 1998).



Gambar 3.5 *Ellipsoid 3D* pada kondisi isotropi (Sumber : Olea, 2009)



Gambar 3.6 *Ellipsoid 3D* pada kondisi anisotropi (Sumber : Olea, 2009)

### 3.2.4. Prinsip Penaksiran

Dalam pemilihan metode estimasi dapat ditentukan dengan beberapa aspek. Berdasarkan buku *SME Mining Engineering Handbook*, berikut merupakan dasar pemilihan metode estimasi berdasarkan geometri endapan dan nilai *coefficient of variance*.

Tabel 3.2 Tabel dasar pemilihan metode estimasi (*SME Mining Engineering Handbook*)

|                    | CV rendah<br>( $<0,25$ ) | CV sedang ( $0,25 - 0,75$ )        | CV tinggi ( $>0,75$ )                        |
|--------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------|
| Geometri Sederhana |                          |                                    |                                              |
| Deskripsi Endapan  | Kadar dan ketebalan yang | Tabular, ukuran bijih besar, kadar | Tabular, bijih kecil, <i>highly variable</i> |

|                   |                                                                                                                                                    |                                                                                                               |                                                                                                                                                                                      |
|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | menerus. Dip stabil atau konstan (Gamping, Batubara, <i>sedimentary iron</i> )                                                                     | tersebar sedang ( <i>Stratiform copper, mississippi valley lead, simple porphyry copper, molybdenum</i> )     | <i>grade</i> (Emas <i>veins</i> , emas <i>placers</i> , New Mexico Uranium, intan alluvial)                                                                                          |
| Metode Estimasi   | Menggunakan metode 2D : Poligon dan <i>isoline</i>                                                                                                 | <i>Inverse distance weighting</i> , poligon atau <i>cross section</i> dengan mempertimbangkan 5% - 10% dilusi | <i>Inverse distance weighting</i> , poligon dengan mempertimbangkan 15% - 35% dilusi                                                                                                 |
| Geometri Sedang   |                                                                                                                                                    |                                                                                                               |                                                                                                                                                                                      |
| Deskripsi Endapan | Sederhana, kadar seragam tapi ketebalan lapisan yang tidak menentu. lipatan dan patahan yang sederhana (bauksit. nikel laterit, <i>salt dome</i> ) | Geometri sederhana 3D. Kelas variable sedang ( <i>Porphyry copper, porphyry molybdenum</i> , nikel laterit)   | Geometri sederhana 2D dan 3D dengan ore yang lebih sedikit dan tidak menentu, lipatan dan patahan yang sederhana ( <i>stockwork and carlin type gold, volancogenic base metals</i> ) |
| Metode Estimasi   | Menggunakan 2D akan tetapi harus mendefinisikan struktur geologi                                                                                   | <i>Inverse distance weighting</i> atau <i>ordinary kriging</i> dengan pengontrol yang                         | <i>Inverse distance weighting</i> atau <i>ordinary kriging</i>                                                                                                                       |

|                   |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                   | (patahan dan lipatan)<br>variabilitas ketebalan yang mungkin sulit di prediksi                       | mendefinisikan bentuk dan arah sebaran kadar.<br>Metode polygonal dan <i>cross section</i> dapat digunakan namun memerlukan koreksi volume dan dilusi                                                                                             |                                                                                                                    |
| Geometri Rumit    |                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                    |
| Deskripsi Endapan | Endapan memiliki lipatan dan patahan yang sangat tidak beraturan ( <i>Talc, gypsum</i> terdeformasi) | Endapan yang memiliki lipatan dan patahan yang sangat tidak beraturan serta dikontrol dengan mineralisasi ( <i>tungsten skarns folding/faulting, base metal skarns erratic shape, copper porphyry combined with local skarns or replacement</i> ) | Endapan dengan varians tinggi, memiliki bentuk ore yang rumit ( <i>Archean gold deposits, roll-front uranium</i> ) |
| Metode Estimasi   | <i>Cross section</i> dengan mendeskripsikan secara detail struktur geologi                           | <i>Cross section</i> dengan inputan rinci untuk menggambarkan struktur geologi                                                                                                                                                                    | Estimasi sangat sulit. Ukuran bentuk dan kadar tidak bisa diprediksi. Metode                                       |

|  |  |                                            |                                                                                                                                                         |
|--|--|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | dan zona bijih.<br>Metode<br>geostatistika | <i>cross section, area<br/>outline, indicator<br/>kriging</i> berlaku.<br>Kesalahan 50% -<br>100% tidak biasa.<br>Tonase sering<br><i>overestimated</i> |
|--|--|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Prinsip penaksiran kadar dan ketebalan suatu cebakan bijih adalah melakukan interpolasi kadar dan ketebalan sampel dalam cebakan tersebut (Bargawa, 1999). Penaksiran kadar dilakukan terhadap titik yang belum diketahui nilai kadarnya. Dalam penelitian ini digunakan penaksiran atau pembobotan dengan teknik *Ordinary kriging* (OK).

Teknik OK adalah salah satu metode yang terdapat pada teknik *kriging* yang sering digunakan pada geostatistika. Pada teknik ini, memiliki asumsi khas untuk penerapan yang mudah digunakan dari OK adalah dasar stasioneritas (*intrinsic stationarity*) dari bidang dan pengamatan yang cukup untuk mengestimasi variogram. Pada penaksiran OK, hal-hal yang perlu diperhatikan adalah (Bargawa, 2018) :

$$Z^* = \sum_{i=1}^n W_i \cdot Z(x_i) \dots\dots\dots 3.19$$

Keterangan

$Z^*$  : Kadar yang ditaksir

$W_i$  : bobot sampel, dimana  $\sum_{i=1}^n W = 1$

$Z(x_i)$  : kadar sampel

Menurut Bargawa (2018), secara umum prosedur teknik OK adalah sebagai berikut :

1. Hitung kovariansi sampel atau blok.
2. Untuk setiap titik atau blok lakukan langkah-langkah berikut :
  - a. Cari sampel-sampel atau lubang bor terdekat.

- b. Hitung kovariansi antar sampel.
- c. Hitung kovariansi sampel dan blok.
3. Pecahkan persamaan linier untuk mencari bobot.
4. Hitung taksiran kadar menggunakan teknik OK untuk titik atau blok.
5. Hitung variansi *kriging*.

Menurut Bargawa (2018), prosedur penaksiran untuk mencari nilai taksiran *kriging* teknik OK adalah mencari kovariansi antar sampel dengan sampel,  $C(i,j)$  serta kovariansi antara sampel dengan blok  $C(i,0)$  berdasarkan hubungan  $C(h) = C(0) - \gamma'(h)$  sehingga diperoleh persamaan kovariansi. Permasalahan penaksiran *kriging* adalah mencari nilai  $w_i$  dan  $\mu$ . Apabila ditulis dalam matriks diperoleh persamaan

$[A] \cdot [X] = [B]$ , sehingga  $[X] = [A]^{-1} \cdot [B]$ , dengan:

$$[A] = \begin{bmatrix} C_{1,1} & C_{1,2} & C_{1,3} & 1 \\ C_{2,1} & C_{2,2} & C_{2,3} & 1 \\ C_{3,1} & C_{3,2} & C_{3,3} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} [X] = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ \mu \end{bmatrix} [B] = \begin{bmatrix} C_{01} \\ C_{02} \\ C_{03} \\ 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots 3.20$$

Dari persamaan di atas dapat disederhanakan menjadi persamaan sebagai berikut :

$$\sum_i^n w_i \cdot C(i,j) + \mu = C(i,0) \dots\dots\dots 3.21$$

Keterangan :

- $[A]$  : Matriks kovariansi antar sampel atau data ( $C_{i,j}$ )  
 $[X]$  : Matriks bobot  
 $[B]$  : Matriks kovariansi antara titik yang ditaksir dari sampel ( $C_{i,0}$ )  
 $C(i,j)$  : kovariansi antara sampel dengan sampel  
 $\mu$  : pengali *Lagrange*  
 $C(i,0)$  : kovariansi antara sampel dengan blok  
 $C(0)$  : kovariansi nol, nilainya sama dengan harga *sill*

Menurut Bargawa (2018), variansi *kriging* merupakan fungsi konfigurasi titik sampel dan korelasi spasial. Hubungan antara variogram dan kadar sampel yang dipakai dalam penaksiran direpresentasikan pada model variogram. Variansi *kriging* yang dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma^2_{OK} = C_{(0)} - [\sum (w_i - C_{ij}) + \mu] \dots\dots\dots 3.22$$

Untuk menghitung taksiran kadar atau ketebalan di titik  $X_0$  dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Bargawa, 2018) :

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot Z(x_i), \text{ dimana } \sum_{i=1}^n w_i = 1 \dots\dots\dots 3.23$$

### 3.2.5. Analisis Akurasi Taksiran

Keakuratan suatu teknik estimasi yang diterapkan pada suatu model merupakan hal yang sangat penting dalam eskplorasi sumber daya mineral. Hal ini berpengaruh terhadap kualitas dan kuantitas suatu sumberdaya. Penentuan keakuratan hasil estimasi dapat melalui beberapa teknik analisis diantaranya validasi silang (*cross validation*), dan visualisaasi data.

#### 1. *Cross Validation*

Menurut Isaaks dan Srivastava (1989), menilai Tingkat keakuratan hasil penaksiran dilakukan dengan menggunakan *cross validation*. Teknik ini berfungsi untuk menganalisis distribusi dari dua variable tetapi terletak pada Lokasi yang sama untuk mengetahui hubungan antar variable. Proses *cross validation* dilakukan dengan cara mengambil salah satu data sampel secara bergantian dari kelompok data dalam proses penaksiran. Ketika estimasi dilakukan, maka nilai hasil estimasi dapat dibandingkan dengan nilai data nyata dari Lokasi sampel yang telah dikeluarkan dari kelompok data.

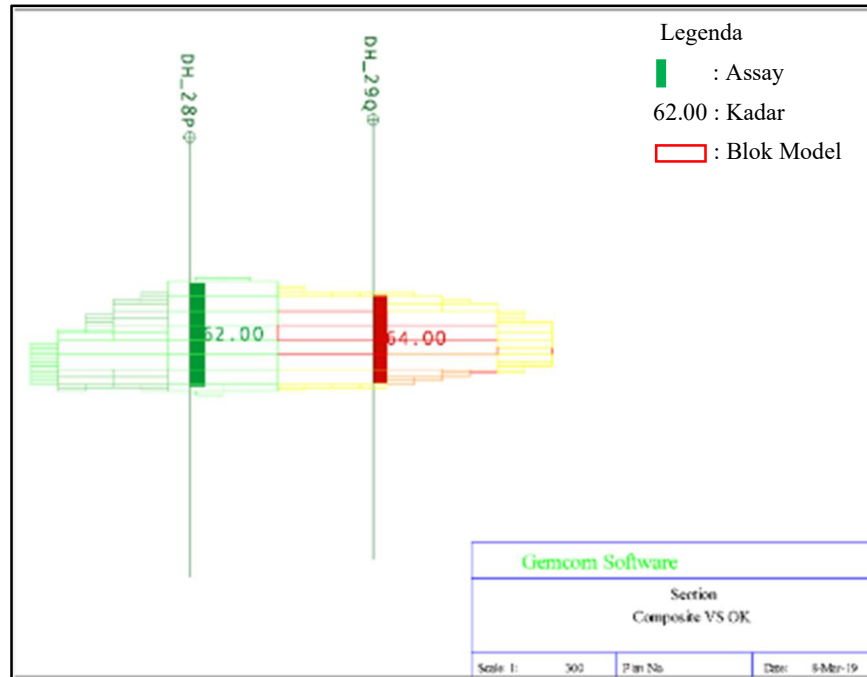
Pada penelitian ini, parameter *cross validation* dianggap memiliki presisi yang baik jika memenuhi ketentuan sebagai berikut :

- a. *Root mean squared error* (RMSE), nilai RMSE kecil (mendekati nol).
- b. Koefisien determinasi ( $r^2$ ) berkisar  $0 < r^2 < 1$ , mendekati angka satu yang menunjukkan ukuran ketepatan garis regresi dari hasil estimasi terhadap data sebenarnya.
- c. Koefisien korelasi ( $r$ ) merupakan parameter hubungan antara dua peubah (variable) dengan nilai berkisar  $-1 \leq r \leq +1$ .

#### 2. Visualisasi data dan model

Visualisasi dilakukan dengan cara *overlay* hasil estimasi kadar di dalam blok model dengan kadar dari data *assay* dalam bentuk penampang. Validasi ini akan

membandingkan pada koordinat yang sama dengan koordinat titik pengeboran (Bargawa, 2019).



Gambar 3.7 Contoh visualisasdi data dan model (Bargawa,2019)

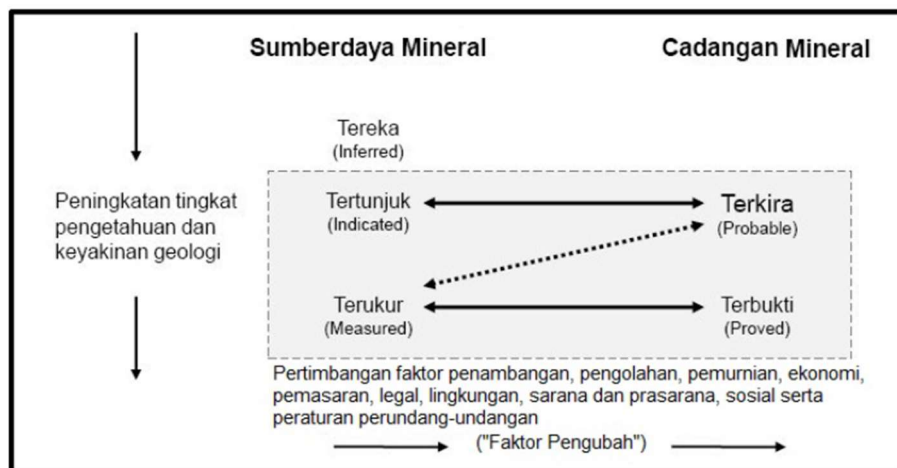
### 3.3 Klasifikasi Sumberdaya Mineral

Sistem klasifikasi sumberdaya dan cadangan yang digunakan di berbagai negara beragam antara Menurut KODE-KCMI (2017), klasifikasi sumberdaya mineral dilakukan berdasarkan hubungan antara hasil eksplorasi, sumberdaya mineral dilakukan berdasarkan hubungan antara hasil eksplorasi, sumberdaya mineral dan cadangan bijih seperti Gambar 3.7. Berdasarkan klasifikasi ini, sumberdaya mineral terbagi menjadi 3 kategori yaitu sumberdaya mineral tereka (*inferred*), tertunjuk (*indicated*), dan terukur (*measured*).

Klasifikasi Sumberdaya mineral tereka memiliki tingkat keyakinan lebih rendah. Bukti geologi dan pengambilan sampel yang terbatas dan kemenerusan kadar atau kualitas dan geologinya belum teruji (KODE-KCMI, 2017). Sumberdaya mineral tertunjuk merupakan bagian dari sumberdaya mineral dimana bagian dari sumberdaya mineral dimana kualitas, kadar atau kualitas, kerapatan, bentuk, dan karakteristik fisiknya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan yang cukup dan hanya dapat dikonversi ke cadangan mineral terkira (KODE-KCMI, 2017).

Sumberdaya mineral terukur memiliki tingkat keyakinan yang lebih tinggi dibandingkan terunjuk ataupun tereka. Sumberdaya mineral terukur dapat dikonversi ke cadangan mineral terbukti atau terkira. Mineralisasi dapat diklasifikasikan sebagai sumberdaya terukur ketika sifat alamiah, kualitas, jumlah dan distribusi datanya sedemikian rupa sehingga tidak menimbulkan keraguan, yang menurut opini competent person Indonesia yang menetapkan sumberdaya minereanya bahwa *tonase* dan kadar dari mineralisasinya dapat disetimasikan dengan tingkat ketelitian tinggi, dan bahwa variasi dari estimasi tersebut tidak akan secara signifikan mempengaruhi potensi kelayakan ekonominya (KODE-KCMI, 2017).

Klasifikasi sumberdaya mineral dan cadangan bijih dikelompokkan berdasarkan dua kriteria yang menjadi dasar klasifikasi yaitu keyakinan terhadap kondisi geologi dan peningkatan tingkat pengetahuan (kelayakan tambang). Sumberdaya mineral dengan tingkat keyakinan geologi yang paling tinggi masuk dalam klasifikasi sumberdaya terukur. Klasifikasi dengan tingkat keyakinan geologi paling rendah masuk ke dalam klasifikasi sumberdaya tereka.



Gambar 3.8 Hubungan umum antara target eksplorasi sumberdaya dan cadangan mineral (Sumber : Kode Cadangan Mineral Indonesia 2017)

### 3.3.1. Klasifikasi Sumberdaya Berdasarkan *Relative Kriging Standard Deviation* (RKSD)

Klasifikasi sumberdaya hanya dipengaruhi oleh tingkat keyakinan geologi yang diwakili oleh tingkat kesalahan dalam pembuatan model geologi dan estimasi

sumberdaya. Tingkat kesalahan ini diukur dengan kriging variance atau error variance yang berasal dari estimasi dengan menggunakan kriging. Error diasumsikan memiliki distribusi normal dan memiliki selang kepercayaan 95%. Deihl and David (1982) menulis tentang relative error, Sinclair & Blackwell (2005) juga mengungkapkan hal yang sama. Klasifikasi sumberdaya Pb-Zn dengan metode OK menggunakan nilai berdasarkan *Relative Kriging Standard Deviation* (RKSD) (Marwanza, I. 2023)

$$RKSD = 1.96 \times \frac{\sigma_e}{z^*} \dots\dots\dots 3.24$$

Keterangan :

$\sigma_e$  = *Kriging Standard Deviation*

$z^*$  = *Kriging Value*

Klasifikasi sumberdaya berdasarkan RKSD sebagai berikut :

1. Terukur (*measured*), suatu blok mempunyai nilai  $\leq 0,3$ .
2. Terunjuk (*indicated*), suatu blok mempunyai nilai  $\leq 0,3$  sampai  $< 0,5$ .
3. Tereka (*inferred*), suatu blok mempunyai nilai  $\geq 0,5$ .

### 3.3.2. Klasifikasi Sumberdaya Berdasarkan *Kriging Efficiency* (KE)

Metode klasifikasi sumberdaya dengan metode geostatistik lainnya juga ada yang mengklasifikasikan sumberdaya, seperti yang disampaikan oleh Snowden (2001), dengan menggunakan parameter kriging efisiensi, yang juga mengklasifikasikan sumberdaya menjadi tiga tipe yaitu tereka, tertunjuk, dan terukur. Rumus Kriging Efisiensi (KE) yaitu  $KE = (BV - KV)/BV$ , dimana BV adalah nilai dari block variance yang didapat dari variasi pada setiap blok yang di kriging, KV adalah *kriging variance* yang hasilnya didapat dari hasil kriging dalam menentukan nilai kriging tersebut, maka tipe – tipe sumberdaya tersebut dapat ditentukan. Klasifikasi sumberdaya Pb-Zn dengan metode OK menggunakan nilai berdasarkan *kriging efficiency* (Marwanza, I. 2023)

$$KE = \frac{BV - KV}{BV} \dots\dots\dots 3.25$$

$BV$  = *Block Varians*

$KV$  = *Kriging Varians*

Klasifikasi sumberdaya berdasarkan KE sebagai berikut :

1. Tereka (*inferred*), suatu blok mempunyai nilai  $\leq 0,3$ .
2. Terunjuk (*indicated*), suatu blok mempunyai nilai  $\leq 0,3$  sampai  $< 0,5$ .
3. Terukur (*measured*), suatu blok mempunyai nilai  $\geq 0,5$ .

