

PENERAPAN METODE ORDINARY KRIGING UNTUK ESTIMASI SUMBERDAYA TIMBAL (Pb) PADA BLOK GOSSAN

APPLICATION OF ORDINARY KRIGING METHOD FOR ESTIMATION OF LEAD (Pb) RESOURCES IN GOSSAN BLOCK

Tommy Suwandi^{1*}, Nurkhamim², Aldin Ardian³, Achmad Romadhona⁴

Mining Engineering Master's Program, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta Jl. SWK
104 Condong Catur, Yogyakarta 55283, Yogyakarta, Indonesia
Email corresponding: 212221010@sudent.upnyk.ac.id

Cara Sitasi: T. Suwandi, Nurkhamim, A. Ardian, and A. Romadhona, "Penerapan Metode Ordinary Kriging untuk Estimasi Sumberdaya Timbal (Pb) pada Blok Gossan", *Kurvatek*, vol. 10, no. 1, pp. 81-90, April 2025. doi: [10.33579/krvtk.v10i1.5718](https://doi.org/10.33579/krvtk.v10i1.5718) [Online].

Abstrak — Pada daerah penelitian merupakan litologi yang kompleks (batuan vulkanik, sedimen, alterasi hidrotermal menyulitkan korelasi lapisan. Sebaran kadar timbal tidak homogen digunakan penerapan *ordinary kriging* untuk estimasi timbal dengan litologi kompleks dan alterasi hidrotermal. Berdasarkan metode *ordinary kriging*, sumberdaya timbal (Pb) diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu *measured* (volume 2.012.325 m³, tonase 15.092.439 ton, kadar Pb 3,7%), *indicated* (volume 1.555.856,25 m³, tonase 11.668.921 ton, kadar galena 3,9%), dan *inferred* (volume 7.309,25 m³, tonase 54.819 ton, kadar Pb 4%). Hasil perhitungan menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,40, koefisien korelasi (r) 0,67, dan koefisien determinasi (R²) 0,44, yang mengindikasikan akurasi model yang cukup baik dengan hubungan yang kuat antara nilai estimasi dan aktual.

Kata Kunci: Ordinary Kriging, geostatistik, variogram, galena, timbal, distribusi kadar, RMSE, koefisien korelasi (r), koefisien determinasi (R²), measured, indicated, inferred.

Abstract — Located on the Pacific Ring of Fire, Indonesia has great potential in significant geothermal energy. Kamojang, located in Samarang District, is one of the areas that show this potential. This study aims to assess the existence of geothermal potential in Kamojang through fault density analysis using the Fault Fracture Density (FFD) method. The data used are fault patterns from the National Digital Elevation Model (DEMNs) which are then analyzed to calculate the density of cracks and presented in the form of contour maps. The resulting FFD values range from -0.5 to 9.5 km/km². The results show that the alignment pattern in Kamojang is mostly northwest - southeast, which is closely related to tectonic movements and the formation of active faults in the area. Although the FFD value in this area is relatively low, the presence of active faults still provides a pathway for the movement of geothermal fluids that form geothermal manifestations such as geothermal craters. These results provide important insights to support the management and development of geothermal energy in the Kamojang area.

Keywords: Geothermal Energy, FFD, Geothermal Manifestation, Kamojang.

I. PENDAHULUAN

Estimasi sumberdaya mineral mencerminkan bentuk dan distribusi dari suatu endapan mineral sehingga dapat digunakan sebagai dasar estimasi cadangan atau kegiatan pertambangan. Salah satu metode yang sering digunakan untuk memperkirakan kadar bijih di lokasi yang tidak terukur adalah metode geostatistik, khususnya *ordinary kriging*. Metode ini memanfaatkan nilai-nilai yang diketahui pada titik tertentu untuk memperkirakan nilai di lokasi yang tidak teramati, dengan keunggulan utama pada kemampuannya untuk menghitung bobot menggunakan model variabilitas spasial yang disebut variogram. Meskipun demikian, metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti asumsi stasioneritas, aditivitas, linearitas, serta potensi subjektivitas dalam proses pemodelan variogram. [1] [2] (Elordi et al., 2024; Samson & Deutsch, 2021).