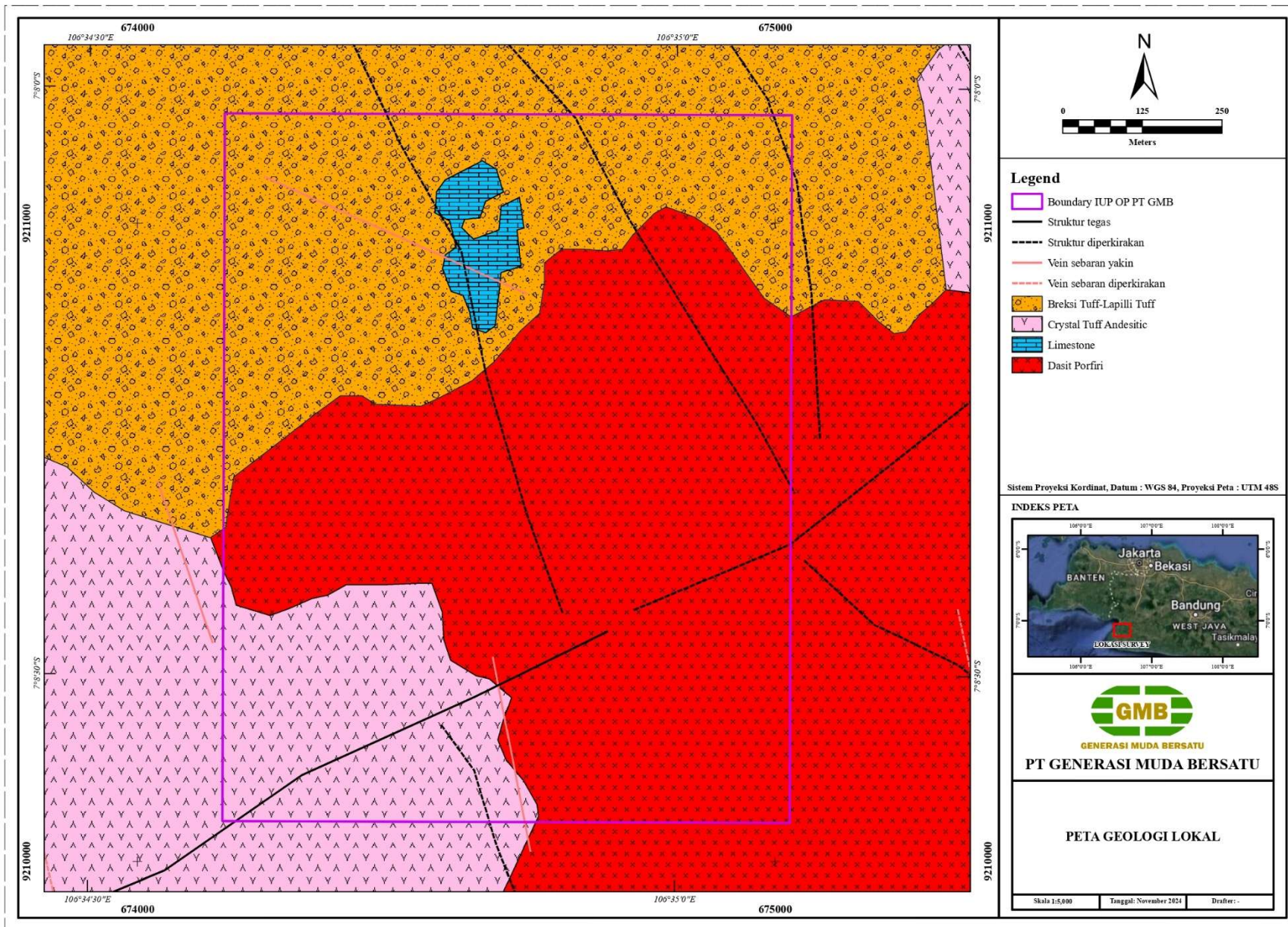
## BAB IV

### HASIL PENELITIAN

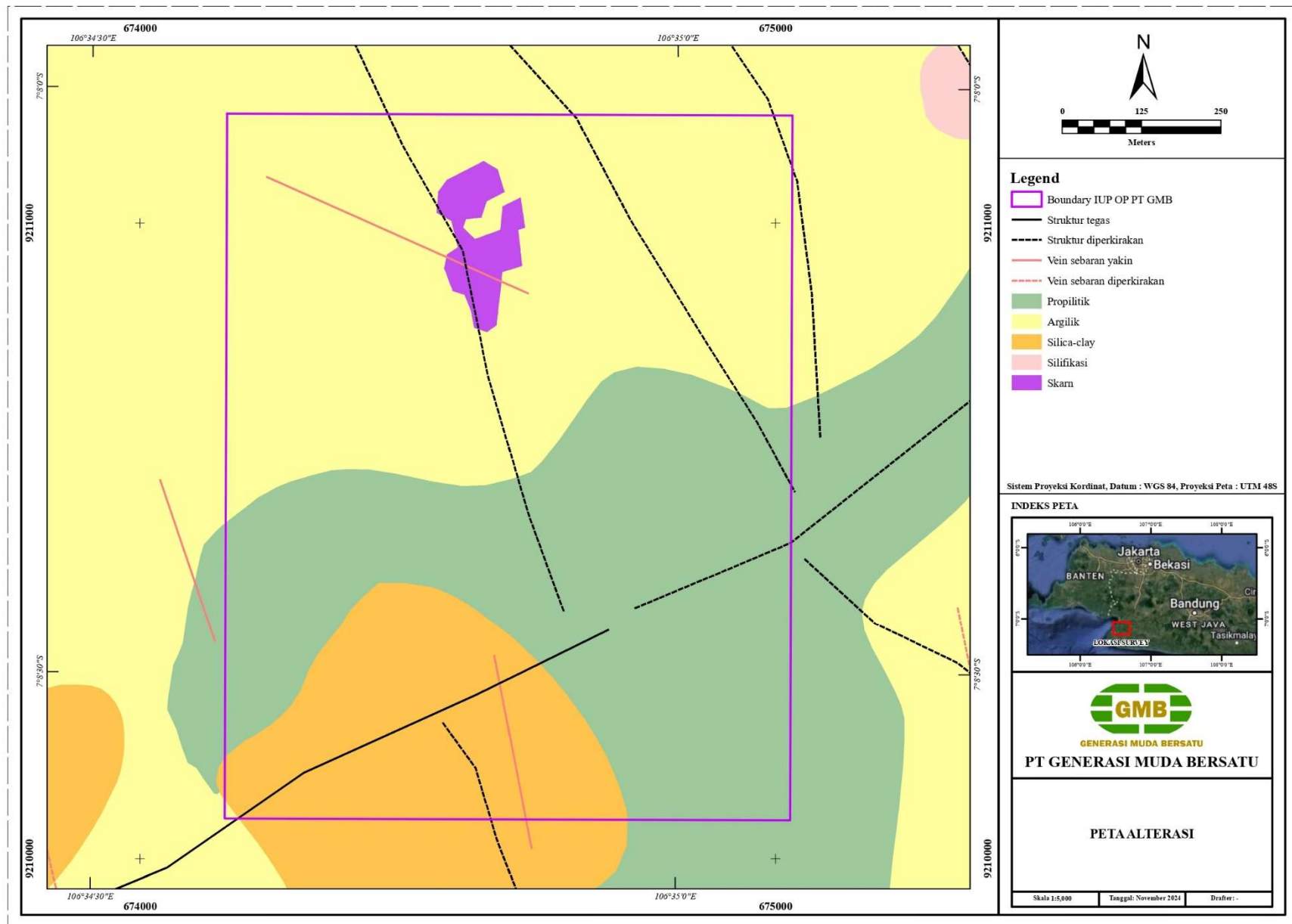
#### 4.1. Geologi Daerah Penelitian

Secara umum lokasi penelitian berada pada ketinggian 650 mdpl – 726 mdpl. Berdasarkan data pemetaan geologi permukaan terindikasi tersusun atas satuan litologi berupa satuan breksi tuff, satuan andesit dan satuan dasit yang tercermin dalam satuan geomorfologi berupa satuan perbukitan sisa gunung api berlereng agak curam. Satuan breksi tuff vulkanik menunjukkan kecenderungan warna kecoklatan pada peta permukaan dengan beberapa fragmen batuan terdiri dari andesit teralterasi tuff dan matriks abu. Satuan andesit banyak ditemukan di daerah perbukitan. Singkapan batuan yang ditemukan cenderung berwarna abu-abu kehijauan. Berdasarkan pengamatan satuan dasit ini berbentuk terapung yang terdapat di sekitar lereng Gunung Hanjungan. Satuan ini terdapat di sebelah timur sampai tenggara daerah penelitian. Berdasarkan peta geologi lokal PT. GMB (Gambar 4.1) terdapat empat jenis satuan batuan, yaitu *breksi tuff-lapili tuff*, *crystal tuff andesitic*, *limestone*, dan dasit porfiri. Terdapat juga struktur tegas dan beberapa struktur yang diperkirakan serta sebaran vein.

Kondisi zona alterasi di daerah penelitian terbagi menjadi empat zona (Gambar 4.2), yaitu zona alterasi silifikasi ( $\text{silika} \pm \text{kuarsa}$ ), zona alterasi argilik ( $\text{kaolinit} \pm \text{illit}$ ), zona alterasi propilitik ( $\text{klorit} \pm \text{kalsit} \pm \text{epidot}$ ), dan zona alterasi skarn. Tampaknya interpretatif sesar geser berarah Utara-Selatan hingga Utara Barat Laut – Selatan Tenggara adalah struktur pra- atau sinkronisasi yang dapat menjadi zona geser utama yang memicu pembentukan orde struktur berikutnya yang bertindak sebagai jalur fluida magmatik naik yang membentuk skarn prograde.



Gambar 4.1 Peta Geologi Lokal PT. Generasi Muda Bersatu (Sumber PT. GMB)



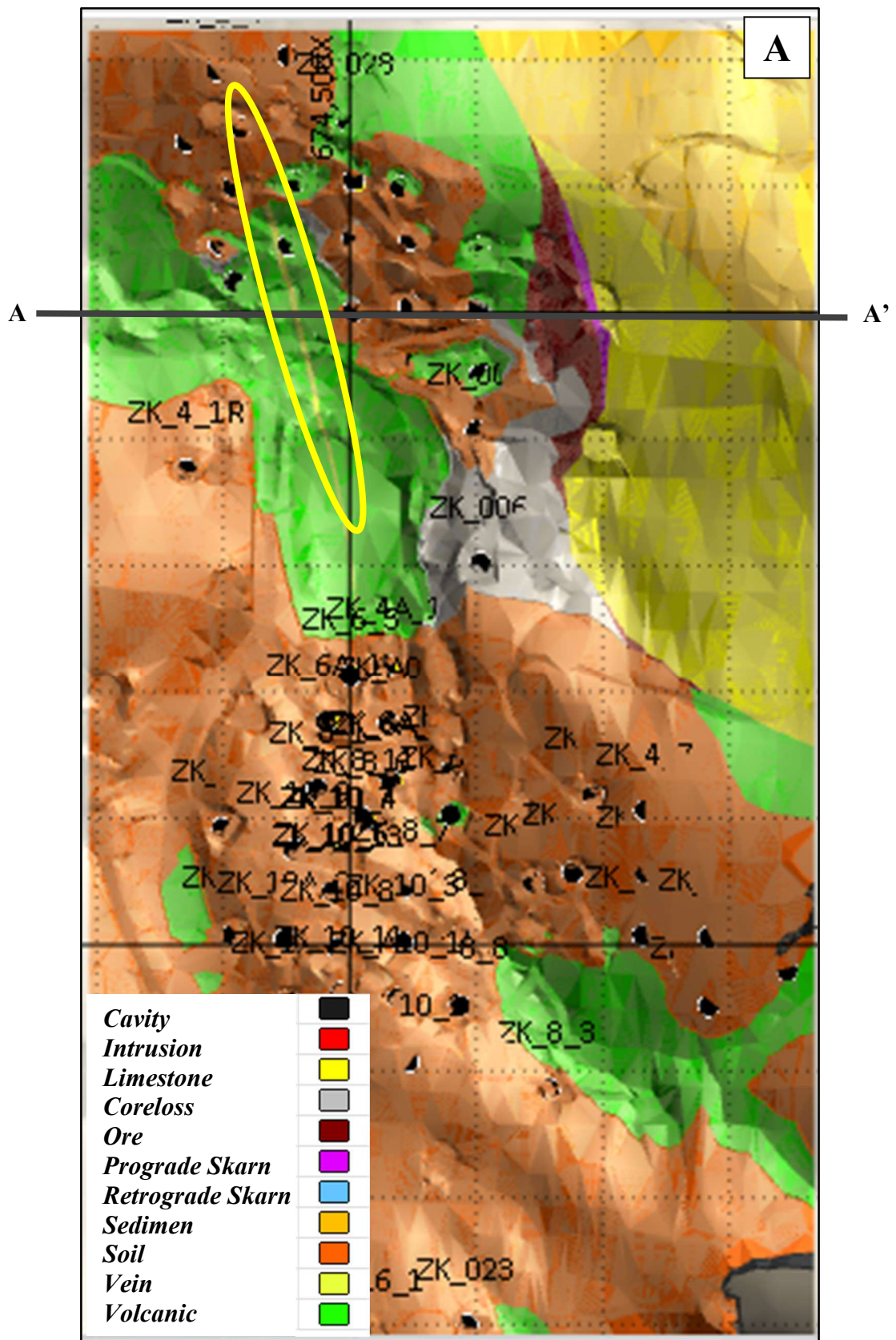
Gambar 4.2 Peta Alterasi PT. Generasi Muda Bersatu (Sumber PT. GMB)

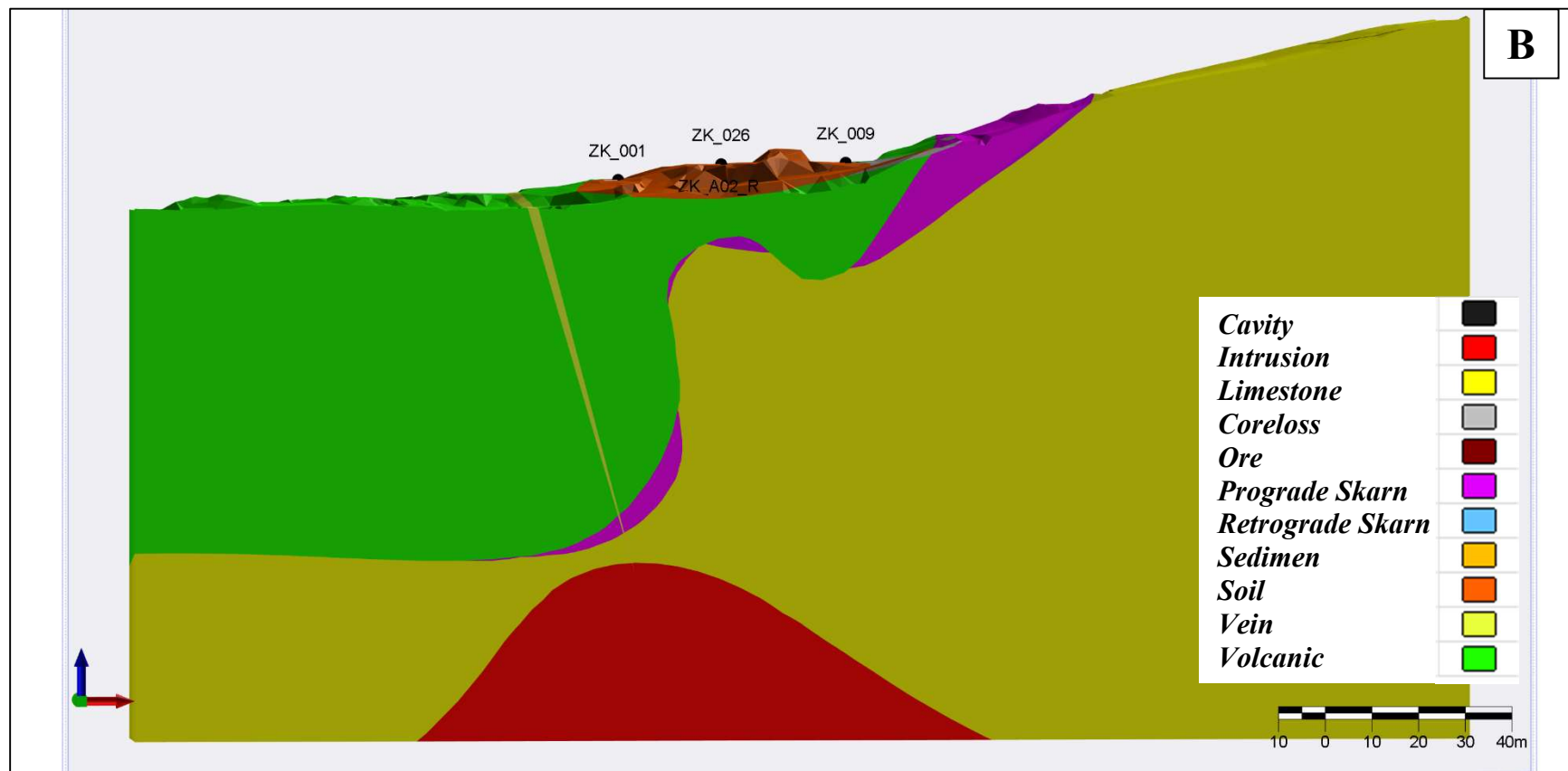
Pada data pengeboran menunjukkan adanya batugamping (limestone) yang telah mengalami proses metamorfisme menjadi marmer dan metalimestone akibat penerobosan batuan beku intrusi dasit. Lingkungan pengendapan awal batugamping berada pada laut dangkal, di mana pembentukannya merupakan hasil aktivitas sistem reefal limestone yang berkembang di atas dasar batuan vulkanik. Kehadiran intrusi dasit memicu proses metamorfisme termal dan metasomatisme yang mengubah karakteristik batugamping, sehingga membentuk marmer dan metalimestone dengan karakteristik litologi yang lebih kompleks. Sebaran intrusi dasit di wilayah penelitian menghasilkan zona alterasi skarn yang terbentuk melalui interaksi antara fluida magmatik dan batugamping. Pola distribusi mineralisasi cenderung mengikuti koridor struktur geologi, namun juga menunjukkan pola sebaran acak pada beberapa lokasi, yang mengindikasikan pengaruh struktur geologi serta dinamika proses hidrotermal yang kompleks selama pembentukan zona mineralisasi.

Pemodelan geologi di wilayah ini dilakukan berdasarkan data pengeboran (Gambar 4.3) yang dianalisis menggunakan *software micromine* dengan pendekatan implicit. Dalam pendekatan ini, batas antar litologi, zona alterasi, dan mineralisasi dihasilkan secara otomatis menggunakan algoritma interpolasi atau metode matematis yang memanfaatkan data titik, seperti kedalaman, elevasi, dan intensitas alterasi. Hasil pemodelan berupa representasi geologi bawah permukaan secara tiga dimensi.

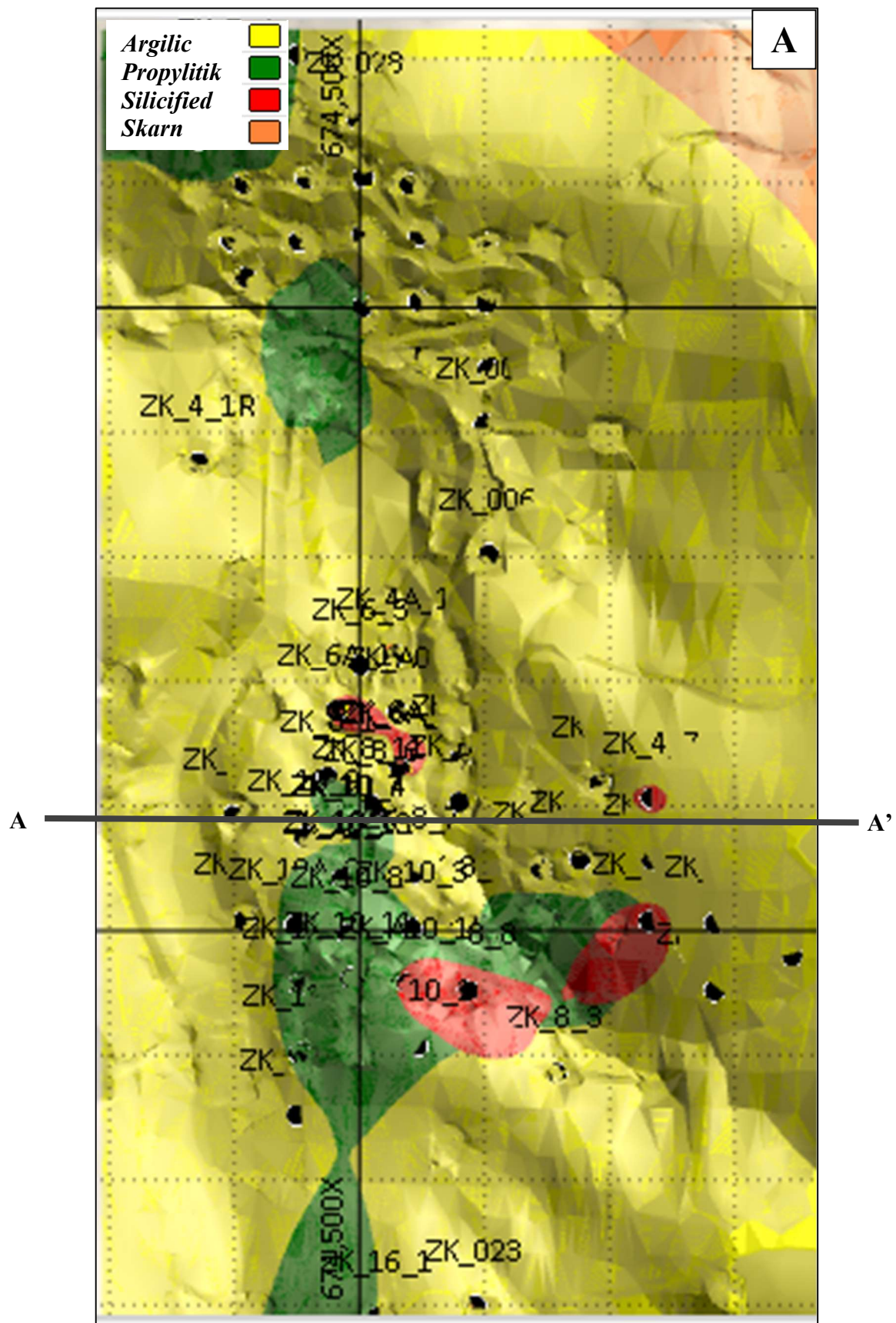
| hole_id | depth_from | depth_to | lithology | alterasi |
|---------|------------|----------|-----------|----------|
| ZK_010  | 1,75       | 5,4      | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 5,4        | 5,7      | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 5,7        | 5,8      | LOS       | none     |
| ZK_010  | 5,8        | 8,8      | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 8,8        | 12       | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 12         | 12,1     | LOS       | none     |
| ZK_010  | 12,1       | 12,6     | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 12,6       | 12,7     | LOS       | none     |
| ZK_010  | 12,7       | 13,4     | VOL       | ARG      |
| ZK_010  | 13,4       | 13,5     | LOS       | none     |
| ZK_010  | 13,5       | 14       | VOL       | ARG      |

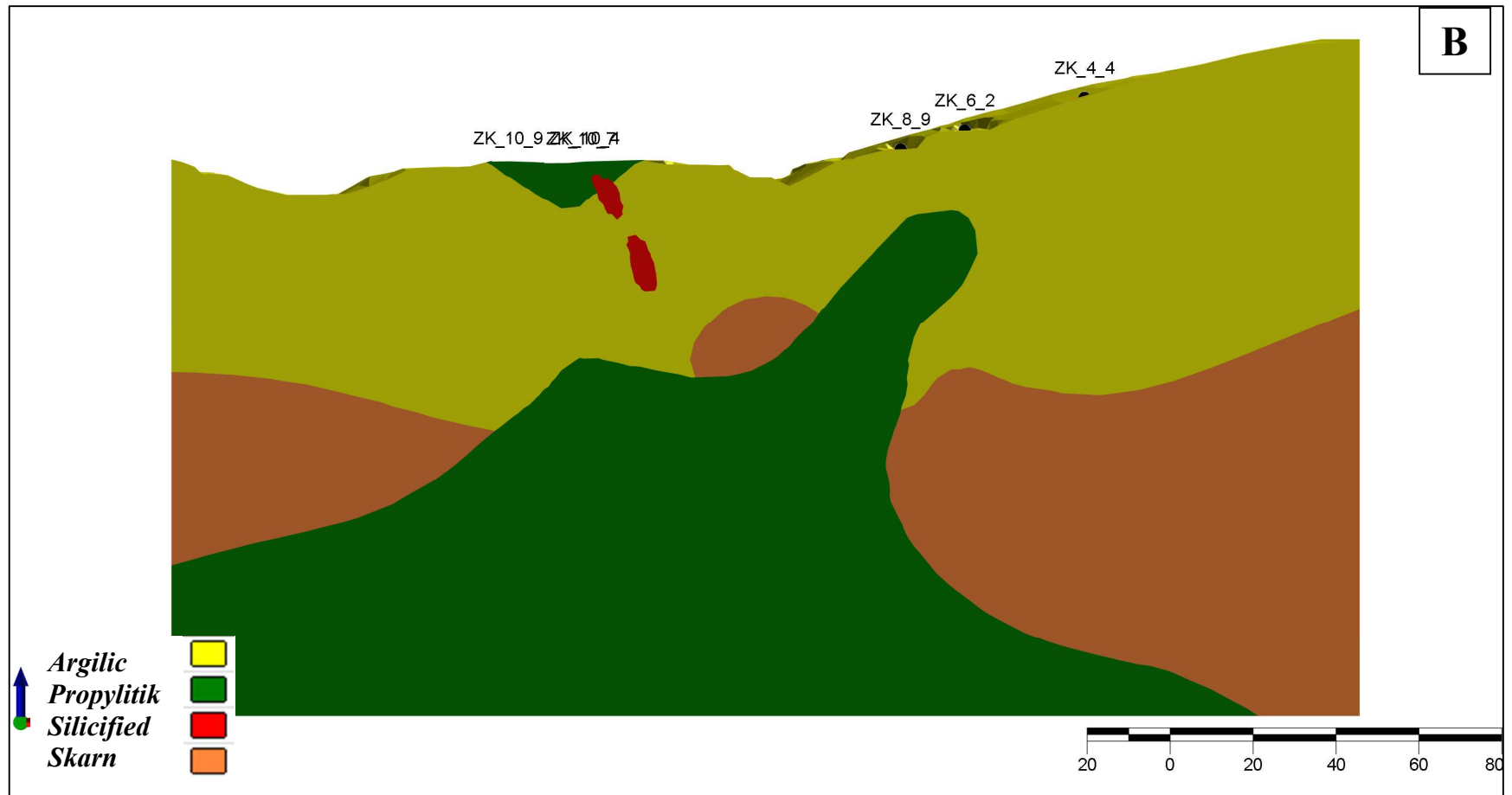
Gambar 4.3 Tabulasi data litologi





Gambar 4.4 (a) *Plan view* hasil *implicit* model geologi (b) *Section* litologi geologi berdasarkan titik bor





Gambar 4.5 (a) *Plan view* hasil *implicit* model alterasi (b) *Section* litologi alterasi berdasarkan titik bor

## 4.2. Estimasi Sumberdaya Pb-Zn

### 4.2.1. Basis Data Assay

Basis data *assay* merupakan informasi kadar sampel dari hasil kegiatan eksplorasi yang menyimpan data hasil uji laboratorium dari sampel yang diambil di lapangan. Data *assay* ini mencakup informasi mengenai nama titik bor, data koordinat (*easting*, *northing*, dan elevasi) dan kadar pada tiap-tiap interval 1 meter kedalaman pada setiap titik bor. Data *assay* yang digunakan pada penelitian ini yaitu data kadar Pb (timbang) dan Zn (seng). Basis data *assay* terdiri dari :

#### 1. Data Assay

Data *assay* berisikan kode titik bor, kode sampel, kedalaman (*from to*), koordinat, dan kadar tiap kedalaman tiap kode sampel pada satu titik bor.

| Hole_id | sample_id | X           | Y             | Z       | depth_from | depth_to | pb_pct | zn_pct |
|---------|-----------|-------------|---------------|---------|------------|----------|--------|--------|
| ZK_001  | ZK_001_29 | 674,501,649 | 9,211,000,661 | 653,925 | 37         | 37,8     | 3,171  | 4,597  |
| ZK_001  | ZK_001_30 | 674,501,649 | 9,211,000,661 | 653,125 | 37,8       | 38       | 9,437  | 5,505  |
| ZK_001  | ZK_001_34 | 674,501,649 | 9,211,000,661 | 602,175 | 88,75      | 89       | 0,782  | 2,698  |
| ZK_001  | ZK_001_35 | 674,501,649 | 9,211,000,661 | 601,225 | 89,7       | 90,5     | 3,53   | 0,217  |
| ZK_002  | ZK_002_2  | 674,550,207 | 9,210,953,155 | 685,255 | 7,5        | 7,75     | 3,681  | 4,926  |
| ZK_002  | ZK_002_5  | 674,550,207 | 9,210,953,155 | 682,755 | 10         | 11,5     | 6,3    | 11,4   |
| ZK_004  | ZK_004_2  | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 674,093 | 24,2       | 25,3     | 1,66   | 4,38   |
| ZK_004  | ZK_004_3  | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 672,993 | 25,3       | 26,3     | 1,14   | 5,64   |
| ZK_004  | ZK_004_4  | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 671,993 | 26,3       | 27       | 1,13   | 5,29   |
| ZK_004  | ZK_004_6  | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 669,793 | 28,5       | 29       | 1,13   | 3      |
| ZK_004  | ZK_004_10 | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 668,293 | 30         | 30,4     | 1,56   | 1,7    |
| ZK_004  | ZK_004_11 | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 667,893 | 30,4       | 31,4     | 7,44   | 8,37   |
| ZK_004  | ZK_004_12 | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 666,893 | 31,4       | 32,6     | 3,83   | 5,89   |
| ZK_004  | ZK_004_14 | 674,501,042 | 9,211,029,634 | 665,293 | 33         | 33,6     | 1,24   | 16,06  |

Gambar 4.6 Tabulasi data *assay*

#### 2. Data Collar

Data *collar* berisikan kode titik bor, koordinat (*easting*, *northing*, dan elevasi) titik bor beserta kedalaman bor.

| hole_id   | x             | y              | z          | max_depth |
|-----------|---------------|----------------|------------|-----------|
| ZK_0_3    | 674435437.000 | 9211068041.000 | 701,65     | 85        |
| ZK_001    | 674501649.000 | 9211000661.000 | 690925.000 | 90,5      |
| ZK_002    | 674550207.000 | 9210953155.000 | 692755.000 | 50        |
| ZK_004    | 674501042.000 | 9211029634.000 | 698293.000 | 46        |
| ZK_005    | 674501631.000 | 9211052611.000 | 706411.000 | 57,7      |
| ZK_005_RD | 674502111.000 | 9211051895.000 | 706,38     | 68        |
| ZK_006    | 674551739.000 | 9210900883.000 | 698024.000 | 30,55     |
| ZK_009    | 674550571.000 | 9211001995.000 | 694405.000 | 44        |
| ZK_010    | 674454467.000 | 9211012385.000 | 687027.000 | 79        |
| ZK_023    | 674546355.000 | 9210599,78     | 720377.000 | 129,55    |
| ZK_025    | 674478672.000 | 9211051992.000 | 702,8      | 77        |
| ZK_026    | 674523889.000 | 9211002777.000 | 694126.000 | 54        |

Gambar 4.7 Tabulasi data *collar*

### 3. Data Survei

Data survei berisikan kode titik bor, kedalaman bor, arah azimuth dan dip dari titik bor. Data survei bertujuan untuk menggambarkan kemiringan dari titik bor.

|    | Hole_id   | Depth | Azimuth | Dip |
|----|-----------|-------|---------|-----|
| 1  | ZK_0_3    | 0     | 0       | -90 |
| 2  | ZK_001    | 0     | 0       | -90 |
| 3  | ZK_002    | 0     | 0       | -90 |
| 4  | ZK_004    | 0     | 0       | -90 |
| 5  | ZK_005    | 0     | 0       | -90 |
| 6  | ZK_005_RD | 0     | 140     | -70 |
| 7  | ZK_006    | 0     | 0       | -90 |
| 8  | ZK_009    | 0     | 0       | -90 |
| 9  | ZK_010    | 0     | 0       | -90 |
| 10 | ZK_023    | 0     | 0       | -90 |

Gambar 4.8 Tabulasi data *survey*

Pada penelitian ini, memiliki jumlah titik bor sebanyak 66 pada luas daerah  $\pm 14$  Ha, minimal kedalaman pada 30 meter dan maksimum kedalaman pada 152 meter dengan interval jarak rata-rata 30 meter.



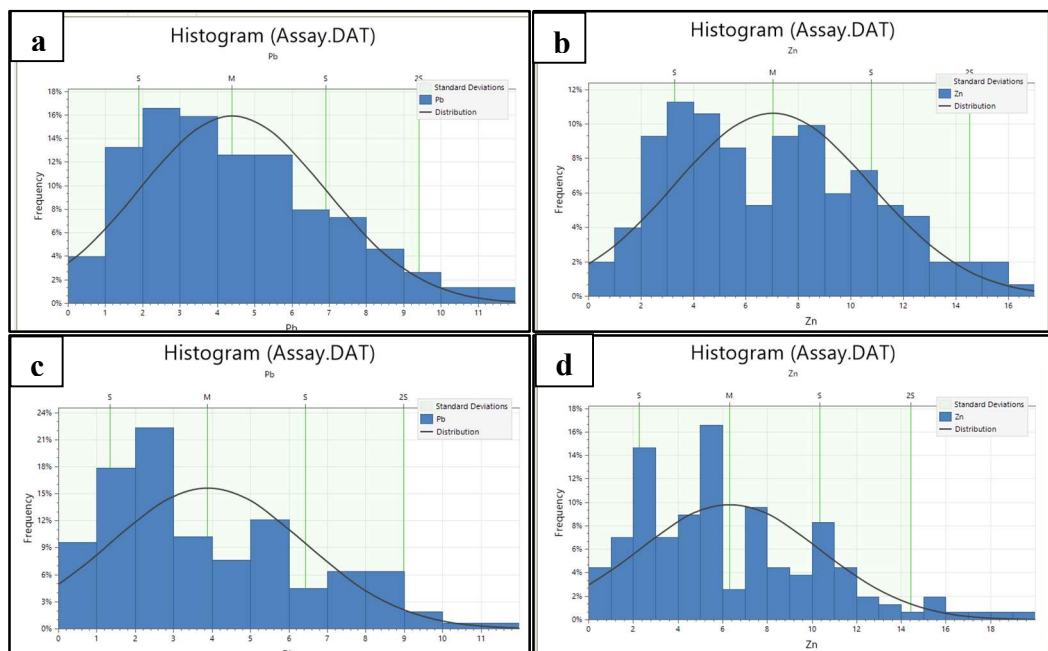
Gambar 4.9 Sebaran titik bor

#### 4.2.2. Analisis Statistik

Hasil analisis statistik univarian kadar Pb dan Zn dari data *assay* ditunjukkan pada Tabel 4.1 di bawah ini :

Tabel 4.1 Analisis statistik *raw* data

| Parameter                | Nilai        |       |              |       |
|--------------------------|--------------|-------|--------------|-------|
|                          | <i>North</i> |       | <i>South</i> |       |
|                          | Pb           | Zn    | Pb           | Zn    |
| Number of Values         | 151          | 151   | 157          | 157   |
| Minimum Value            | 0,50         | 0,22  | 0,05         | 0,34  |
| Maximum Value            | 11,92        | 16,06 | 11,87        | 19,07 |
| Mean                     | 4,40         | 7,02  | 3,88         | 6,31  |
| Median                   | 4,02         | 6,66  | 3,03         | 5,33  |
| Standard Deviation       | 2,5          | 3,75  | 2,55         | 4,06  |
| Variance                 | 6,26         | 14    | 6,51         | 16,5  |
| Coefficient of Variation | 0,569        | 0,534 | 0,657        | 0,643 |



Gambar 4.10 Histogram *raw* data (a) Pb domain *north* (b) Zn domain *north* (c) Pb domain *south* (d) Zn domain *south*

Dari hasil analisis statistik menunjukkan bahwa data *assay* Pb dan Zn memiliki koefisien variansi (CV) 0,569 dan 0,534 *north* serta 0,657 dan 0,643 *south*. Hal ini menunjukkan bahwa data masih bersifat heterogen sedang. Analisis distribusi data dilakukan menggunakan histogram. Pada histogram tidak memperlihatkan kehadiran data-data *outlier* atau pencilan sehingga data tidak perlu verifikasi serta

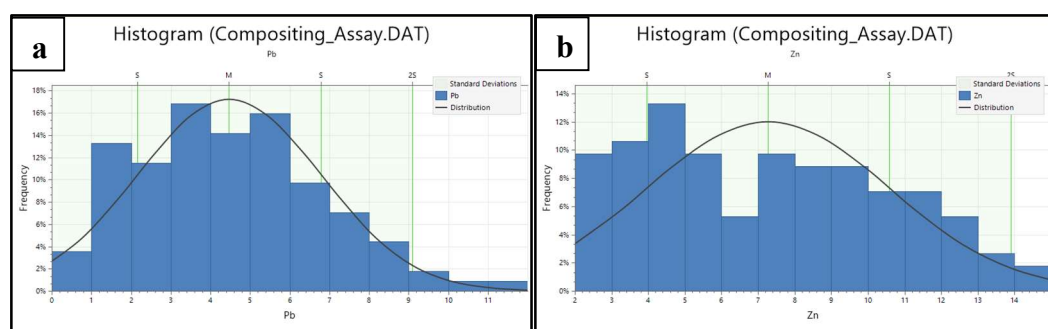
terdistribusi secara normal. Nilai CV termasuk dalam kategori variabilitas sedang. Menurut Bargawa (2018) koefisien variasi 0,5 – 1,5 dapat menggunakan metode geostatistik teknik *ordinary kriging*.

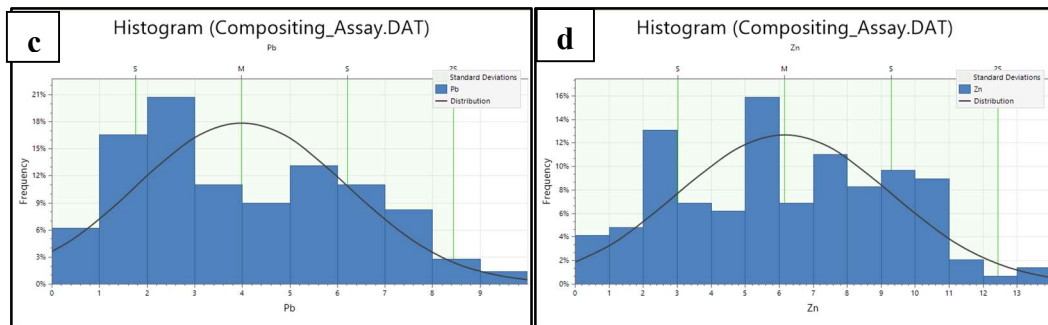
#### 4.2.3. Basis Data Komposit

Perhitungan kadar rata-rata tertimbang diperlukan sebelum dilakukannya penaksiran sumberdaya Pb dan Zn agar mendapat kadar rata-rata pada suatu titik bor per meternya. Secara matematis, perhitungan kadar rata-rata tertimbang dilakukan menggunakan bantuan *software* yang mengkompositkan kadar pada satu titik bor per 1 meter.

Tabel 4.2 Analisis statistik data komposit

| Parameter                | Nilai |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
|                          | North |       | South |       |
|                          | Pb    | Zn    | Pb    | Zn    |
| Number of Values         | 113   | 113   | 145   | 145   |
| Minimum Value            | 0,50  | 2.16  | 0,05  | 0,42  |
| Maximum Value            | 11,84 | 14,97 | 9,42  | 13,99 |
| Mean                     | 4,47  | 7,27  | 3,99  | 6,15  |
| Median                   | 4,28  | 7,16  | 3,72  | 5,90  |
| Standard Deviation       | 2,31  | 3,32  | 2,23  | 3,14  |
| Variance                 | 5,36  | 11    | 4,96  | 9,84  |
| Coefficient of Variation | 0,518 | 0,456 | 0,559 | 0,51  |





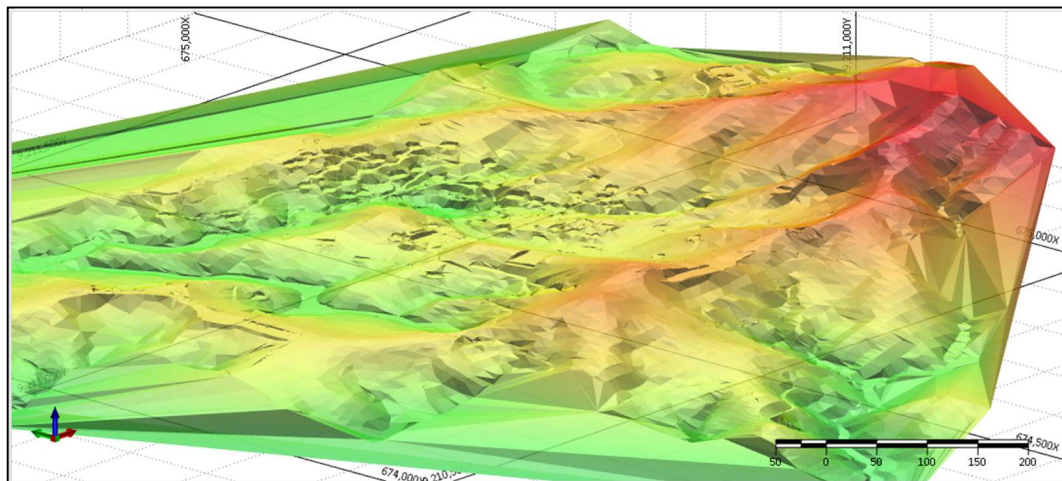
Gambar 4.11 Histogram data komposit (a) Pb domain *north* (b) Zn domain *north* (c) Pb domain *south* (d) Zn domain *south*

Perhitungan analisis statistik pada data kadar rata-rata tertimbang Pb dan Zn menunjukkan penurunan nilai pada nilai maksimal, standar deviasi, varian dan koefisien variansi serta nilai rata-rata mengalami kenaikan.

#### 4.2.4. Kontruksi Model Blok

##### 1. Model Topografi

Pembuatan model topografi memerlukan koordinat dari hasil digitasi peta daerah penelitian. Model topografi ini diperlukan untuk membatasi ekstrapolasi kadar Pb dan Zn ke arah vertikal. Model topografi daerah penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.12.

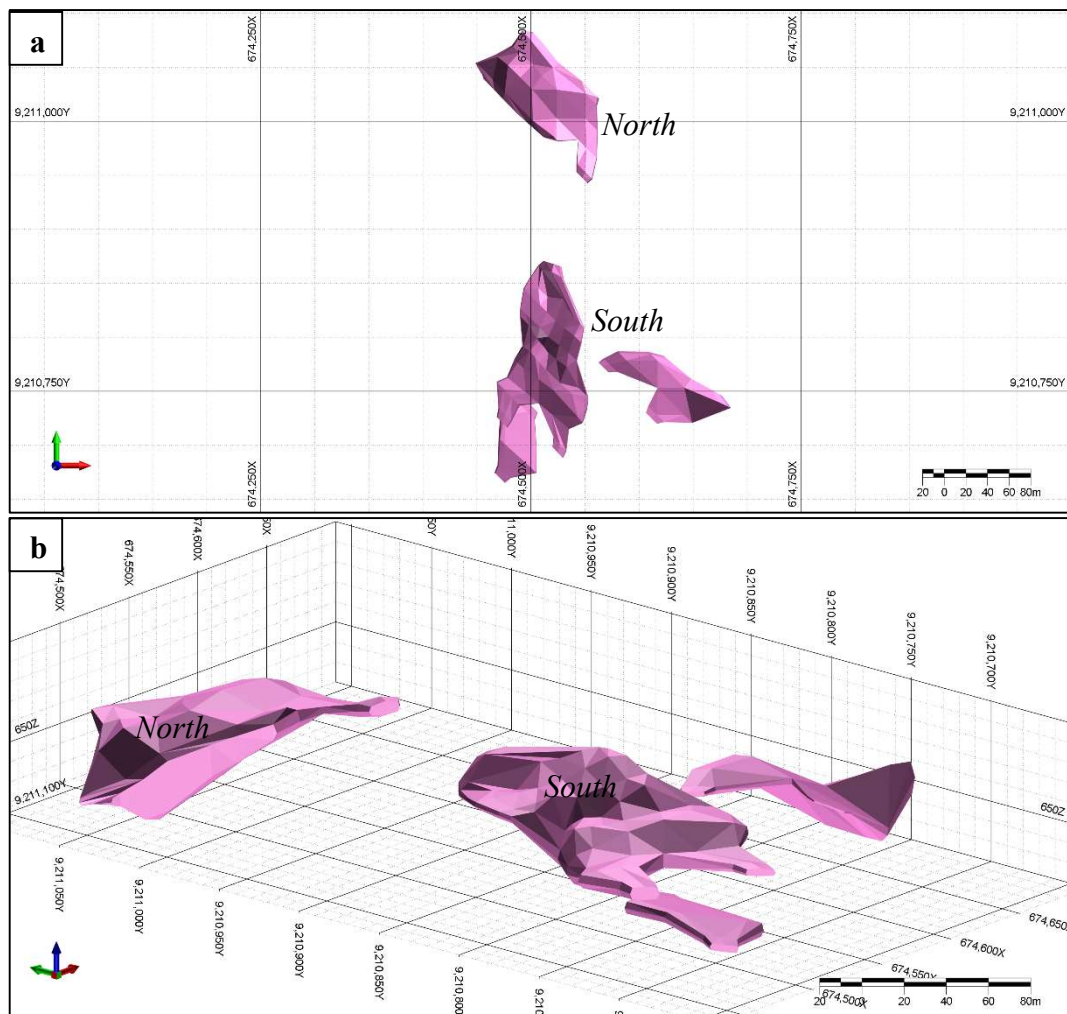


Gambar 4.12 Model topografi

##### 2. Model Geologi *Ore Body*

Model *ore body* adalah suatu cara untuk membatasi estimasi sumberdaya Pb-Zn pada suatu populasi di daerah penelitian. Sehingga hasil taksiran kadar tidak terjadi

ekstrapolasi terlalu jauh keluar batas mineralisasi. Pembuatan model ore body memiliki unsur geometri dan ukuran dan memperlihatkan arah atau kemiringan tubuh bijih. Model ini dibuat dengan menginterpolasi data kadar Pb-Zn diantara titik-titik data (lubang bor). Mineralisasi Pb-Zn berada pada kontak batuan vulkanik dan batugamping yaitu pada lapisan endapan skarn. Terbentuk dua domain yaitu *north* dan *south*.



Gambar 4.13 Ore body domain north dan south (a) plan view (b) 3d view

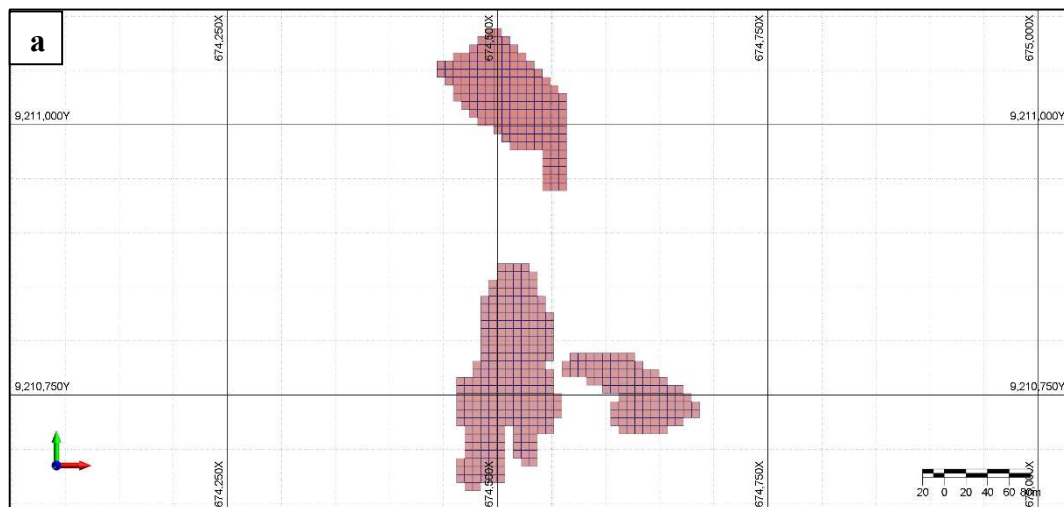
### 3. Model Blok Pb dan Zn

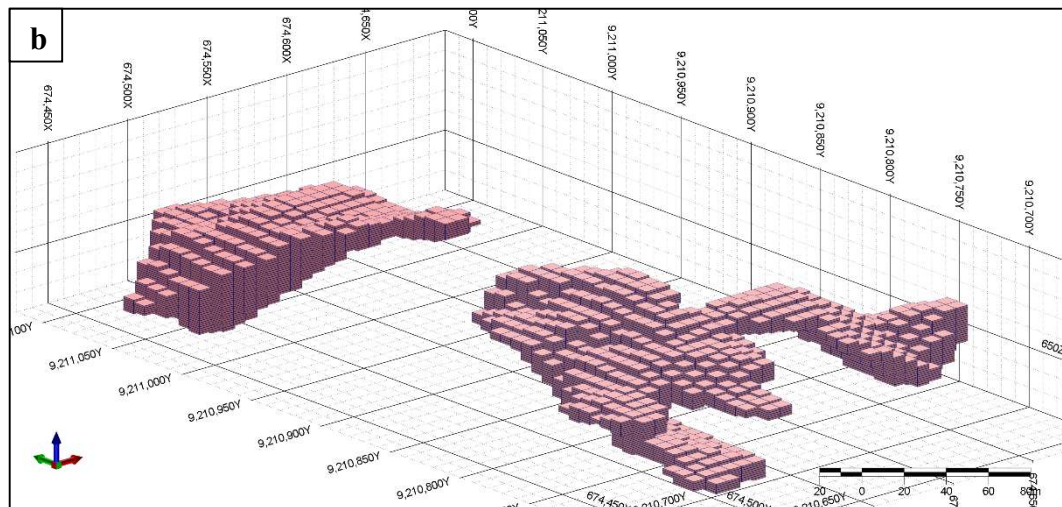
Dimensi blok model sangat penting dalam penaksiran dengan bentuk 3D (tiga dimensi). Hal ini dikarenakan bentuk blok yang menyerupai balok bertujuan untuk mewakili cebakan mineral di lokasi tertentu. Dimensi blok model harus memiliki

panjang, lebar, dan tebal. Pada umumnya, panjang dari blok model diharapkan dapat mewakili satu titik bor tersebut. Untuk tebalnya disesuaikan dengan panjang kadar rata-rata tertimbang. Penentuan batas luas pada keseluruhan blok model perlu mempertimbangkan letak dari tiap titik bor. Batas luas pada blok model dapat dilihat pada Tabel 4.3 dan Gambar 4.14.

Tabel 4.3 Parameter model blok

| <i>Parameter</i>           | <i>Easting</i> | <i>Northing</i> | <i>RL</i> |
|----------------------------|----------------|-----------------|-----------|
| <i>Minimum Coordinates</i> | 674443,171     | 9210665,829     | 622,616   |
| <i>Maximum Coordinates</i> | 674690,671     | 9211093,329     | 695,616   |
| <i>User Block Size (m)</i> | 7,5            | 7,5             | 1         |





Gambar 4.14 *Block Model* domain *north* dan *south* (a) *plan view* (b) *3d view*

Pada penelitian ini jarak antar titik bor rata-rata 30 m. Model blok diperoleh dari badan bijih (*ore body*) dengan ukuran  $\frac{1}{4}$  dari jarak lubang bor (7,5 m) dan kedalaman 1 m. Pada domain *north* jumlah blok sebanyak 1.346 dan domain *south* sebanyak 2.017 blok. Total keseluruhan blok yang akan diestimasi adalah 3.363 blok.

#### 4.2.5. Analisis Variogram

Analisis variogram digunakan untuk mengetahui karakteristik korelasi spasial atau Tingkat kemiripan (variabilitas) dari data *assay* di daerah penelitian. Analisis variogram dilakukan dengan *software* yang diawali dengan penentuan parameter penyusun dari variogram eksperimental yang terdiri dari *lags* dan *directions*. Parameter *lags* pada arah vertical dan arah horizontal berbeda. Parameter *lags* yang digunakan dalam pencarian data pada arah horizontal (*azimuth*) dan *perpendicular* (tegak lurus *azimuth*) sebesar “30” meter ditentukan berdasarkan spasi antar titik lubang bor, sedangkan pada arah vertical (*downhole*) disesuaikan dengan jarak dari data komposit *assay* per 1 meter kedalaman. Parameter *direction* yang digunakan pada penelitian ini menggunakan empat arah utama (*azimuth*) yang representative yaitu arah 0°, 45°, 90°, dan 135° dengan sudut toleransi sebesar 22.5° dan *bandwidth* sebesar 45 meter untuk arah horizontal sedangkan arah vertical sebesar 0,5 meter. Penggunaan nilai sudut toleransi ( $a_{tol}$ ) dan *bandwidth* membantu dalam mentoleransi data sampel terhadap jarak. Hal ini dilakukan mengingat kondisi topografi yang

tidak datar sehingga data sampel tidak sepenuhnya memiliki jarak antar data sampel yang secara tepat sama. Parameter penyusunan variogram yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Parameter variogram

| Arah     |       | Azimuth | Dip | Atol |
|----------|-------|---------|-----|------|
| Azimuth  | N-S   | 0       | 0   | 22.5 |
|          | NE-SW | 45      | 0   | 22.5 |
|          | E-W   | 90      | 0   | 22.5 |
|          | SE-NW | 135     | 0   | 22.5 |
| Downhole |       | 0       | 90  | 22.5 |

#### 4.2.6. Studi Variogram

Studi variogram adalah suatu analisis variogram yang dilakukan dengan cara mencocokkan (*fitting*) variogram eksperimental dengan variogram teoritis dengan menggunakan basis data komposit *assay* Pb-Zn. Adapun model variogram meliputi model *spherical*, *exponential*, dan *gaussian*. Variogram eksperimental dari data komposit *assay* yang telah dilakukan *fitting* variogram dapat dilihat pada lampiran dan parameter hasil *fitting* variogram pada Tabel 5.5.

Tabel 5.5 *fitting* variogram

| Model fitting      | Domain | Azimuth (°) | Nugget | Partial sill | Range maksimum (m) | Range minimum (m) | Rasio anisotropi (%) | Plunge (°) | RMSE  |
|--------------------|--------|-------------|--------|--------------|--------------------|-------------------|----------------------|------------|-------|
| <i>Spherical</i>   | North  | 0           | 0,372  | 0,605        | 29                 | 8,5               | 29,31                | 4          | 0,445 |
| <i>Exponential</i> |        | 0           | 0,384  | 0,62         | 46                 | 7                 | 15,21                | 6          | 0,457 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 0           | 0,249  | 0,75         | 31                 | 13                | 41,93                | 12         | 0,448 |
| <i>Spherical</i>   |        | 45          | 0,432  | 0,539        | 39                 | 7,6               | 19,48                | 10         | 0,448 |
| <i>Exponential</i> |        | 45          | 0,340  | 0,66         | 57                 | 17                | 29,82                | 12         | 0,460 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 45          | 0,200  | 0,766        | 45                 | 13                | 28,8                 | 4          | 0,441 |
| <i>Spherical</i>   |        | 90          | 0,300  | 0,542        | 46                 | 13                | 28,26                | 2          | 0,445 |
| <i>Exponential</i> |        | 90          | 0,331  | 0,589        | 56                 | 18                | 32,14                | 12         | 0,447 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 90          | 0,170  | 0,810        | 42                 | 14                | 33,33                | 8          | 0,454 |
| <i>Spherical</i>   |        | 135         | 0,519  | 0,481        | 48                 | 8                 | 16,66                | 5          | 0,450 |
| <i>Exponential</i> |        | 135         | 0,251  | 0,645        | 58                 | 11                | 18,96                | 0          | 0,439 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 135         | 0,100  | 0,859        | 56                 | 13                | 23,21                | 10         | 0,461 |
| <i>Spherical</i>   | South  | 0           | 0,488  | 0,465        | 56                 | 9                 | 16,07                | 0          | 0,476 |
| <i>Exponential</i> |        | 0           | 0,232  | 0,77         | 58                 | 7                 | 12,06                | 14         | 0,461 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 0           | 0,220  | 0,780        | 43                 | 17                | 39,53                | 10         | 0,476 |
| <i>Spherical</i>   |        | 45          | 0,499  | 0,456        | 32                 | 10                | 31,25                | 2          | 0,472 |
| <i>Exponential</i> |        | 45          | 0,350  | 0,637        | 68                 | 10                | 14,70                | 6          | 0,462 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 45          | 0,361  | 0,641        | 36                 | 12                | 33,33                | 4          | 0,485 |
| <i>Spherical</i>   |        | 90          | 0,375  | 0,567        | 55                 | 13                | 23,63                | 4          | 0,481 |
| <i>Exponential</i> |        | 90          | 0,253  | 0,690        | 60                 | 11                | 18,33                | 0          | 0,465 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 90          | 0,298  | 0,700        | 66                 | 16                | 24,24                | 6          | 0,477 |
| <i>Spherical</i>   |        | 135         | 0,486  | 0,473        | 50                 | 11                | 22,85                | 14         | 0,474 |
| <i>Exponential</i> |        | 135         | 0,383  | 0,594        | 70                 | 16                | 22,85                | 16         | 0,463 |
| <i>Gaussian</i>    |        | 135         | 0,332  | 0,670        | 62                 | 15                | 24,19                | 14         | 0,479 |

Dari hasil analisis variogram, didapatkan nilai parameter pencarian estimasi (*data search*) diantaranya data *strike* (*mayor*), *dip* (*semi-mayor*), dan *pitch* (*minor*). Nilai parameter *search distance ellipsoid* pada Tabel 4.6 dan hasil visualisasi *ellipsoid* dapat dilihat pada lampiran.

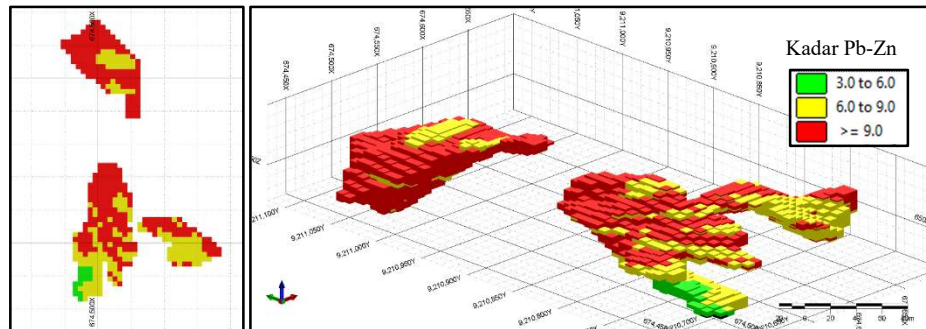
Tabel 4.6 Parameter *search distance*

| Model fitting      | Domain | Strike (°) | Dip (°) | Pitch (°) |
|--------------------|--------|------------|---------|-----------|
| <i>Spherical</i>   | North  | 0          | 20      | 4         |
| <i>Exponential</i> |        | 0          | 14      | 6         |
| <i>Gaussian</i>    |        | 0          | 8       | 12        |
| <i>Spherical</i>   |        | 45         | 10      | 12        |
| <i>Exponential</i> |        | 45         | 4       | 12        |
| <i>Gaussian</i>    |        | 45         | 8       | 4         |
| <i>Spherical</i>   |        | 90         | 16      | 2         |
| <i>Exponential</i> |        | 90         | 6       | 12        |
| <i>Gaussian</i>    |        | 90         | 8       | 4         |
| <i>Spherical</i>   |        | 135        | 14      | 8         |
| <i>Exponential</i> |        | 135        | 0       | 4         |
| <i>Gaussian</i>    |        | 135        | 10      | 4         |
| <i>Spherical</i>   | South  | 0          | 10      | 0         |
| <i>Exponential</i> |        | 0          | 14      | 14        |
| <i>Gaussian</i>    |        | 0          | 10      | 4         |
| <i>Spherical</i>   |        | 45         | 12      | 2         |
| <i>Exponential</i> |        | 45         | 10      | 6         |
| <i>Gaussian</i>    |        | 45         | 4       | 6         |
| <i>Spherical</i>   |        | 90         | 8       | 4         |
| <i>Exponential</i> |        | 90         | 0       | 0         |
| <i>Gaussian</i>    |        | 90         | 4       | 6         |
| <i>Spherical</i>   |        | 135        | 14      | 2         |
| <i>Exponential</i> |        | 135        | 6       | 16        |
| <i>Gaussian</i>    |        | 135        | 14      | 2         |

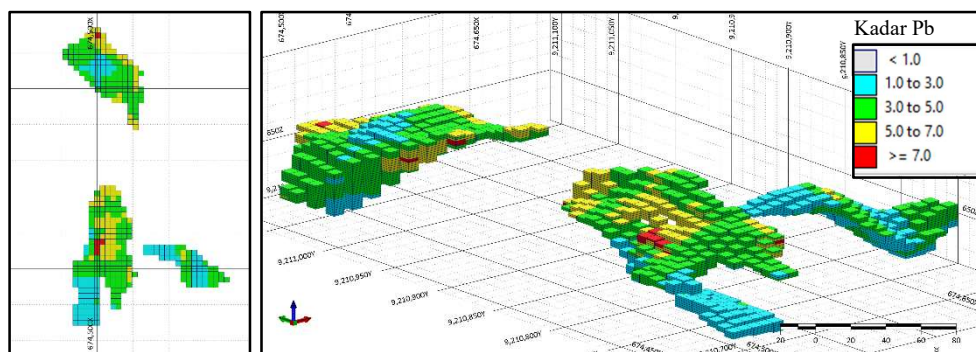
#### 4.2.7. Estimasi Teknik *Ordinary Kriging*

Estimasi kadar merupakan suatu proses memperkirakan akumulasi sebaran kadar pada lokasi tertentu berdasarkan metode estimasi. Setelah mendapatkan parameter variogram dari hasil fitting variogram, didapatkan bahwa model variogram *exponential* adalah metode terbaik dengan nilai RMSE terkecil pada azimuth 135° domain *north* dan azimuth 0° domain *south*. Kemudian hasilnya diinput kedalam penaksiran menggunakan metode *Ordinary Kriging* menggunakan software

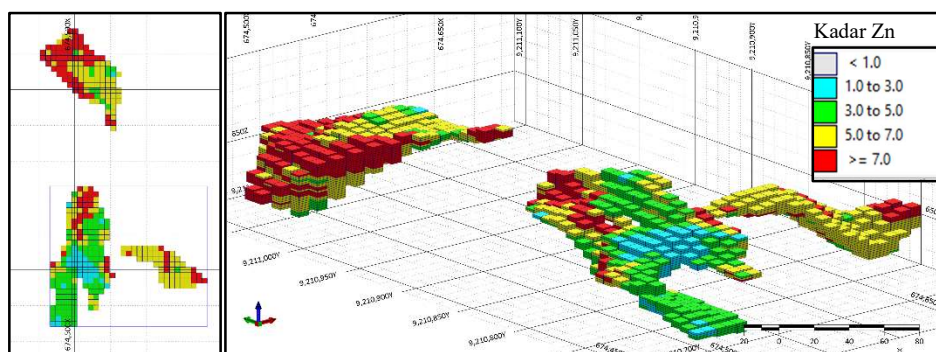
Micromine 2024.5. Estimasi dilakukan pada *ore body skarn* dengan ukuran *cell* blok 7,5 m x 7,5 m x 1 m. Hasil dari penaksiran pada Tabel 4.8 dan Gambar 4.15 hingga 4.17.



Gambar 4.15 Model blok hasil estimasi teknik *ordinary kriging* (a) *plan view* (b) *3d view*

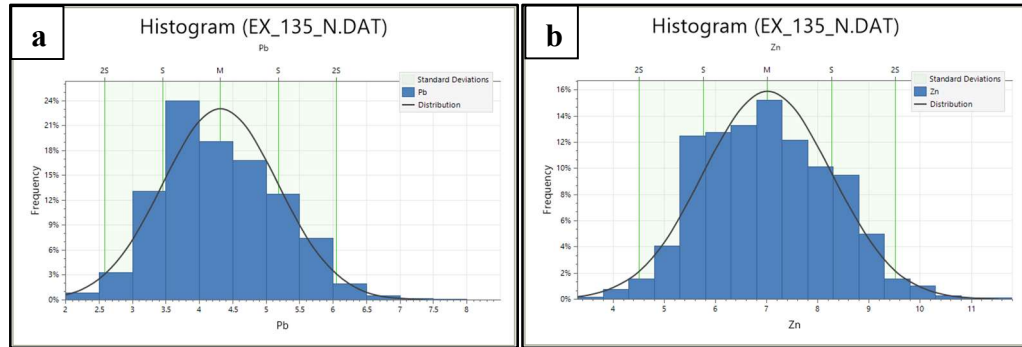


Gambar 4.16 Model blok hasil estimasi Pb teknik *ordinary kriging* (a) *plan view* (b) *3d view*

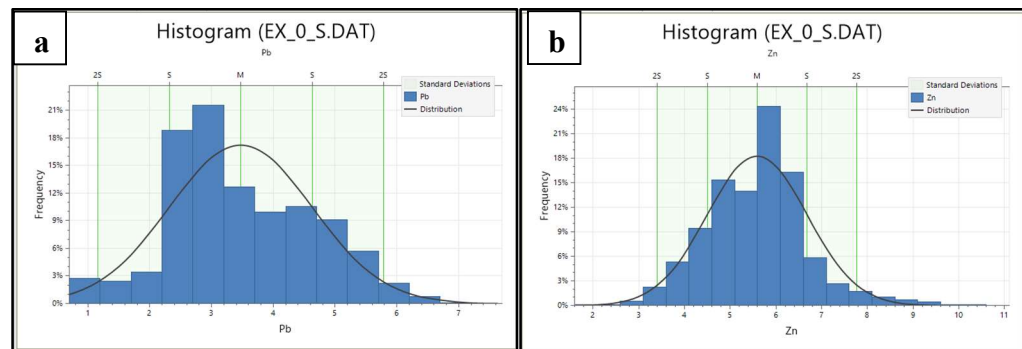


Gambar 4.17 Model blok hasil estimasi Zn teknik *ordinary kriging* (a) *plan view* (b) *3d view*

Tabel statistik hasil analisis pada blok taksiran dengan metode OK pada Tabel 4.7 terlihat nilai *mean* Pb-Zn 11,3 pada domain *north* dan 9,2 pada domain *south*. Histogram blok model hasil estimasi OK dapat dilihat pada Gambar 4.18 dan 4.19.



Gambar 4.18 Histogram blok model hasil estimasi OK domain *north* (a) Pb (b) Zn



Gambar 4.19 Histogram blok model hasil estimasi OK domain *south* (a) Pb (b) Zn

Tabel 4.7 Hasil analisis statistik estimasi metode OK

| Parameter                | Nilai        |       |              |       |
|--------------------------|--------------|-------|--------------|-------|
|                          | <i>North</i> |       | <i>South</i> |       |
|                          | Pb           | Zn    | Pb           | Zn    |
| Number of Values         | 1.346        | 1.346 | 2.017        | 2.017 |
| Minimum Value            | 1,38         | 2,72  | 1,21         | 1,41  |
| Maximum Value            | 8,80         | 13,25 | 8,06         | 13,32 |
| Mean                     | 4,23         | 7,07  | 3,61         | 5,59  |
| Median                   | 4,09         | 7,00  | 3,33         | 5,52  |
| Standard Deviation       | 1,10         | 1,67  | 1,29         | 1,94  |
| Variance                 | 1,22         | 2,77  | 1,66         | 3,37  |
| Coefficient of Variation | 0,261        | 0,235 | 0,357        | 0,347 |

Tabel 4.8 Hasil estimasi sumberdaya

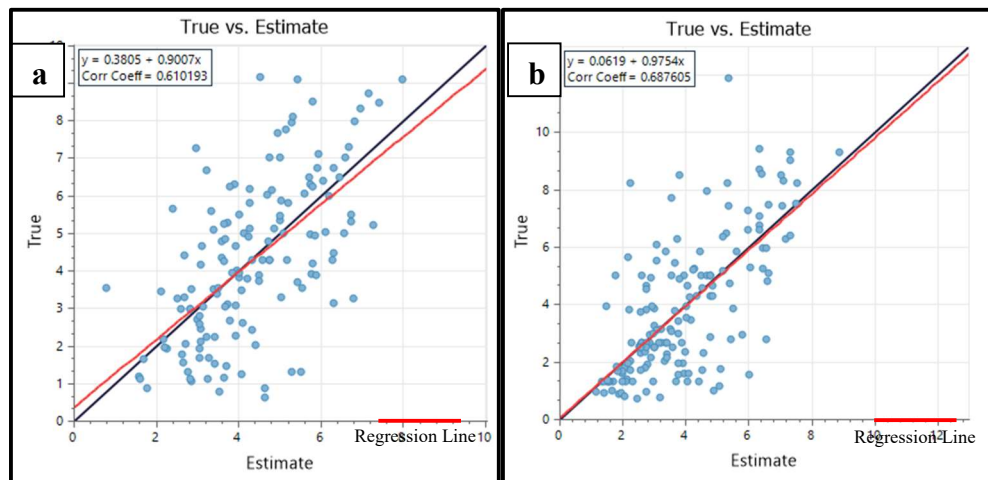
| Domain       | Volume<br>(m <sup>3</sup> ) | Density<br>(t/m <sup>3</sup> ) | Tonnes<br>(t) | PbZn<br>(%) |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-------------|
| <i>North</i> | 56,02                       | 3,2                            | 180           | 3-6         |
|              | 10.068,75                   |                                | 32.220        | 6-9         |
|              | 65.587,50                   |                                | 209.880       | >9          |
| <i>South</i> | 10.631,25                   | 3,2                            | 34.020        | 3-6         |
|              | 45.056,25                   |                                | 144.180       | 6-9         |
|              | 57.768,75                   |                                | 184.860       | >9          |

#### 4.2.8. Analisis Akurasi Taksiran

Analisis akurasi taksiran antara lain validasi sliang (*assay-estimated value*) dan visualisasi grafis dari sayatan 2 dimensi. Hasil penaksiran akan dibandingkan dengan *assay (raw data)* dengan validasi silang (*cross validation*). Hasil validasi silang akan menunjukkan hubungan antara taksiran kadar PbZn (*estimated value*) dan data *assay* PbZn (*true value*) dengan parameter koefisien korelasi (*r*), koefisien determinasi (*r*<sup>2</sup>), *Y-intercept*, dan *slope*.

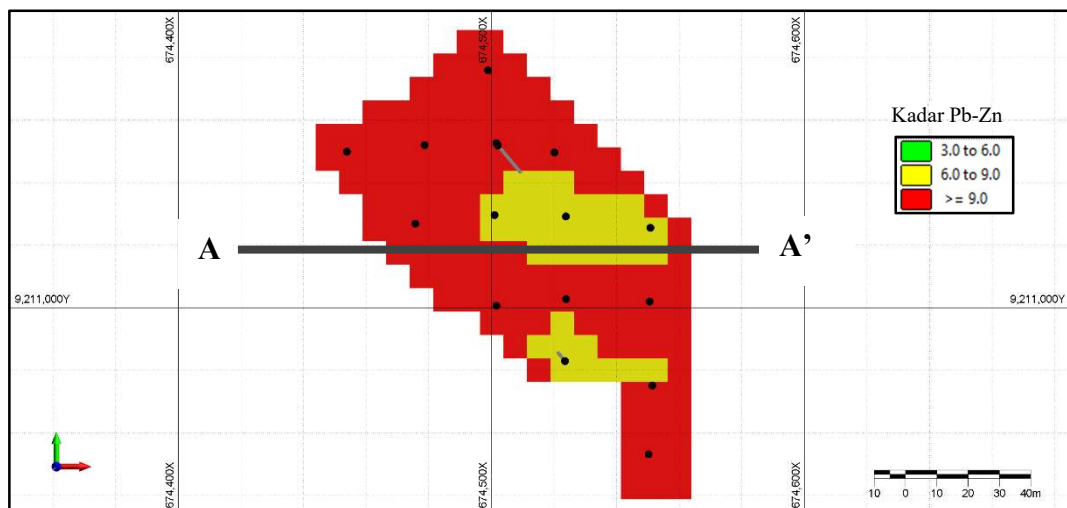
Tabel 4.9 Hasil *scatter plot true & estimated* PbZn domain *north*

| Domain       | Koefisien korelasi ( <i>r</i> ) | Koefisien determinasi ( <i>r</i> <sup>2</sup> ) | <i>Y-intercept</i> | <i>Slope</i> |
|--------------|---------------------------------|-------------------------------------------------|--------------------|--------------|
| <i>North</i> | 0,610                           | 0,372                                           | 0,3805             | 0,9007       |
| <i>South</i> | 0,687                           | 0,471                                           | 0,0619             | 0,9754       |

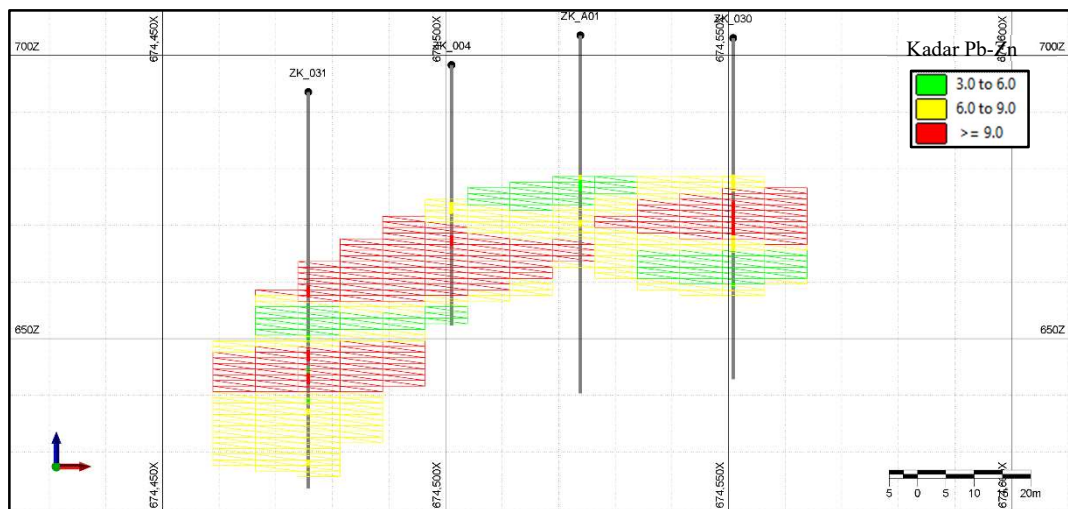


Gambar 4.20 Hasil *scatter plot true & estimated PbZn domain* (a) north (b) south

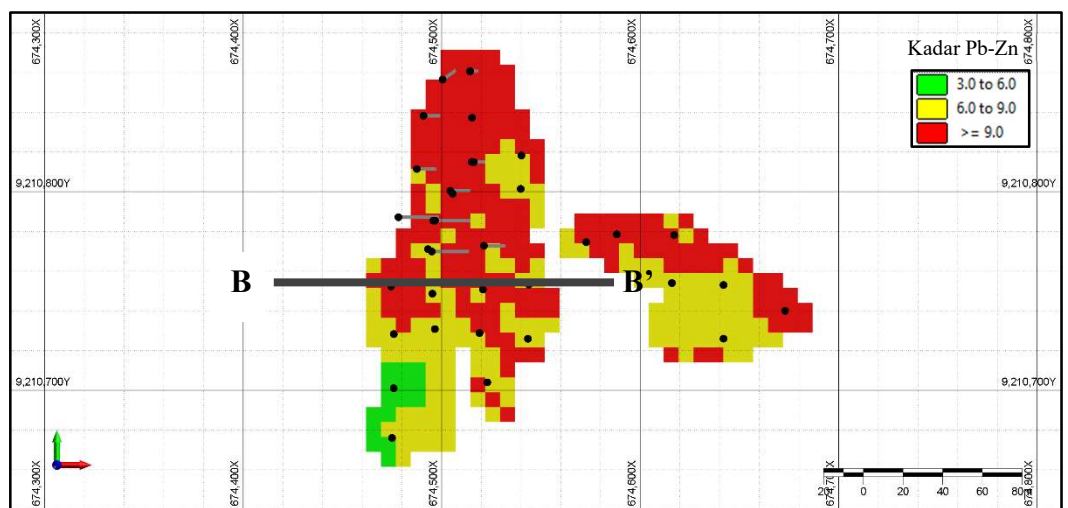
Visualisasi secara grafis data dan model dilakukan secara visual dengan sayatan-sayatan secara vertikal 2 dimensi. Model blok akan disayat bersamaan dengan data beserta data aktual di lapangan (*assay*), korelasi yang baik terjadi apabila antara blok model yang disayat dan data bor pada Lokasi yang mempunyai *trend* warna yang sama. Visualisasi data dan bodel dilakukan pada lubang bor zk\_031, zk\_004, zk\_A01 dan zk\_030 (domain *north*) dan zk\_10A\_3, zk\_10\_8, zk\_10\_3, zk\_8\_10, zk\_6\_11, dan zk\_4\_8 (domain *south*).



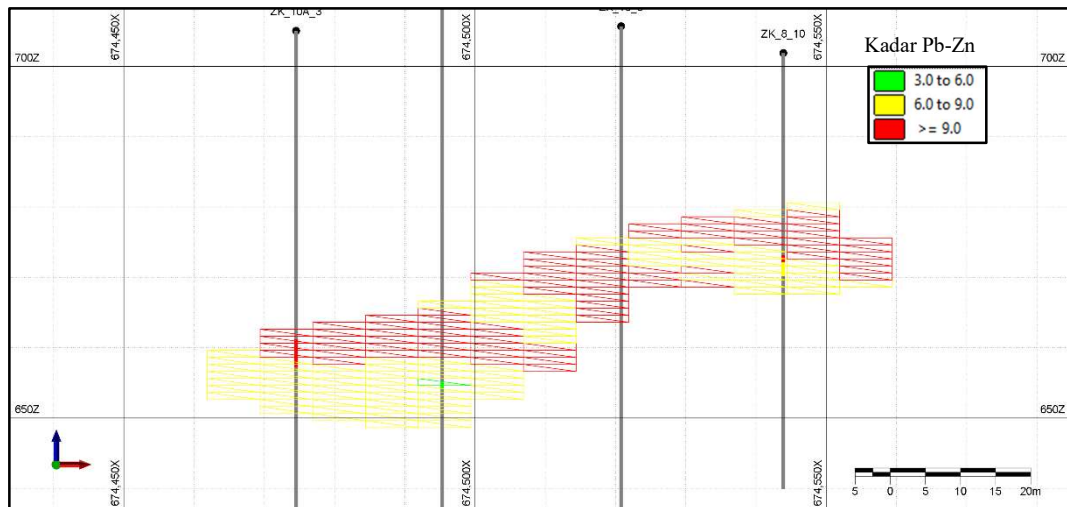
Gambar 4.21 *Plan view section block model north A-A'*



Gambar 4.22 Section block model A-A'



Gambar 4.23 Plan view section block model south B-B'



Gambar 4.24 Section block model B-B'

### 4.3. Klasifikasi Sumberdaya

Berdasarkan KCMII pada Pasal 23 menyatakan bahwa, pemilihan klasifikasi sumberdaya yang tepat sangat bergantung pada jumlah data, kualitas data, distribusi data serta tingkat keyakinan geologi. Penelitian ini menggunakan dua metode estimasi yaitu Ordinary Kriging (OK). Adapun estimasi metode Ordinary Kriging (OK) dalam klasifikasi sumberdaya menggunakan metode RKSD (Relative Kriging Standard Deviation)  $\geq 0,5$  *inferred*,  $0,3 \leq \text{RKSD} < 0,5$  *indicated*, dan  $\leq 0,3$  *measured*. Sedangkan klasifikasi sumberdaya menggunakan *kriging* efisiensi  $\leq 0,3$  terাকা,  $0,3 \leq \text{KE} < 0,5$  terunjuk, dan  $\geq 0,5$  terukur.

Tabel 4.10 Klasifikasi sumberdaya menggunakan RKSD

| Domain | Volume (m <sup>3</sup> ) | Density (t/m <sup>3</sup> ) | Tonnes (t) | Pb (%) | Zn (%) | PbZn (%) | Metal Content PbZn (t) | Klasifikasi RKSD |
|--------|--------------------------|-----------------------------|------------|--------|--------|----------|------------------------|------------------|
| North  | 1.800                    | 3,2                         | 5.760      | 2,31   | 5,54   | 7,86     | 452,73                 | Inferred         |
|        | 30.543,75                |                             | 97.740     | 3,38   | 6,89   | 10,28    | 10.047,67              | Indicated        |
|        | 43.368,75                |                             | 138.780    | 4,90   | 7,26   | 12,17    | 16.889,52              | Measured         |
| South  | 42.693,75                | 3,2                         | 136.620    | 2,44   | 5,17   | 7,62     | 10.410,44              | Inferred         |
|        | 34.931,25                |                             | 111.780    | 3,52   | 5,70   | 9,23     | 10.317,29              | Indicated        |
|        | 35.831,25                |                             | 114.660    | 5,08   | 5,98   | 11,07    | 12.692,86              | Measured         |

Tabel 4.11 Klasifikasi sumberdaya menggunakan *kriging efficiency*

| Domain       | Volume<br>(m <sup>3</sup> ) | Density<br>(t/m <sup>3</sup> ) | Tonnes<br>(t) | Pb<br>(%) | Zn<br>(%) | PbZn<br>(%) | Metal<br>Content<br>PbZn (t) | Klasifikasi<br>KE |
|--------------|-----------------------------|--------------------------------|---------------|-----------|-----------|-------------|------------------------------|-------------------|
| <i>North</i> | 3.487,50                    | 3,2                            | 11.160        | 4,63      | 6,39      | 11,03       | 1.119,34                     | Inferred          |
|              | 34.818,75                   |                                | 111.420       | 4,18      | 6,86      | 11,04       | 12.300,76                    | Indicated         |
|              | 37.406,25                   |                                | 119.700       | 4,24      | 7,33      | 11,58       | 13.861,26                    | Measured          |
| <i>South</i> | 49.050                      | 3,2                            | 156.960       | 3,31      | 5,36      | 8,68        | 13.624,12                    | Inferred          |
|              | 40.331,25                   |                                | 129.060       | 3,81      | 5,65      | 9,47        | 12.221,98                    | Indicated         |
|              | 24.075                      |                                | 77.040        | 3,87      | 5,95      | 9,83        | 7.573,03                     | Measured          |

## **BAB V**

### **PEMBAHASAN**

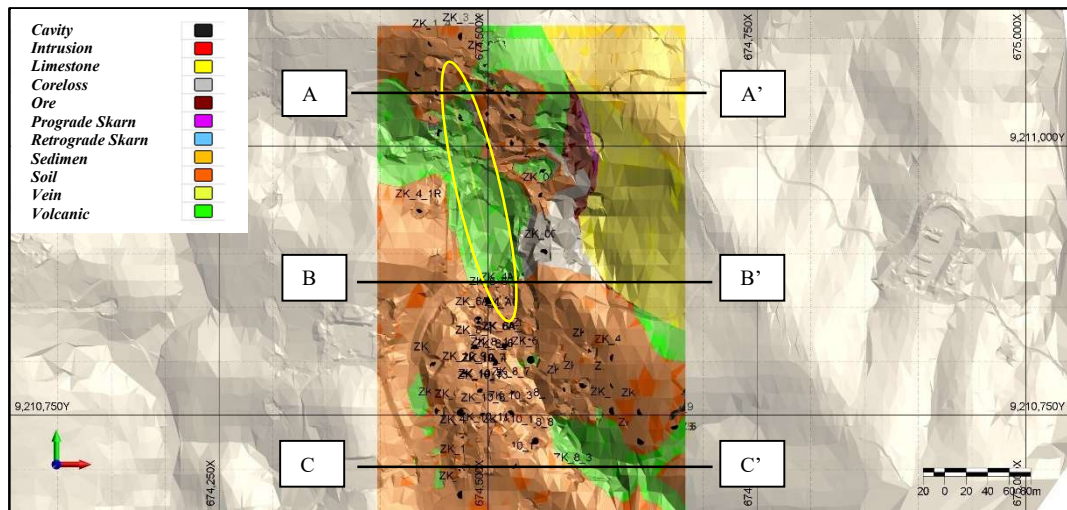
#### **5.1. Analisis Geologi Daerah Penelitian**

##### **5.1.1. Kondisi Geologi Lokal**

Deposit Pb-Zn skarn pada daerah penelitian dikontrol dari beberapa aspek yaitu litostratigrafi dengan kehadiran batugamping, struktur geologi dan intrusi sekitar. Secara litostratigrafi terdapat perselingan antara batuan vulkanik dan batugamping yang diterobos oleh satuan intrusi dasit. Struktur geologi yang terlihat umumnya sesar mendatar arah N330E. Sesar ini terlihat berkembang pada kontak batugamping-bijih dan batuan vulkanik.

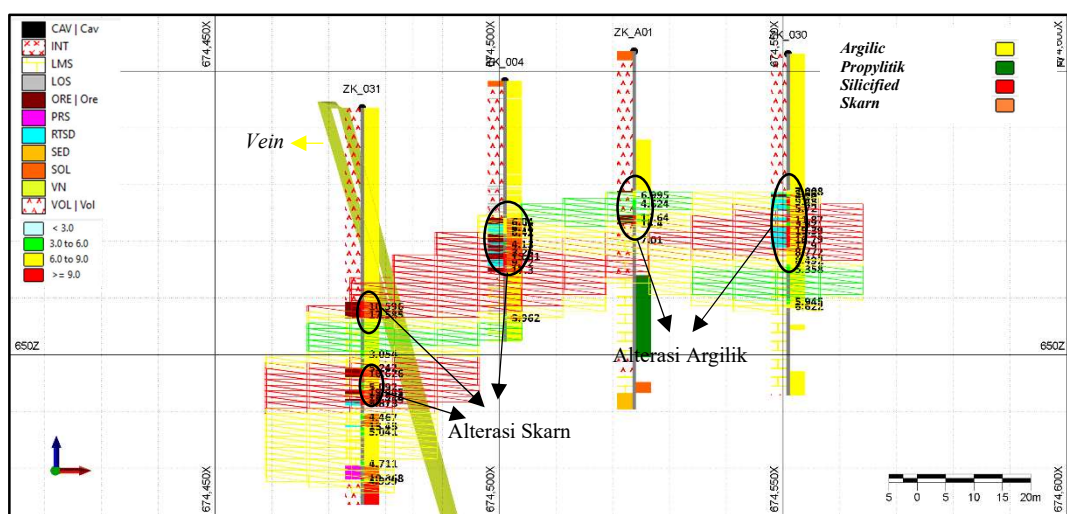
Batuan intrusi yang hadir pada daerah penelitian adalah kelompok dasit porfir. Batuan dasit menembus satuan batuan lainnya dengan bentuk kontak beragam. Kontak honfelsik diikuti pembentukan silika-epidot pada batuan vulkanik. Kontak skarn pada batugamping membentuk metalimestone/marmer yang kemudian berkembang menjadi bijih (ore) skarn. Berdasarkan hal tersebut maka terlihat batuan intrusi ini adalah penyebab terbentuknya mineralisasi Pb-Zn, terutama pada batuan dasit porfiritik.

Kondisi alterasi hidrotermal di daerah penelitian diperoleh berdasarkan pemetaan lapangan dan analisis laboratorium terhadap beberapa sampel. Secara umum hampir seluruh litologi di daerah penelitian telah mengalami perubahan akibat alterasi hidrotermal. Zona alterasi hidrotermal di daerah penelitian terbagi menjadi tiga zona yaitu silisifikasi, argilik dan propilitik. Zona silisifikasi ditandai dengan adanya batuan padat yang mengandung mineral silika berlebih. Zona argilik dicirikan oleh keberadaan mineral sekunder berupa mineral lempung. Alterasi argilik ini terjadi pada satuan andesit, breksi tuf, dan dasit. Zona alterasi propilitik yang terindikasi di lapangan ditandai dengan warna kehijauan dan telah mengalami alterasi oleh klorit.

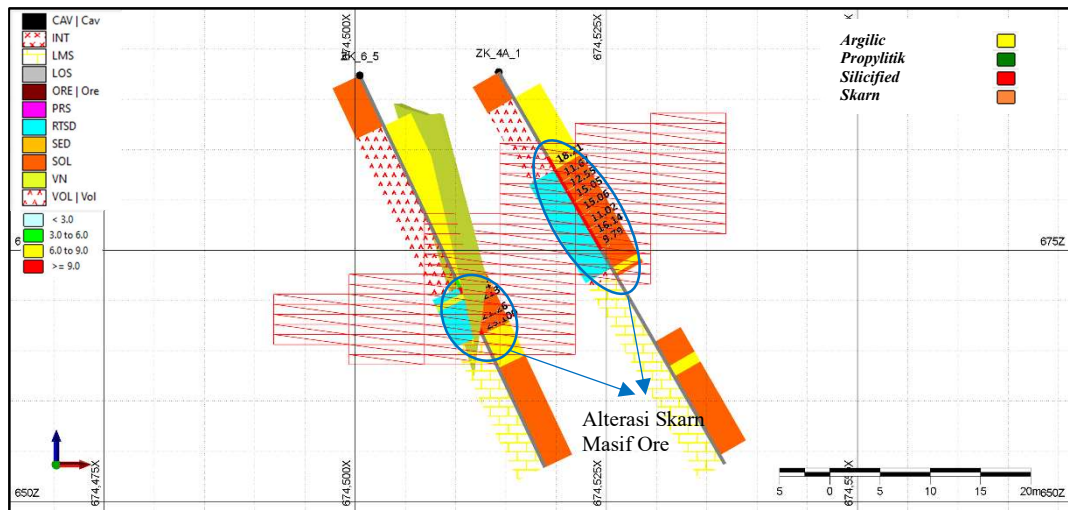


Gambar 5.1 Model Geologi

Secara umum badan bijih pada daerah penelitian berada pada alterasi argilik. Zona argilik memiliki kondisi tekstur lempung halus (*finely laminated* atau *brecciated*) dengan rendahnya kekompakan. Pada bagian lingkaran kuning adalah jalur vein. Zona ini menjadi jalur mineralisasi Pb-Zn. Tipe ore pada zona mineralisasi ini berupa masif dengan alterasi skarn. Kondisi tekstur masif dan kompak yang dapat terlihat jelas pada skala makro. Zona skarn pada daerah penelitian lebih homogen dalam hal kadar logam dibandingkan zona argilik. Distribusi kadar pada zona argilik menurunkan akurasi estimasi, karena kadar yang rendah dan tidak homogen,

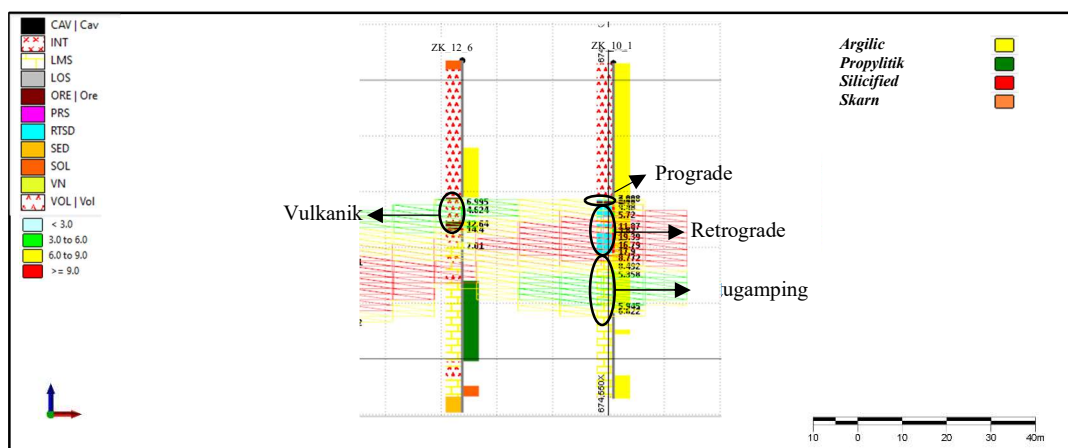


Gambar 5.2 Section Model Geologi dan Alterasi A – A'



Gambar 5.3 Section Model Geologi dan Alterasi B – B'

Mineralisasi Pb-Zn dominan terjadi pada zona skarn retrograde. Selain pada zona skarn, batuan vulkanik, batugamping menjadi batuan induk mineralisasi Pb-Zn. Sisipan mineralisasi juga ditemukan pada litologi sedimen lempung. Berdasarkan litologi batas mineralisasi berada pada batugamping. Kadar tinggi Pb-Zn berada pada litologi *retrograde skarn* dengan kisaran kadar diatas 9%. Beberapa kadar tinggi juga ditemukan pada litologi vulkanik dan batugamping. Kadar rendah hingga menengah berada pada zona skarn *prograde* dan sedimen lempung dengan kisaran kadar 3 – 9.



Gambar 6.4 Section Model Geologi dan Alterasi C – C'

### 5.1.2. Geometri Endapan

Model geometri endapan bijih Pb-Zn pada lingkungan skarn di daerah penelitian terbentuk dari hasil interaksi kompleks antara litologi, struktur geologi, dan aktivitas intrusi. Sesar mendatar yang berarah N330E di daerah penelitian bertindak sebagai jalur utama bagi fluida mineralisasi, yang juga membentuk pola memanjang bagi endapan bijih. Endapan skarn secara umum berkembang pada kontak antara batugamping dan intrusi, yang menghasilkan bentuk lentikular atau tabular mengikuti arah zona kontak. Bentuk endapan ini umum terjadi pada skarn karena mineralisasi logam biasanya terkonsentrasi di zona kontak, membentuk pola memanjang atau lempeng tipis di sepanjang batas intrusi dan batuan karbonat (Meinert, 1992). Pada daerah penelitian, intrusi dasit yang memotong batugamping menghasilkan kontak skarn yang kaya Pb-Zn, sehingga model endapan bijih berkembang di sepanjang batas intrusi, membentuk geometri tabular yang dipengaruhi oleh struktur lokal. Pada hasil pengolahan data model *ore body* memiliki bentuk yang tidak beraturan Gambar 4.13. Kemungkinan besar mineralisasi terjadi pada struktur atau rekahan-rekahan minor diantara kontak batugamping dan vulkanik terlihat pada Gambar 4.3. Berdasarkan buku SME Mining Engineering handbook pemilihan metode estimasi berdasarkan geometri endapan dan nilai *coefficient of variance*. Berdasarkan geologi daerah penelitian termasuk dalam *base metal skarn* dengan *erratic shape* dengan kategori geometri *very complex* (rumit).

### 5.2. Pemilihan Model Variogram dan Arah Anisotropi

Analisis statistik menunjukkan bahwa data kadar Pb dan Zn termasuk kedalam kategori variabilitas sedang dengan nilai koefisien variasi dengan rata-rata 0,5. Distribusi kadar logam ini memberikan dasar dalam menentukan parameter variogram yang tepat untuk pemodelan spasial. Dalam analisis variogram, parameter *sill*, *range*, dan *nugget* memiliki pengaruh penting dalam menentukan model variogram terbaik dan arah anisotropi yang sesuai untuk mengestimasi distribusi spasial sumber daya mineral Pb-Zn.

Dalam penelitian ini, tiga model variogram *spherical*, *exponential*, dan *gaussian* digunakan untuk mengidentifikasi pola keterkaitan spasial kadar Pb-Zn. Setiap model variogram memiliki karakteristik yang unik yang dapat mempengaruhi hasil *fitting* dan akurasi dalam pemodelan spasial. Variogram *spherical* menunjukkan *range* relatif lebih pendek dibandingkan *exponential* atau *gaussian*. Keterbatasan utama adalah kurangnya akurasi pada area yang lebih luas atau pada arah anisotropi yang panjang. Model variogram *spherical* lebih cocok untuk area dengan distribusi kadar yang terbatas pada area lokal. *Range* pada variogram *exponential* kecenderungan memiliki korelasi yang lebih jauh, cocok untuk menggambarkan keterkaitan pada daerah dengan variasi kadar Pb-Zn yang lebih panjang. Model ini berguna dalam situasi di mana mineralisasi Pb-Zn memiliki keterkaitan spasial yang lebih jauh dari area eksplorasi.

Berdasarkan perolehan hasil dari model *fitting* variogram dapat dilakukan evaluasi untuk menghasilkan estimasi yang terbaik. Evaluasi dilakukan dengan cara *cross validation* yang akan diperoleh suatu nilai yang menentukan keakuratan estimasi yaitu RMSE. Pada domain *north* model variogram *exponential* arah 135° menghasilkan nilai RMSE terendah yaitu 0,439. Nilai ini menunjukkan bahwa model memberikan kecocokan yang baik dan tingkat ketidakpastian yang lebih baik dari model lainnya. Model variogram *gaussian* pada arah 45° juga menunjukkan kecocokan yang baik dengan nilai RMSE (0,441). Hal ini mengindikasikan bahwa model variogram *gaussian* pada arah ini dapat menjadi alternatif yang baik untuk estimasi sumber daya di arah 45°.

Pada domain *south* model variogram *exponential* pada arah 0° adalah model terbaik secara keseluruhan dengan nilai RMSE 0,461. Selain itu pada arah 45° dapat dipertimbangkan sebagai alternatif. Model variogram *exponential* pada arah 45° ini memiliki RMSE (0,462) sehingga dapat digunakan sebagai alternatif. Model variogram *spherical* dan *gaussian* cenderung memiliki nilai RMSE yang sedikit lebih tinggi dibandingkan *exponential* yang menunjukkan bahwa model ini mungkin kurang optimal untuk data ini.

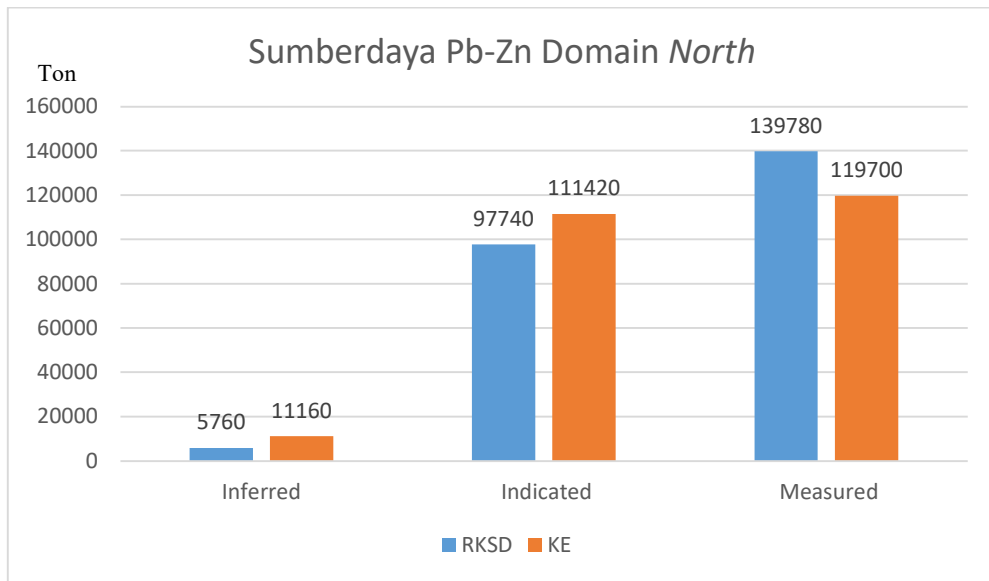
Pada Gambar 4.20 terlihat hasil dari *cross validation* antara *true* (data *assay*) dan *estimated* (hasil dari estimasi teknik OK). Pada domain *north* menghasilkan regresi

linier dengan *Y-intercept* lebih tinggi dari kondisi ideal (nol) pada kadar rendah dan *Y-intercept* lebih rendah pada kadar lebih tinggi. Hal ini menunjukkan adanya *overestimated* pada kadar rendah dan *underestimated* pada kadar tinggi. Pada domain *south* menghasilkan garis regresi hampir berhimpitan, namun pada kadar tinggi sedikit lebih rendah dari kondisi ideal (nol). Kondisi ini menunjukkan adanya *underestimated* pada kadar tinggi.

Visualisasi secara grafis data dan model dilakukan dengan sayatan-sayatan secara vertikal 2 dimensi. Model blok akan disayat bersamaan dengan data beserta data aktual lapangan (*assay*). Korelasi yang baik terlihat antara blok model yang disayat dan data bor pada lokasi mempunyai trend warna yang sama. Visualisasi data dan model yang mendekat ada pada blok model hasil estimasi menggunakan teknik *ordinary kriging*.

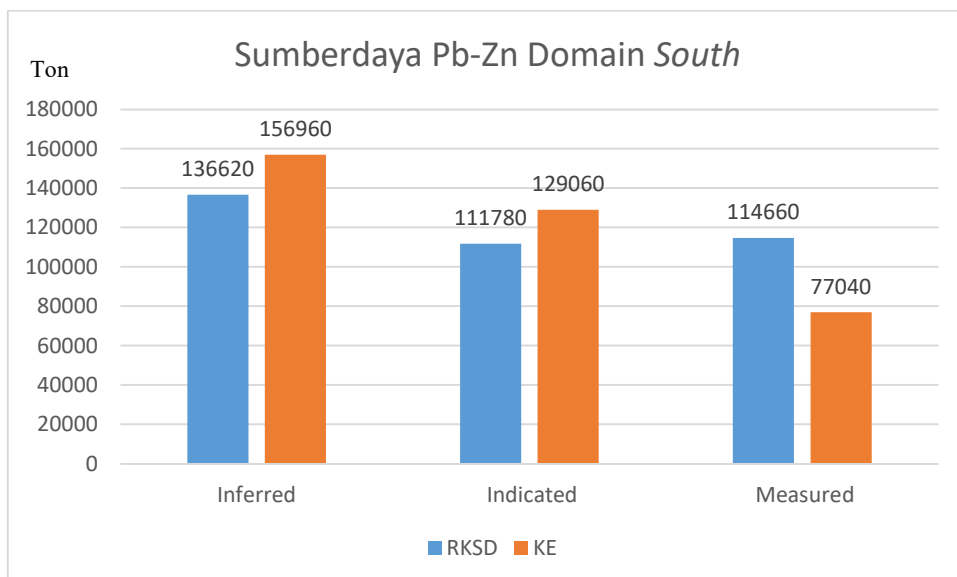
### 5.3. Klasifikasi Sumberdaya

Pada penelitian ini, klasifikasi sumber daya mineral Pb-Zn dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu *Relative Kriging Standard Deviation* (RKSD) dan *Kriging Efficiency* (KE). Klasifikasi dengan RKSD dan KE pada dasarnya diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu sumberdaya terukur (*measured*), terunjuk (*indicated*) dan tereka (*inferred*). Klasifikasi RKSD ini berdasarkan rasio nilai standar deviasi dan nilai taksiran sebuah blok. Semakin kecil rasio antara nilai standar deviasi dan nilai taksiran blok, maka tingkat keyakinan sumberdaya akan semakin tinggi dan diklasifikasikan sebagai sumberdaya terukur (*measured*) dan sebaliknya semakin besar rasio antara nilai standar deviasi dan nilai taksiran blok maka tingkat keyakinan sumberdaya akan semakin berkurang dan diklasifikasikan sebagai sumberdaya terunjuk (*indicated*) ataupun tereka (*inferred*). Batas nilai klasifikasi RKSD didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Marwanza (2023) yaitu sumberdaya *measured*  $\leq 0,3$  *indicated*  $\leq 0,5$  dan *inferred*  $\geq 0,5$ .



Gambar 5.5 Grafik klasifikasi sumberdaya domain *north*

Klasifikasi KE didasarkan pada parameter kriging efisiensi yang diperoleh dari nilai *block varians* dikurangi *kriging varians* dibagi dengan *block varians*. Tingkat keyakinan sumberdaya akan semakin tinggi jika nilai *kriging efficiency* mendekati satu. Batas nilai klasifikasi KE yaitu sumberdaya *inferred*  $\leq 0,3$  *indicated*  $\leq 0,5$  dan *measured*  $\geq 0,5$  (Marwanza, I. 2023).



Gambar 5.6 Grafik klasifikasi sumberdaya domain *south*

Hasil dari klasifikasi RKSD lebih kecil pada kelas *inferred* dan *indicated* dibandingkan dengan klasifikasi KE. Sedangkan kelas *measured* menunjukkan hasil sebaliknya, yaitu klasifikasi dengan RKSD lebih besar dibandingkan KE. Pada domain *north* menghasilkan klasifikasi *inferred* lebih sedikit dibandingkan dengan domain *south*. Perbedaan ini disebabkan oleh variabilitas kadar pada domain *south* lebih besar dari domain *north* yang dapat dilihat dari nilai koefisien variasi (cv).

Klasifikasi pada domain *north* menghasilkan jumlah sumberdaya dengan RKSD dan KE berturut-turut yaitu tereka (*inferred*) sebesar 5.760 ton dan 11.160 ton, terunjuk (*indicated*) sebesar 97.740 ton dan 111.420 ton, terukur (*measured*) sebesar 138.780 ton dan 119.700 ton. Total keseluruhan sumberdaya pada domain *north* adalah 242.280 ton dengan kadar rata-rata Pb 4,23% dan Zn 7,07% . Pada domain *south* berturut-turut yaitu tereka (*inferred*) sebesar 136.620 ton dan 156.960 ton, terunjuk (*indicated*) sebesar 111.780 ton dan 129.060 ton, terukur (*measured*) sebesar 114.660 ton dan 77.040 ton. Total keseluruhan sumberdaya pada domain *south* adalah 363.060 ton dengan kadar rata-rata Pb 3,61 dan Zn 5,59%.

#### 5.4. Pembuktian Hipotesis

Berdasarkan hasil dan pembahasan maka dilakukan pembuktian hipotesis. Adapun hipotesis pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Pembuktian Hipotesis

| No | Hipotesis                                                                                                                | Pembuktian                                                                                                                                                                             |
|----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Kondisi geologi daerah penelitian didominasi oleh batuan vulkanik, batugamping dan alterasi didominasi oleh silisifikasi | Hasil pemodelan geologi menunjukkan daerah penelitian didominasi oleh batuan vulkanik dan batugamping (Gambar 4.4). Sedangkan pemodelan alterasi didominasi oleh argilik (Gambar 4.5). |
| 2  | Model variogram <i>spherical</i> dan arah anisotropi <i>N-S</i> lebih optimal dalam                                      | Hasil <i>fitting</i> variogram menunjukkan bahwa model variogram <i>exponential</i> memiliki nilai RMSE paling rendah (Tabel 5.5). Arah anisotropi pada domain                         |

|   |                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|---|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   | penaksiran sumberdaya galena.                                                                                                                                   | <i>south</i> menunjukkan kecocokan pada arah anisotropi <i>N-S</i> (Lampiran L). Namun pada domain <i>north</i> menunjukkan kecocokan pada arah anisotropi <i>SE-NW</i> (Lampiran I).                                                                                                                                                                                                                              |
| 3 | Klasifikasi sumberdaya dengan nilai <i>Relative Kriging Standard Deviation</i> (RKSD) dan <i>Kriging Efficiency</i> (KE) menghasilkan klasifikasi yang berbeda. | Berdasarkan klasifikasi sumberdaya menggunakan RKSD dan KE memiliki perbedaan kadar rata-rata dan tonase. Hasil dari klasifikasi RKSD lebih kecil pada kelas <i>inferred</i> dan <i>indicated</i> dibandingkan dengan klasifikasi KE. Sedangkan kelas <i>measured</i> menunjukkan hasil sebaliknya, yaitu klasifikasi dengan RKSD lebih besar dibandingkan KE (Tabel 4.10, Tabel 4.11, Gambar 5.5 dan Gambar 5.6). |

## **BAB VI**

### **KESIMPULAN**

#### **6.1. Kesimpulan**

- 1 Kondisi geologi di daerah penelitian didominasi oleh perselingan antara batugamping dan batuan vulkanik dengan alterasi didominasi oleh argilik.
- 2 Model variogram *exponential* azimuth 135° pada domain *north* dan 0° pada domain *south* menunjukkan hasil *fitting* terbaik dengan nilai RMSE rendah.
- 3 Klasifikasi sumber daya dengan menggunakan RKSD dan KE menunjukkan perbedaan dalam tingkat kepercayaan estimasi. Total keseluruhan sumberdaya pada daerah penelitian adalah 605.340 ton dengan kadar rata-rata Pb 3,85% dan Zn 6,18%.

#### **6.2. Saran**

- 1 Pengembangan data geologi dan pemetaan detail untuk meningkatkan akurasi model sumber daya. Zona vein pada Gambar.5.1 menunjukkan potensi sebagai jalur utama mineralisasi galena. Rekomendasi penambahan titik bor dengan pola grid memanjang sejajar mengikuti arah memanjang vein (sekitar 90 – 100 meter panjang vein) dan tegak lurus terhadap arah vein. Dengan jarak antar lubang bor 30 meter, diperlukan 3 titik bor sejajar pada jalur vein utama.
- 2 Penelitian ini menunjukkan hasil analisis variogram dengan nilai RMSE yang hampir seragam pada angka 0,4 mengindikasikan bahwa tingkat error model masih relative tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa model variogram yang digunakan belum mampu sepenuhnya merepresentasikan variasi spasial data dengan optimal. Dalam mengatasi kelemahan ini, disarankan untuk mengintegrasikan pendekatan non-linier dalam analisis geostatistik seperti penggunaan *indicator kriging*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abzalov, M. (2016). *Applied Mining Geology*. Springer International Publishing. Switzerland.
- Amelia, R., & Guskarnali. (2020). Pendekatan Semivariogram Anisotropik dalam Metode *Ordinary kriging* (OK) Terhadap Pola Penyebaran Mineral Ikutan Timah. *PROMINE*. Vol. 8. Hal. 34 – 39.
- Amri, N. A., Jemain, A. A., & Fudholi, A. (2017). Consistency of The Semivariogram Fitting Error on *Ordinary kriging* Prediction. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. Vol. 12. No. 4. Hal. 990 – 995.
- Anggara, B., Marwanza, I., & Azizi, M. A. (2021). Penentuan Model Variogram Berdasarkan Root Mean Square Error di PT. X Sulawesi Utara. *Indonesian Mining and Energy Journal*. Vol. 4. Hal. 11 – 21.
- Armstrong, M. (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Springer. Verlag Berlin Heidelberg New York.
- Arsah, I. F., Idrus, A., Handini, E., Ilmawan, I., Faruqi, M. D., & Sukadana, I. G. (2023). Geology and mineralogy of the Cihaur Pb-Zn Skarn in Sukabumi Regency, West Java, Indonesia : A Preliminary Study. *AIP Conference Proceedings*. Hal 1 – 9.
- Asy'ari, M.A., Hidayatullah, R., & Zulfadli, A. (2013). Geologi dan Estimasi Sumberdaya Nikel Laterit Menggunakan Metode *Ordinary kriging* Di PT. AnekaTambang, Tbk. *Jurnal Intekna, Tahun XIII*. No. 1. Hal. 7-15.
- Bargawa, W.S. (1999). Aplikasi Kriging Indikator Dalam Permodelan Urat Bijih Emas Cikidang Jawa Barat. *Tesis Magister, Program Studi Rekayasa Pertambangan, Program Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung*. Bandung.
- Bargawa, W.S. (2018). Geostatistik Edisi Ketiga. *Prodi Teknik Pertambangan, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*. Yogyakarta
- Bargawa, W.S., & Tobing, R. (2019). Analisis Spasial Untuk Penaksiran Sumberdaya Bijih Besi di Site Merangin. *Tesis Magister, Program Studi Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*. Yogyakarta.
- Bargawa, W.S. (A) (2020). Analisis Pengaruh Perubahan Model Variogram dan Arah Anisotropi Terhadap Metode Geostatistik Teknik Point Kriging. *Jurnal Teknologi Pertambangan*. ISSN 2442-4234.
- Bargawa, W.S. (B) (2020). Simulasi Perubahan Model Variogram Untuk Estimasi Memakai Teknik Block Kriging. *Jurnal Teknologi Pertambangan*. Vol. 6 No. 1. Hal. 1 – 6.
- Edward, R., & Atkinson, K. (1986). *Ore Deposit Geology and Its Influence on Mineral Exploration*. Chapman and Hall Ltd. USA.

- Emery, X., & Seguret, S. A. (2021). *Geostatistics For The Mining Industry : Applications to Porphyry Copper Deposits. CRC Press Taylor & Francis Group*. London.
- Evans, A. M., (1993). *Ore Geology and Industrial Minerals an Indroduction. Blackwell Science Ltd*. UK.
- Fikri, H., Heriawan, N.M., Alamsyah, I.M., & Rachmaputri, G. (2016). Analisis Daerah Pengaruh Berpola Anisotropi Ellipsoid Terhadap Hasil Estimasi Sumberdaya Batubara Dengan Pendekatan Geostatistik. *TPT XXV PERHAPI*. Hal. 1 – 10.
- Gingga, F. (2019). Analisis Penaksiran Sumberdaya Bauksit Menggunakan Metode Geostatistik di Kabupaten Ketapang Provinsi Kalimantan Barat. *Tesis Magister, Program Studi Magister Teknik Pertambangan Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*. Yogyakarta.
- Heriawan, M. N., & Syafrizal. (2011). On-Site Training on Introduction to Geostatistics and Spatial Characterization. *LAPI ITB*. Tembaga Pura.
- Hidayat, M.K., Isniarno, N. F., & Zaenal. (2022). Pemodelan dan Estimasi Sumberdaya Bijih Emas di PT. DEF Kecamatan Simpenan Kabupaten Sukabumi Provinsi Jawa Barat. *Bandung Conference Series : Mining Engineering*. Hal. 112 – 131.
- Hidayati, T., Handayani, I., & Ikasari, I.H. (2019). Statistika Dasar Panduan Bagi Dosen dan Mahasiswa. *Pena Persada*. Purwokerto.
- Hustrulid, W., & Kuchta, M. (1995). *Open Pit Mine Planning & Design Volume 1 Fundamentals 3<sup>rd</sup> Edition. CRC Press Taylor & Francis Group*.
- Isaaks, E.H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied Geostatistics. Oxford University Press*. New York.
- Journel, A. G. (1983). Nonparametric estimation of spatial distributions. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*. 15(3). Hal. 445- 468.
- Journel, A.G. (1989). *Mining Geostatistics. Academic Press Harcourt Brace Jovanovich, Publishers*. London.
- Komite Cadangan Mineral Indonesia. (2017). *Kode Pelaporan Hasil Sumberdaya Mineral dan Cadangan Mineral*.
- Laksana, B. A. D., Idrus, A., Husein, S., Faruqi, M. D., & Sukadana, I. G. (2023). Geology and Ore Characteristics of Low Sulfidation Epithermal Gold Prospect in Cihaur Region, Simpenan, Sukabumi, West Java, Indonesia. *AIP Conference Proceedigs*. Hal. 1-13.
- Marwanza, I. (2023). Pendekatan Geologi dan Geostatistik dalam Klasifikasi dan Estimasi Endapan Batubara. *Diva Pustaka*. Purbalingga, Jawa Tengah.
- Misra, K. C. (2000). *Understanding Mineral Deposit. Springer-Science+Business Media, B.V. USA*.
- Meinert, L.D. (1983). Variability of skarn deposit-guides to exploration. In Boardman S.J., ed., *Revolution in the Earth Sciencies*. Dubuque, Iowa, Kendall-Hunt. Hal. 301-316.

- Meinert, L.D. (1992). Skarn and Skarn Deposit. *Geoscience Canada*. Vol. 19 No. 4. Hal. 145-162.
- Nugraha, A. P., Irwan, A. G., & Nugraha, L. (2020). Perbandingan Geostatistik Metode Kriging dan Co-Kriging Menggunakan Estimasi Point Kriging. *Prosiding Nasional Rekayasa Teknologi Industri dan Informasi XV*. Hal. 177 – 181.
- Nugraha, F., Ashari, Y., & Khorniawan, W.B. (2022). Estimasi Sumberdaya Bauksit Menggunakan Metode Geostatistik di PT. XYZ Kabupaten Mempawah Prowinsi Kalimantan Barat. *KURVATEK*. Vol. 7. No. 2. Hal. 33 – 42.
- Nuryadi, Astuti, T. D., Utami, E. S., & Budantara, M. (2017). Dasar – dasar Statistik Penelitian. *Sibuku Media*. Bantul, Yogyakarta.
- Olea, R.A. (2009). A Practical Primer on Geostatistics. *U. S. Geological Survey*. Reston Virginia.
- Oliver, M.A., & Webster, R. (2014). A Tutorial Guide to Geostatistics: Computing andModelling Variograms and Kriging. *Catena*. Hal. 56-69.
- Permana, A. (2019). Analisis Pengaruh Model Variogram, Parameter Variogram dan Ukuran Blok Pada Estimasi Kadar Sumberdaya Nikel Dengan Gcostatistik. *Tesis Universitas Pembangunan Nasional "Veteran " Yogyakarta*.
- Rashad, M.Z., El-Qady, G., & Ushijima, K. (2000). Selection of Variogram Model. *Memoirs of the Faculty of Engineering Kyushu University*. Vol. 60. No. 3. Hal. 105 – 115.
- Sarkar, B.C., & Nair, A.M. (2002). A Geostatistical Modelling Approach to Gold Mineralisation at Hutti Mine, Raichur District, Karnataka. *Journal Geological Society of India*. Vol. 60. Hal. 639-648.
- SME. (2011). SME Mining Engineering Handbokk. *Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Electronic Edition Published*. United States of America.
- SNI. (2019). Pedoman Pelaporan Hasil Eksplorasi Sumberdaya dan Cadangan Mineral. *Badan Standarisasi Nasional*.
- Stoch, B., Basson, I.J., Jones, J.N.G., & Lomberg, K.G. (2022). The Influence of Vaiable Anisotropic Search Parameter on Implicitly-Modelled Volumes and Estimated Contained Metal in a Struckturally-Complex Gold Deposit. *Ore Geology Reviews* 142. Hal. 1- 18.
- Sugiyono. (2007). Statistika untuk Penelitian. *Alfabeta*. Bandung, Jawa Barat.
- Usman, F., Maria, G.M., & Herdiani, E.T. (2022). Model Semivariogram Dalam Menaksir Sebaran Kadar Ni Menggunakan Metode *Ordinary kriging*. *SPECTA Journal of Technologi*. Vol. 6 No. 1. Hal. 55 – 67.
- Wintolo, D. (2022). Pengantar Statistik dan Geostatistik. *Gadjah Mada University Press*.

Zhang, Z., Wu, C., Yang, X., Zheng, C., & Yao, J. (2015). The Trinity Pattern of Au Deposit with Porphyry, Quartz-sulfide Vein and Structurally-controlled Alteration Rocks in Ciemas, West Java, Indonesia. *Ore Geology Reviews*. Hal. 152-171.

## LAMPIRAN A

### Perhitungan Estimasi Dengan Metode *Ordinary Kriging* (Model Variogram Exponential Azimuth 135° domain *North*)

| X             | Y              | Z          | Pb     | Zn     | PbZn  | KR_Var | KR_STDER | KR_EFF | AVERAGE DISTANCE | CLOSET DISTANCE | kr_stdev | RKSD     | Klasifikasi RKSD | Klasifikasi KE |
|---------------|----------------|------------|--------|--------|-------|--------|----------|--------|------------------|-----------------|----------|----------|------------------|----------------|
| 674555.671610 | 9210963.106598 | 676.512583 | 4.5190 | 6.9628 | 11.48 | 0.292  | 0.540    | 0.142  | 56.592           | 12.803          | 0.540204 | 0.088936 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210963.106598 | 677.512583 | 4.5032 | 7.0049 | 11.51 | 0.292  | 0.540    | 0.141  | 56.425           | 12.506          | 0.540434 | 0.088742 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210955.606598 | 678.512583 | 5.0102 | 7.6935 | 12.7  | 0.309  | 0.556    | 0.090  | 58.493           | 7.336           | 0.556095 | 0.082757 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210948.106598 | 679.512583 | 4.8373 | 7.2977 | 12.14 | 0.340  | 0.583    | 0.001  | 58.854           | 8.108           | 0.582827 | 0.090737 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210955.606598 | 679.512583 | 4.9973 | 7.6224 | 12.62 | 0.308  | 0.555    | 0.095  | 57.054           | 6.808           | 0.554771 | 0.083084 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210955.606598 | 676.512583 | 4.7818 | 7.4921 | 12.27 | 0.313  | 0.559    | 0.080  | 61.321           | 8.647           | 0.559321 | 0.086155 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210955.606598 | 677.512583 | 4.8950 | 7.5981 | 12.49 | 0.311  | 0.557    | 0.087  | 60.018           | 7.956           | 0.557249 | 0.084324 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210955.606598 | 675.512583 | 4.7341 | 7.3691 | 12.1  | 0.316  | 0.562    | 0.071  | 61.749           | 9.394           | 0.562101 | 0.087799 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210963.106598 | 674.512583 | 4.5598 | 6.9289 | 11.49 | 0.293  | 0.541    | 0.139  | 57.751           | 12.768          | 0.540964 | 0.088984 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210970.606598 | 674.512583 | 4.1775 | 6.4157 | 10.59 | 0.234  | 0.484    | 0.312  | 52.860           | 6.226           | 0.483569 | 0.086303 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210963.106598 | 675.512583 | 4.5668 | 6.9476 | 11.51 | 0.292  | 0.540    | 0.142  | 57.811           | 12.766          | 0.540023 | 0.088675 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210970.606598 | 675.512583 | 4.1825 | 6.4153 | 10.6  | 0.235  | 0.485    | 0.308  | 52.944           | 6.222           | 0.485182 | 0.086509 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210978.106598 | 674.512583 | 4.1618 | 6.4511 | 10.61 | 0.217  | 0.466    | 0.361  | 51.376           | 5.197           | 0.466143 | 0.083036 | MEASURED         | INDICATED      |
| 674555.671610 | 9210978.106598 | 672.512583 | 4.1630 | 6.5610 | 10.72 | 0.220  | 0.469    | 0.354  | 53.220           | 5.197           | 0.468783 | 0.082649 | MEASURED         | INDICATED      |
| 674555.671610 | 9210985.606598 | 672.512583 | 4.4957 | 6.4924 | 10.99 | 0.275  | 0.525    | 0.190  | 53.116           | 11.303          | 0.524867 | 0.090264 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9210978.106598 | 673.512583 | 4.1463 | 6.5392 | 10.69 | 0.217  | 0.466    | 0.361  | 52.049           | 5.219           | 0.466102 | 0.082407 | MEASURED         | INDICATED      |
| 674555.671610 | 9210985.606598 | 673.512583 | 4.4303 | 6.5093 | 10.94 | 0.275  | 0.525    | 0.191  | 51.487           | 11.313          | 0.52451  | 0.090615 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9211008.106598 | 672.512583 | 5.0026 | 6.4585 | 11.46 | 0.269  | 0.519    | 0.208  | 50.385           | 8.147           | 0.518768 | 0.085556 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9211015.606598 | 672.512583 | 5.0373 | 6.2035 | 11.24 | 0.240  | 0.490    | 0.295  | 50.281           | 11.074          | 0.489537 | 0.082315 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9211008.106598 | 673.512583 | 4.9793 | 6.4243 | 11.4  | 0.271  | 0.521    | 0.202  | 48.849           | 8.414           | 0.520789 | 0.086341 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674555.671610 | 9211015.606598 | 673.512583 | 5.0679 | 6.1901 | 11.26 | 0.241  | 0.491    | 0.292  | 49.916           | 11.079          | 0.490652 | 0.082356 | MEASURED         | INFERRED       |

#### Keterangan :

**KR\_VAR** : Nilai Kriging Varians   **KR\_EFF** : Nilai Kriging Efisiensi   **AV\_DIST** : Nilai Average Distance   **KR\_STDV** : Nilai Kriging Standar Deviasi

**KR\_STDERR** : Nilai Kriging Standard Error   **Slope** : Nilai Slope of Regression   **CLOS\_DIST** : Besar Jarak Terdekat dari Titik Pengamatan   **RKSD** : Nilai Relative Kriging Standard Deviation

## LAMPIRAN B

### Perhitungan Estimasi Dengan Metode *Ordinary Kriging* (Model Variogram Exponential Azimuth 0° domain *South*)

| X             | Y              | Z          | Pb     | Zn     | PbZn  | KR_Var | KR_STDERR | KR_EFF | SLOPE | AVERAGE DISTANCE | CLOSET DISTANCE | kr_stdev | RKSD    | Klasifikasi RKSD | Klasifikasi KE |
|---------------|----------------|------------|--------|--------|-------|--------|-----------|--------|-------|------------------|-----------------|----------|---------|------------------|----------------|
| 674600.671610 | 9210778.329395 | 664.616092 | 3.4472 | 6.6989 | 10.15 | 0.512  | 0.716     | 0.297  | 0.803 | 24.747           | 13.342          | 0.71572  | 0.13327 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674608.171610 | 9210778.329395 | 664.616092 | 4.4424 | 6.1638 | 10.61 | 0.527  | 0.726     | 0.277  | 0.790 | 29.394           | 12.788          | 0.72617  | 0.12935 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674600.671610 | 9210778.329395 | 665.616092 | 3.4716 | 6.6975 | 10.17 | 0.501  | 0.708     | 0.313  | 0.815 | 24.414           | 13.015          | 0.70761  | 0.1315  | MEASURED         | INFERRED       |
| 674608.171610 | 9210778.329395 | 665.616092 | 4.5143 | 6.1331 | 10.65 | 0.514  | 0.717     | 0.295  | 0.804 | 29.161           | 12.096          | 0.71697  | 0.12724 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674593.171610 | 9210778.329395 | 665.616092 | 2.3734 | 7.6247 | 10    | 0.376  | 0.613     | 0.484  | 0.893 | 27.481           | 6.246           | 0.61305  | 0.11587 | MEASURED         | INDICATED      |
| 674615.671610 | 9210778.329395 | 664.616092 | 5.1028 | 5.6628 | 10.77 | 0.497  | 0.705     | 0.319  | 0.807 | 32.958           | 9.234           | 0.70484  | 0.12369 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674623.171610 | 9210778.329395 | 664.616092 | 4.9849 | 5.4267 | 10.41 | 0.539  | 0.734     | 0.261  | 0.779 | 39.021           | 10.931          | 0.73416  | 0.13329 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674615.671610 | 9210778.329395 | 665.616092 | 5.2341 | 5.6108 | 10.84 | 0.472  | 0.687     | 0.352  | 0.837 | 34.462           | 8.248           | 0.68724  | 0.11982 | MEASURED         | INDICATED      |
| 674623.171610 | 9210778.329395 | 665.616092 | 5.1049 | 5.4135 | 10.52 | 0.524  | 0.724     | 0.281  | 0.790 | 40.479           | 10.112          | 0.72413  | 0.1301  | MEASURED         | INFERRED       |
| 674623.171610 | 9210778.329395 | 662.616092 | 4.8703 | 5.6560 | 10.53 | 0.570  | 0.755     | 0.218  | 0.743 | 36.378           | 12.647          | 0.7549   | 0.1355  | MEASURED         | INFERRED       |
| 674615.671610 | 9210778.329395 | 663.616092 | 5.0154 | 5.7939 | 10.81 | 0.517  | 0.719     | 0.290  | 0.791 | 33.542           | 10.222          | 0.71932  | 0.12576 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674623.171610 | 9210778.329395 | 663.616092 | 4.9182 | 5.6173 | 10.54 | 0.554  | 0.744     | 0.240  | 0.763 | 37.543           | 11.778          | 0.74443  | 0.13349 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674623.171610 | 9210778.329395 | 661.616092 | 4.8077 | 5.6803 | 10.49 | 0.589  | 0.768     | 0.192  | 0.704 | 32.630           | 13.534          | 0.76754  | 0.13829 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674533.171610 | 9210838.329395 | 682.616092 | 4.8865 | 6.6727 | 11.56 | 0.581  | 0.762     | 0.203  | 0.752 | 29.775           | 20.701          | 0.76222  | 0.12462 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210845.829395 | 682.616092 | 5.3301 | 7.6114 | 12.94 | 0.536  | 0.732     | 0.265  | 0.811 | 29.744           | 17.018          | 0.73187  | 0.1069  | MEASURED         | INFERRED       |
| 674533.171610 | 9210845.829395 | 682.616092 | 5.5040 | 5.1167 | 10.62 | 0.651  | 0.807     | 0.107  | 0.634 | 32.031           | 24.006          | 0.80674  | 0.14357 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674533.171610 | 9210838.329395 | 683.616092 | 5.0280 | 4.9734 | 10    | 0.617  | 0.786     | 0.153  | 0.689 | 30.154           | 21.296          | 0.78576  | 0.14851 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210845.829395 | 683.616092 | 5.5825 | 5.8422 | 11.42 | 0.596  | 0.772     | 0.182  | 0.718 | 30.675           | 18.696          | 0.7723   | 0.12782 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674533.171610 | 9210845.829395 | 683.616092 | 5.4452 | 4.9855 | 10.43 | 0.654  | 0.808     | 0.104  | 0.629 | 31.897           | 24.011          | 0.8084   | 0.14649 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210853.329395 | 682.616092 | 5.9035 | 7.3778 | 13.28 | 0.513  | 0.717     | 0.296  | 0.809 | 31.136           | 13.537          | 0.71654  | 0.10198 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210860.829395 | 682.616092 | 6.1057 | 6.3936 | 12.5  | 0.509  | 0.714     | 0.302  | 0.747 | 23.298           | 11.389          | 0.71355  | 0.10789 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210853.329395 | 683.616092 | 5.9948 | 5.9455 | 11.94 | 0.540  | 0.735     | 0.259  | 0.766 | 32.265           | 13.546          | 0.73494  | 0.11633 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674525.671610 | 9210860.829395 | 683.616092 | 5.9864 | 6.5328 | 12.52 | 0.513  | 0.717     | 0.296  | 0.754 | 25.863           | 11.399          | 0.71653  | 0.10817 | MEASURED         | INFERRED       |
| 674533.171610 | 9210838.329395 | 684.616092 | 5.3377 | 4.6185 | 9.96  | 0.621  | 0.788     | 0.148  | 0.681 | 30.167           | 21.296          | 0.788    | 0.14953 | MEASURED         | INFERRED       |

#### Keterangan :

**KR\_VAR** : Nilai Kriging Varians   **KR\_EFF** : Nilai Kriging Efisiensi   **AV\_DIST** : Nilai Average Distance   **KR\_STDV** : Nilai Kriging Standar Deviasi

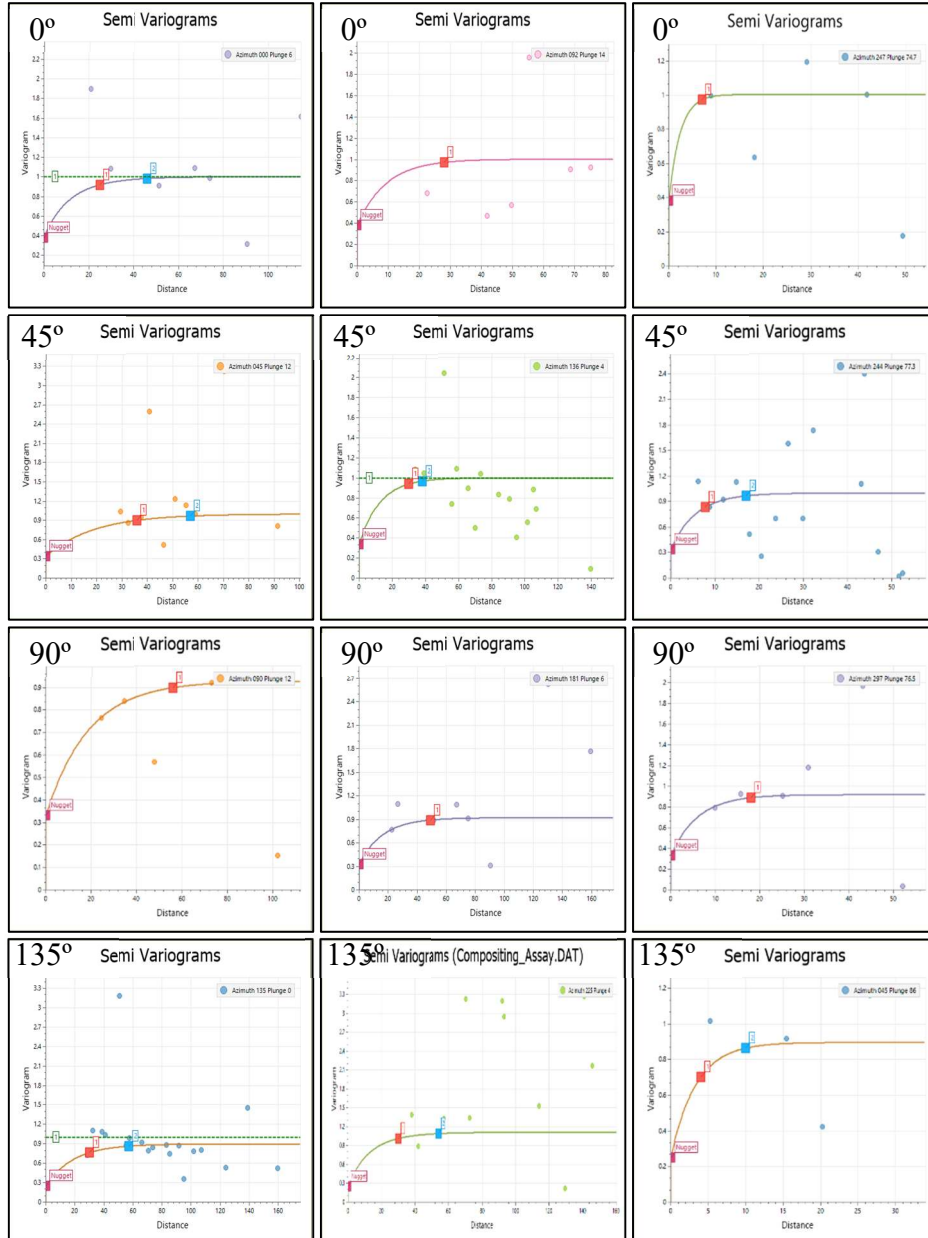
**KR\_STDERR** : Nilai Kriging Standard Error   **Slope** : Nilai Slope of Regression   **CLOS\_DIST** : Besar Jarak Terdekat dari Titik Pengamatan   **RKSD** : Nilai Relative Kriging Standard Deviation

## LAMPIRAN C

Mayor

Semi-mayor

Minor



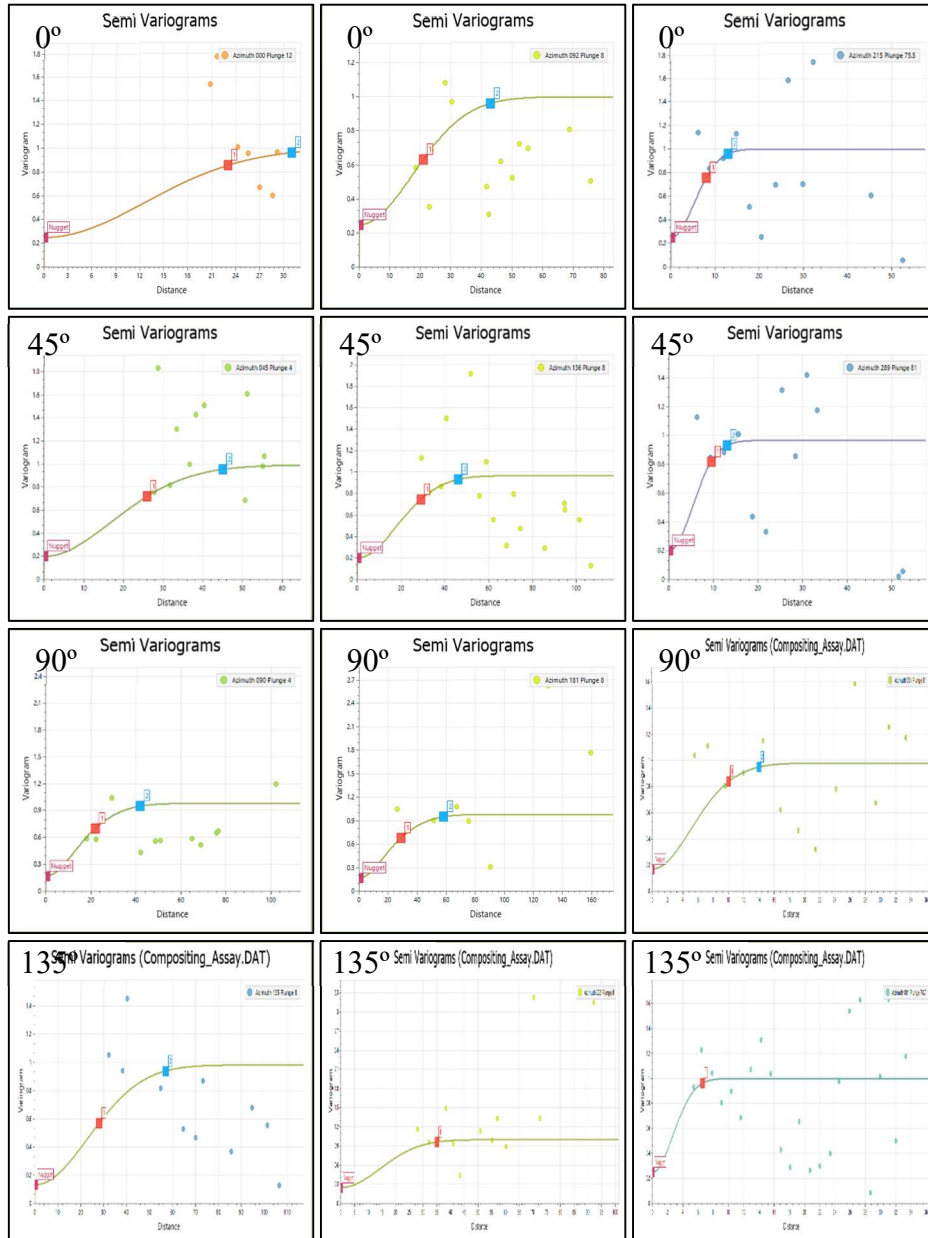
*Fitting Variogram Model Exponential Arah 0°, 45°, 90°, 135° Domain North*

## LAMPIRAN D

Mayor

Semi-mayor

Minor



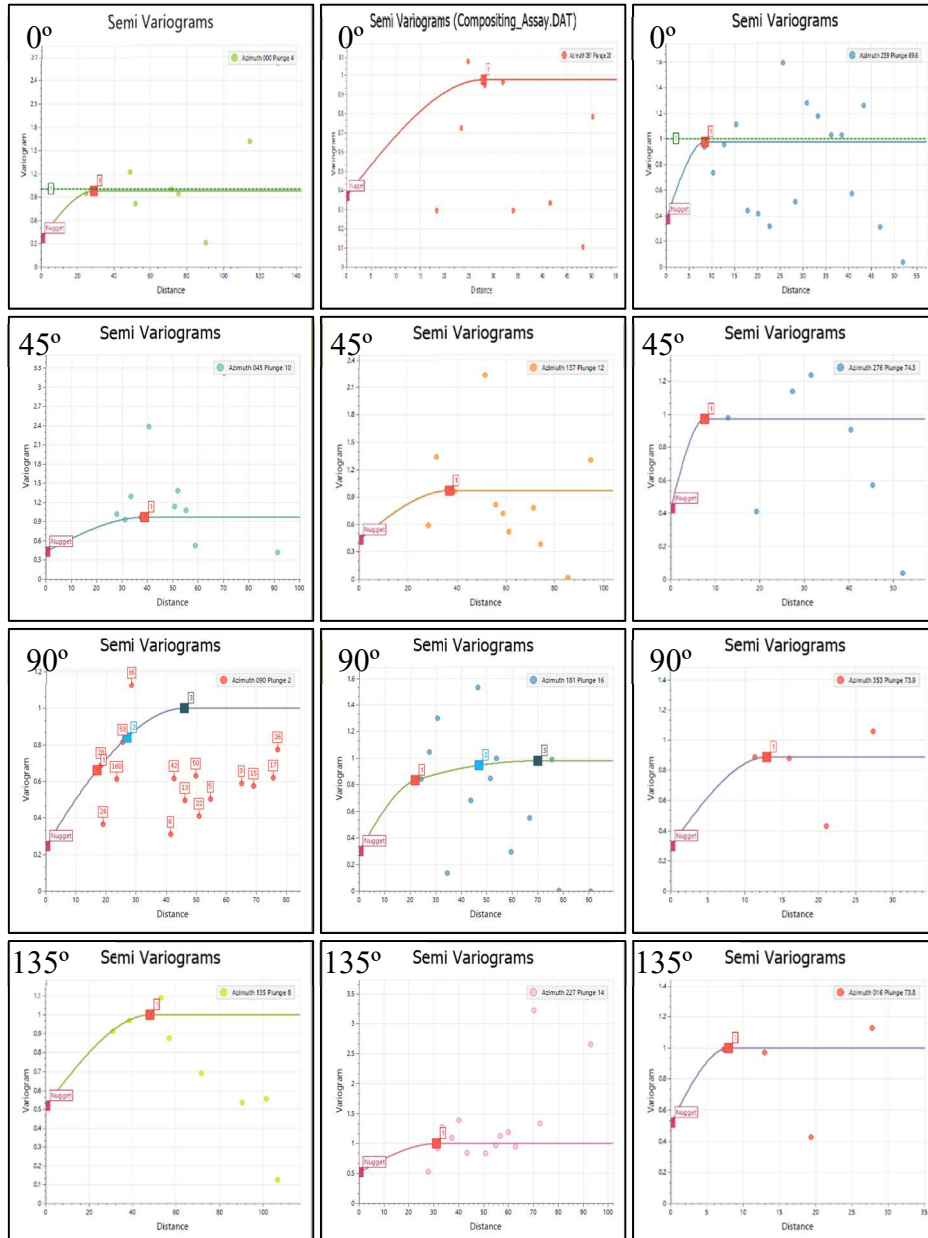
*Fitting Variogram Model Gaussian Arah 0°, 45 °, 90 °, 135 ° Domain North*

## LAMPIRAN E

Mayor

Semi-mayor

Minor



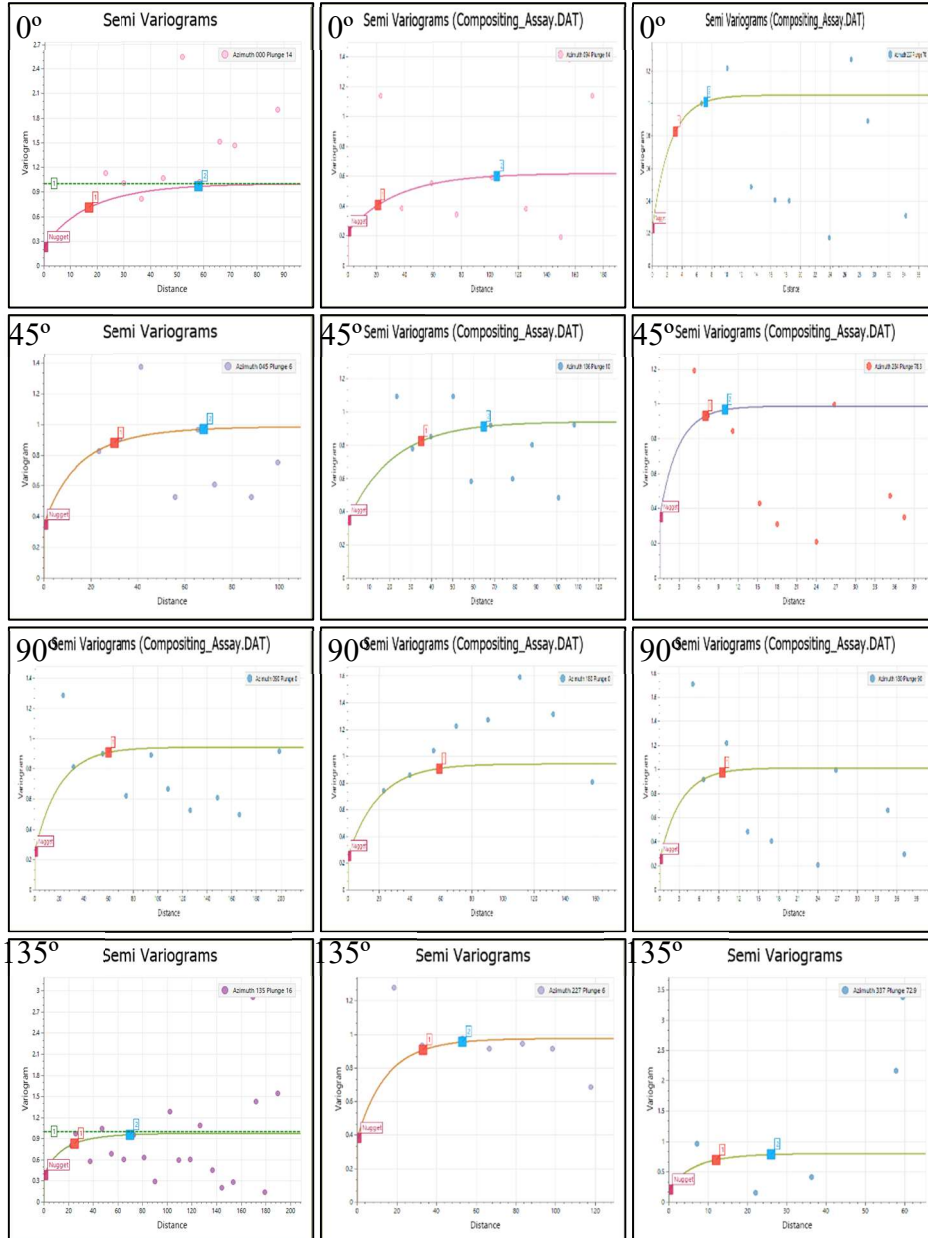
*Fitting Variogram Model Spherical Arah 0°, 45 °, 90 °, 135 ° Domain North*

## LAMPIRAN F

Mayor

Semi-mayor

Minor



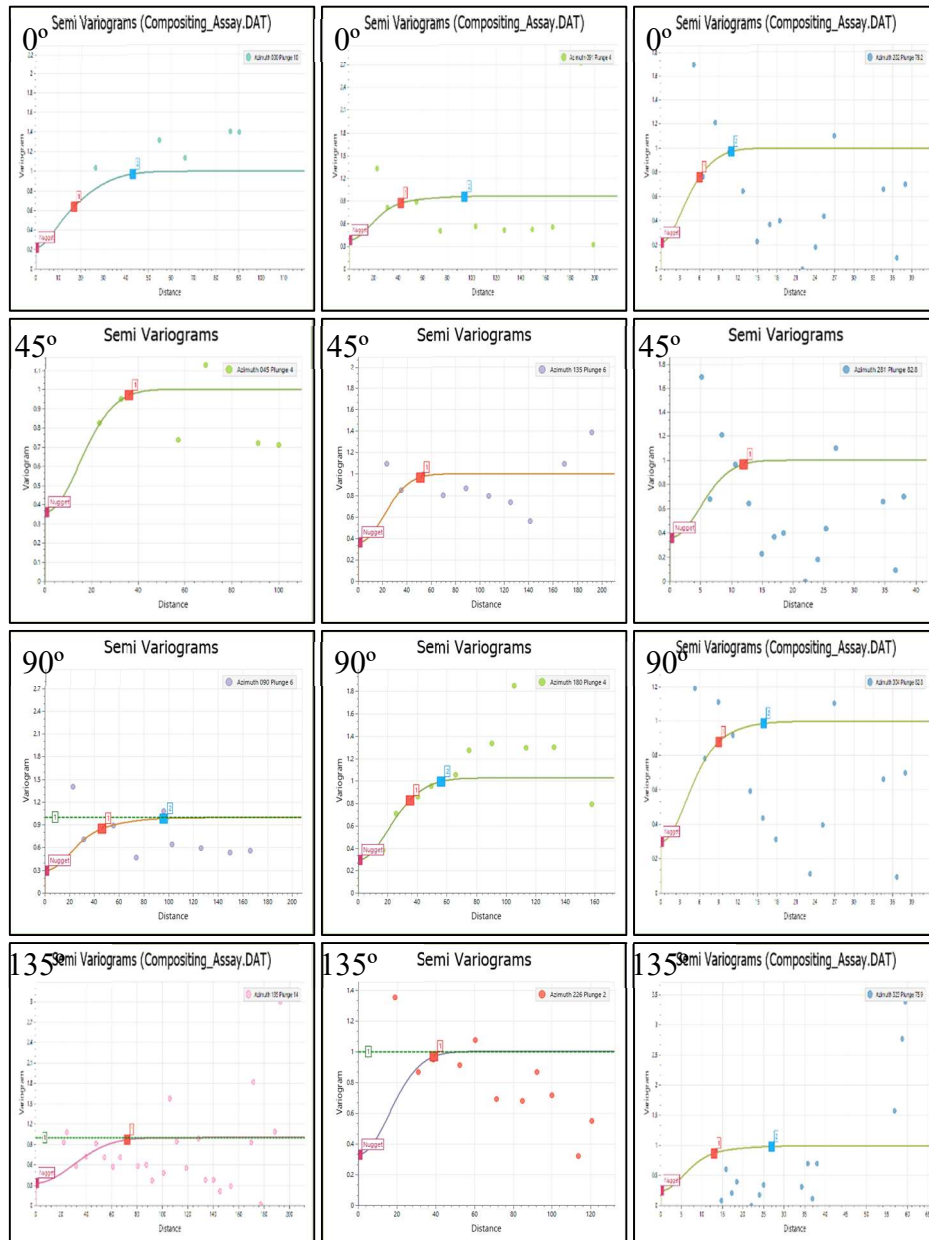
*Fitting Variogram Model Exponential Arah 0°, 45°, 90°, 135° Domain South*

## LAMPIRAN G

Mayor

Semi-mayor

Minor



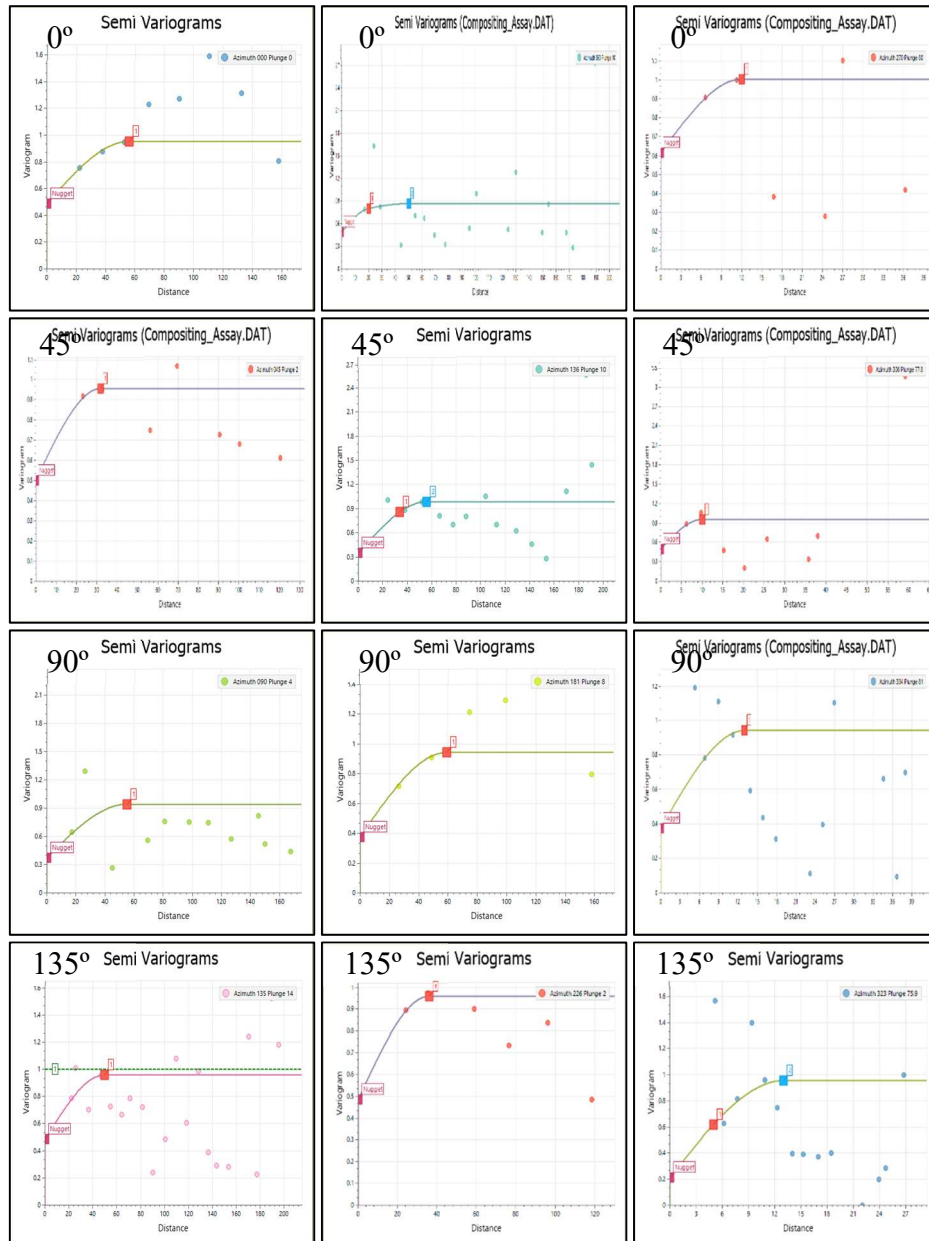
*Fitting Variogram Model Gaussian Arah 0°, 45 °, 90 °, 135 ° Domain South*

## LAMPIRAN H

Mayor

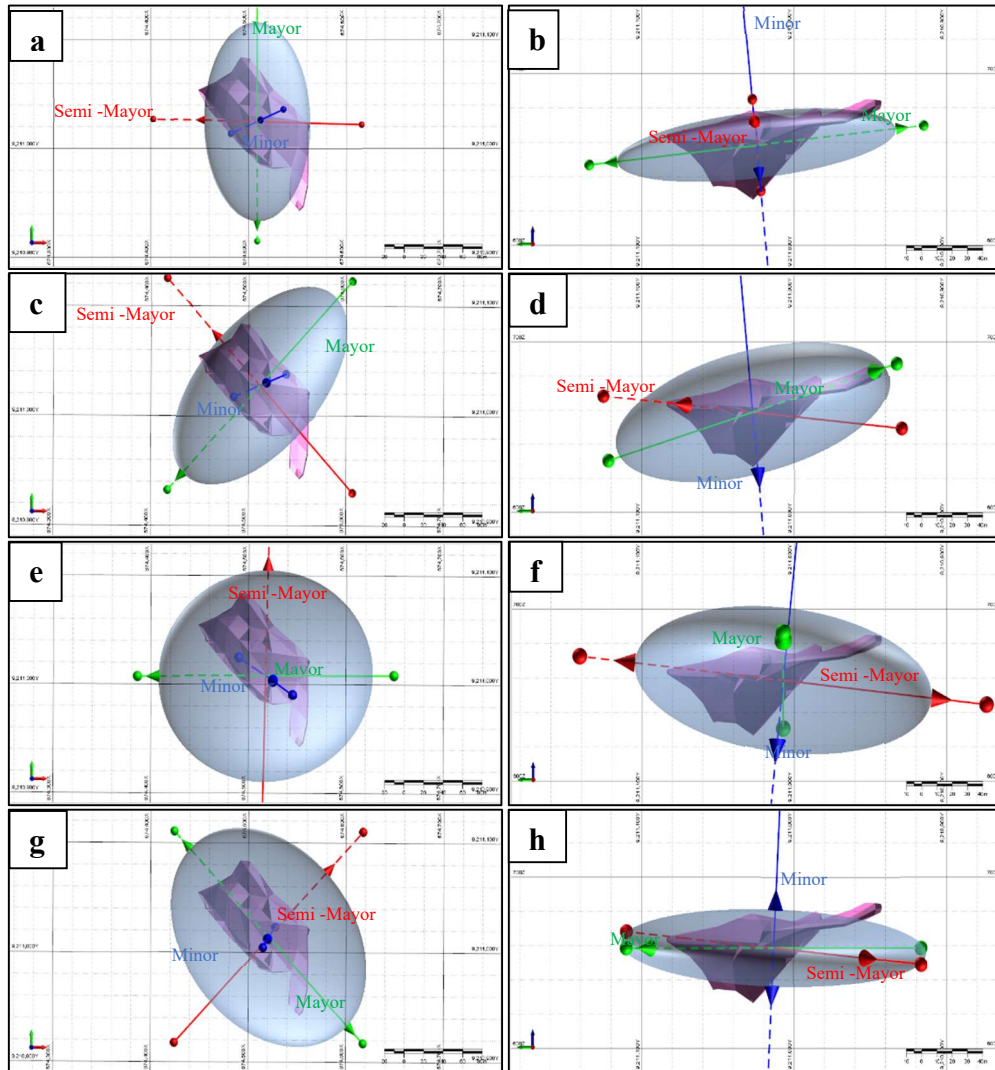
Semi-mayor

Minor



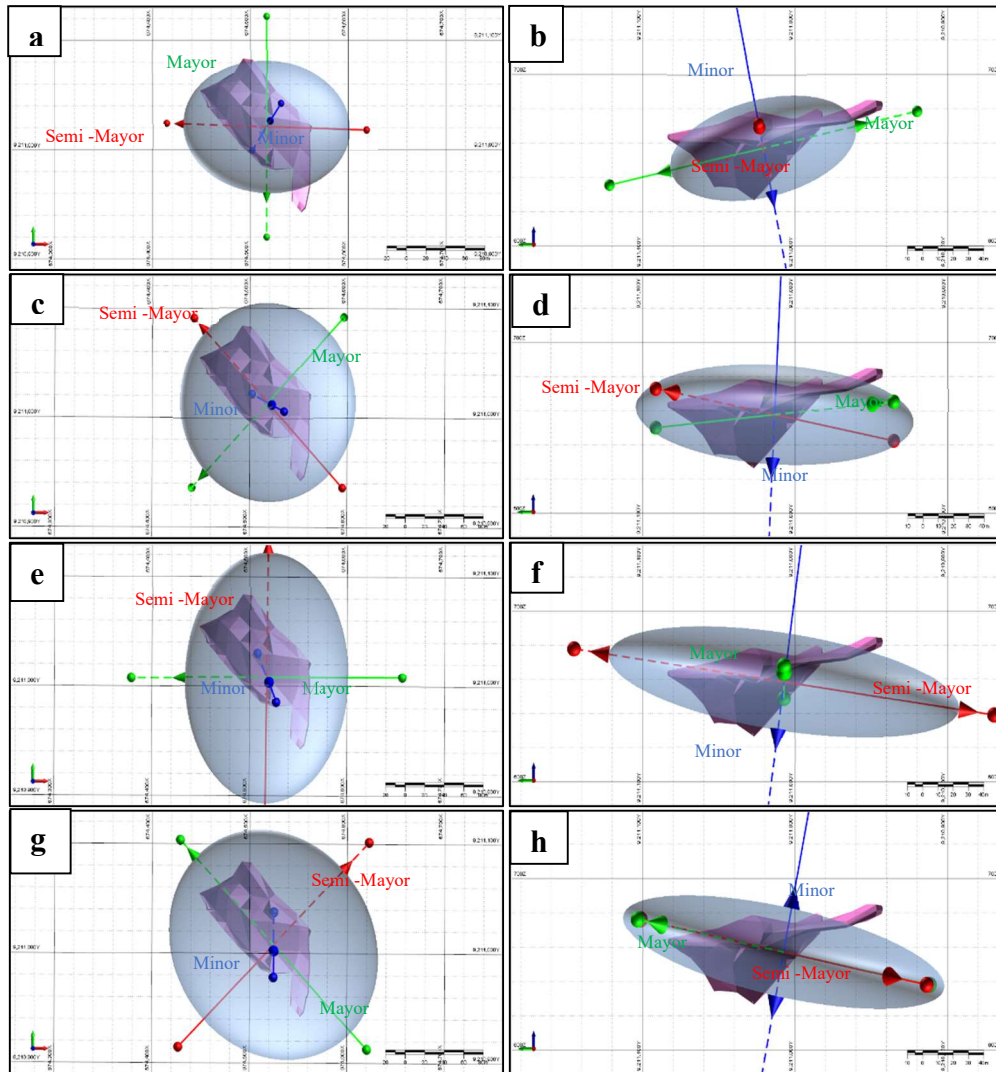
*Fitting Variogram Model Spherical Arah 0°, 45°, 90°, 135° Domain South*

## LAMPIRAN I



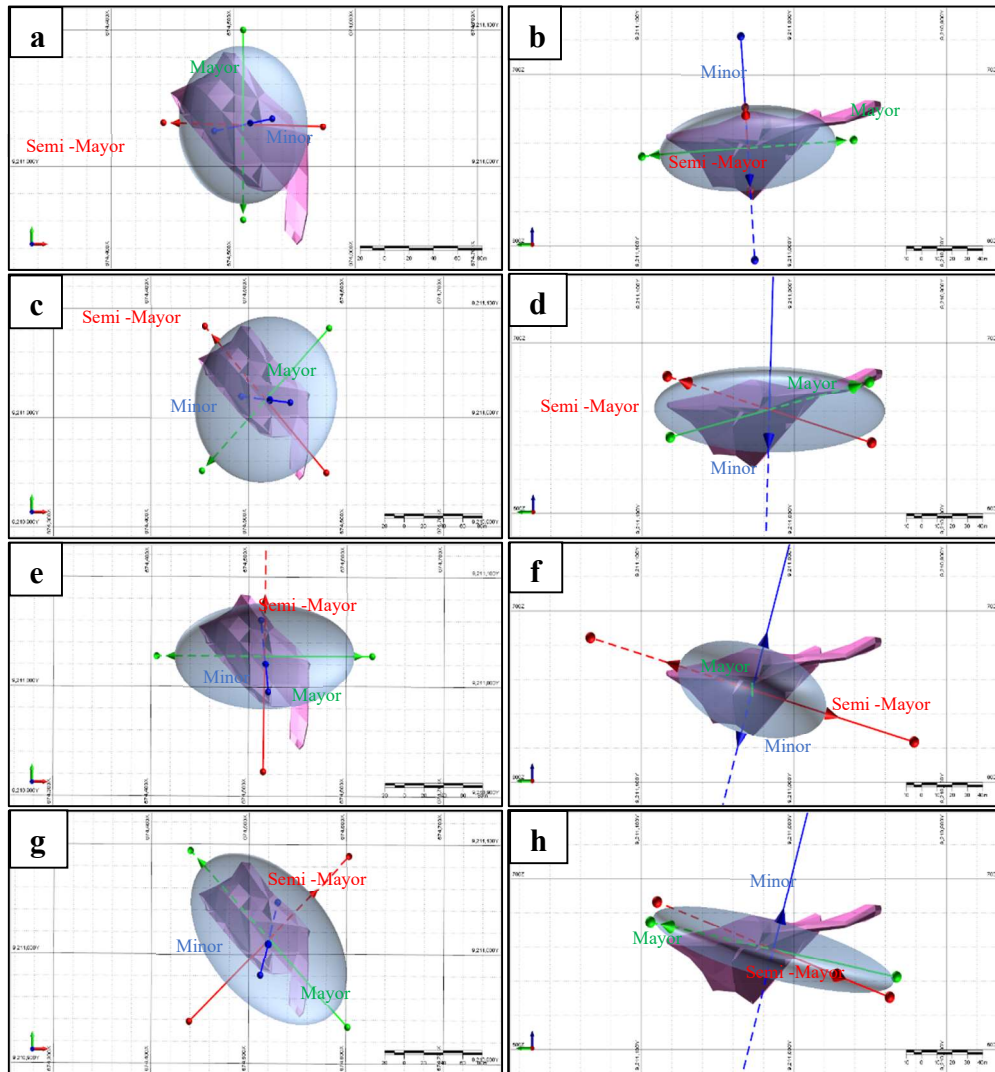
Elipsoid model variogram exponential domain north (a) arah N-S plan view (b) arah N-S 3D view (c) arah NE-SW plan view (d) arah NE-SW 3D view (e) arah E-W plan view (f) arah E-W 3Dview (g) arah SE-NW plan view (h) arah SE-NW 3D view

## LAMPIRAN J



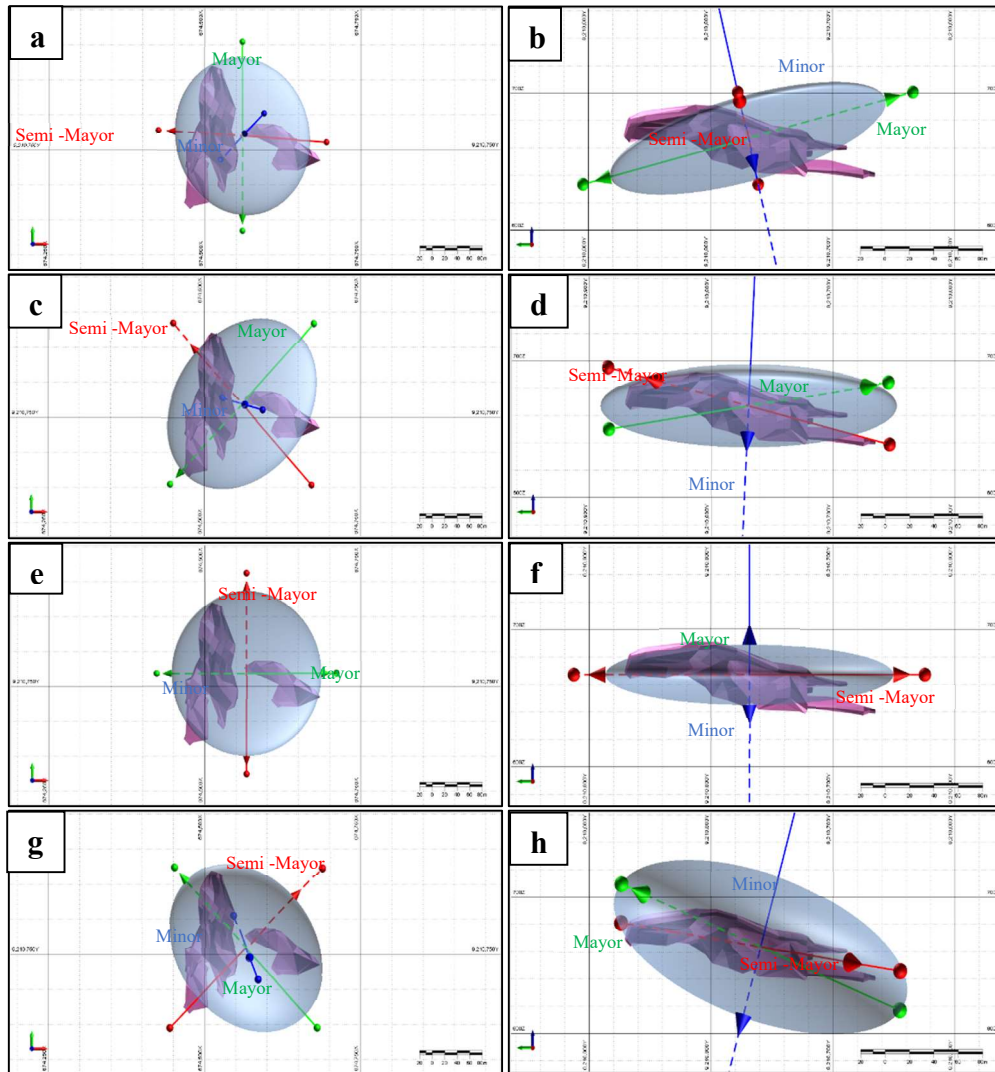
Elipsoid model variogram gaussian *domain north* (a) arah *N-S* plan view (b) arah *N-S* 3D view (c) arah *NE-SW* plan view (d) arah *NE-SW* 3D view (e) arah *E-W* plan view (f) arah *E-W* 3D view (g) arah *SE-NW* plan view (h) arah *SE-NW* 3D view

## LAMPIRAN K



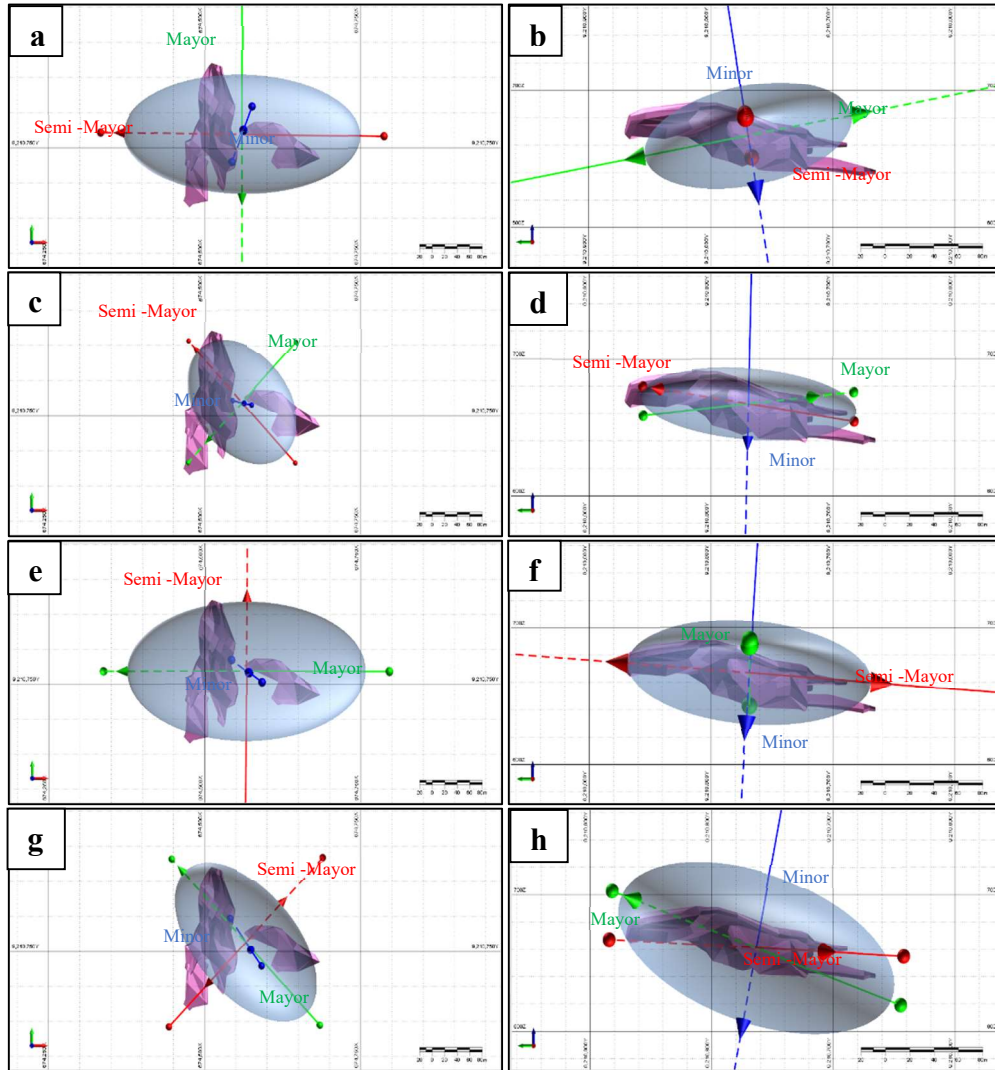
*Elipsoid model variogram spherical domain north (a) arah N-S plan view (b) arah N-S 3D view (c) arah NE-SW plan view (d) arah NE-SW 3D view (e) arah E-W plan view (f) arah E-W 3Dview (g) arah SE-NW plan view (h) arah SE-NW 3D view*

## LAMPIRAN L



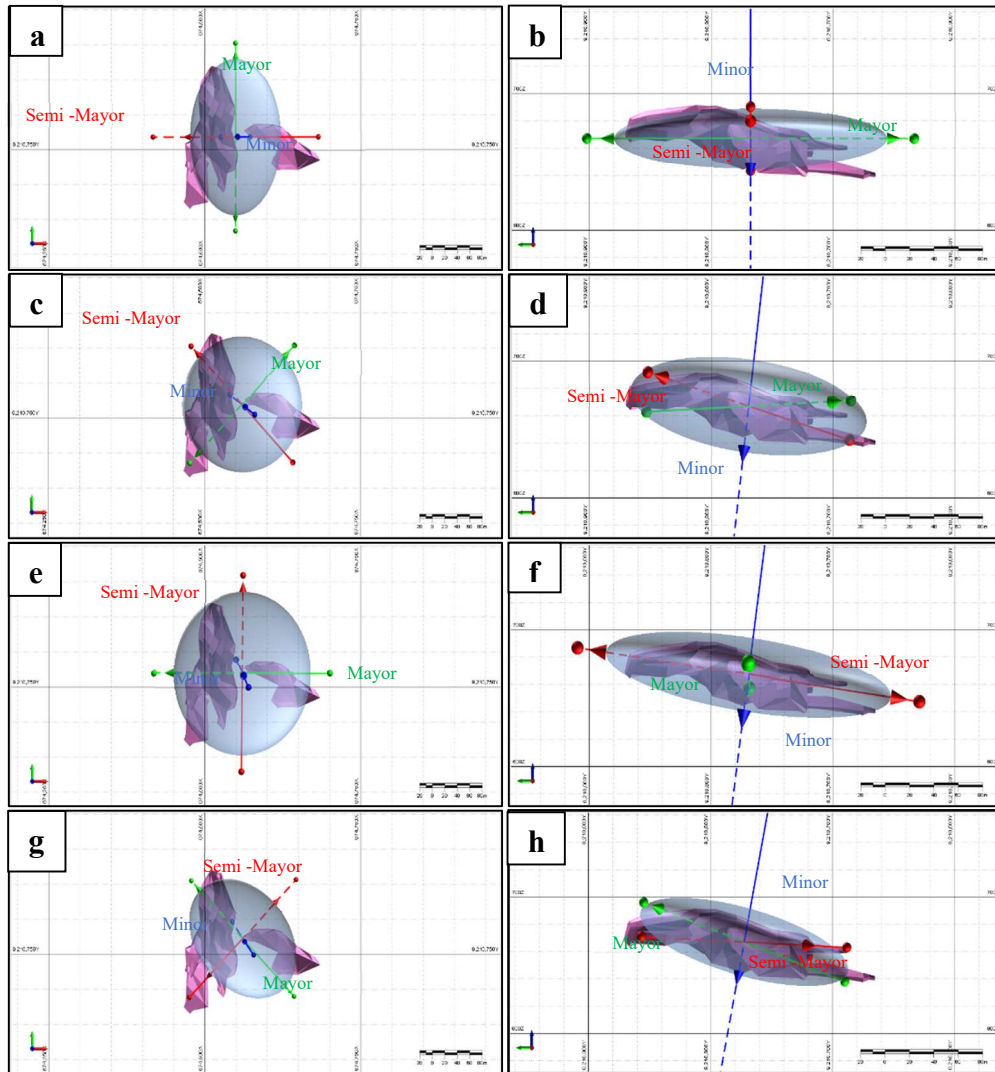
*Elipsoid model variogram exponential domain south (a) arah N-S plan view (b) arah N-S 3D view (c) arah NE-SW plan view (d) arah NE-SW 3D view (e) arah E-W plan view (f) arah E-W 3D view (g) arah SE-NW plan view (h) arah SE-NW 3D view*

## LAMPIRAN M



*Elipsoid model variogram gaussian domain south (a) arah N-S plan view (b) arah N-S 3D view (c) arah NE-SW plan view (d) arah NE-SW 3D view (e) arah E-W plan view (f) arah E-W 3D view (g) arah SE-NW plan view (h) arah SE-NW 3D view*

## LAMPIRAN N



*Elipsoid model variogram spherical domain south (a) arah N-S plan view (b) arah N-S 3D view (c) arah NE-SW plan view (d) arah NE-SW 3D view (e) arah E-W plan view (f) arah E-W 3D view (g) arah SE-NW plan view (h) arah SE-NW 3D view*