Galena, sebagai salah satu mineral dengan nilai ekonomi tinggi, banyak dijadikan fokus dalam eksplorasi mineral. Kandungan timbal menjadikannya mineral yang penting, terutama untuk industri pembuatan baterai dan pelindung radiasi. Oleh karena itu, estimasi yang tepat dan akurat terhadap

sumberdaya timbal (Pb) sangat penting untuk memastikan bahwa eksplorasi dan penambangan dapat dilakukan secara efisien dan berkelanjutan. Metode geostatistik seperti *ordinary kriging* dapat memberikan estimasi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan variabilitas spasial dari mineral ini. (Elordi et al., 2024).

Penelitian ini diaplikasikan untuk estimasi sumberdaya timbal (Pb), karena kondisi geologi endapan timbal yang rumit dan bervariasi tinggi, dan nilai CV yang diperkirakan kurang dari 0,5, penelitian ini digunakan untuk mengestimasi sumberdaya timbal (Pb). Parameter yang digunakan untuk validasi silang (*cross validation*) adalah koefisien korelasi (r), koefisien determinasi (r^2), dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Keakuratan metode konvensional kriging diperoleh dari selisih nilai kadar komposit (raw data) dengan hasil taksiran di blok model.

A. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah konsesi pertambangan PT. Kapuas Prima Coal, sebuah perusahaan pemegang Izin Usaha Pertambangan (IUP) yang bergerak di sektor pertambangan. Secara administratif, area IUP PT. KPC terletak di Provinsi Kalimantan Tengah, dengan luas wilayah mencapai 5.569 hektar. Lokasi ini secara geografis berada pada koordinat $111^{\circ}15'57''$ hingga $111^{\circ}19'22.57''$ Bujur Timur dan $01^{\circ}31'22.4''$ hingga $01^{\circ}33'00''$ Lintang Selatan. Morfologi wilayah ini berupa daratan yang disertai dengan perbukitan berlereng sedang hingga curam di bagian utara dan selatan.

Wilayah pertambangan (IUP) PT. Kapuas Prima Coal secara administratif berada di Kabupaten Lamandau, Provinsi Kalimantan Tengah, dengan jarak sekitar 90 km dari Pangkalan Bun.

Area konsesi penambangan ini berlokasi di Desa Bintang Mengalih, Kecamatan Belantikan Raya, Kabupaten Lamandau, Provinsi Kalimantan Tengah, yang berjarak sekitar 190 km dari Pangkalan Bun. Lokasi ini dapat dicapai melalui beberapa moda transportasi, yaitu:

- Menggunakan pesawat udara dari Bandara Internasional Yogyakarta menuju Bandara Iskandar di Pangkalan Bun dengan waktu tempuh sekitar ± 1 jam 10 menit.
- Dari Pangkalan Bun menuju wilayah operasional PT. Kapuas Prima Coal dapat ditempuh menggunakan kendaraan roda empat dengan jarak perjalanan sekitar 90 km.

Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi sumberdaya geologi di wilayah [lokasi studi] dengan menggunakan metode geostatistik berbasis data sekunder, termasuk data pengeboran, analisis kadar, dan model geologi regional. Data yang digunakan mencakup titik bor dengan interval [ukuran], yang mencakup data kadar galena dan karakteristik litologi.

B. Geologi Endapan Skarn Pb-Zn Blok Gossan

Endapan skarn timbal-seng (Pb-Zn) di Blok Gossan, Ruwai, Lamandau, Kalimantan Tengah, terbentuk melalui proses metasomatisme kontak antara intrusi magma dan batuan karbonat (gamping atau marmer). Endapan skarn Ruwai terbentuk dalam 3 tahap utama yaitu:

- Prograde skarn, intrusi magma yang menerobos batuan karbonat, menyebabkan reaksi kimia suhu tinggi ($500-700^{\circ}\text{C}$) mineral utama garnet, piroksen dan epidot.
- Retrograde skarn, suhu menurun ($200-300^{\circ}\text{C}$) fluida kaya S, Pb, Zn mengendapkan Galena (PbS) mineral utama timbal, Sfalerit (ZnS) mineral utama Seng, pirit (FeS_2) dan kalkopirit (CuFeS_2) sebagai mineral ikutan. Mineralisasi biasanya terkonsentrasi di zona kontak atau sepanjang struktur.

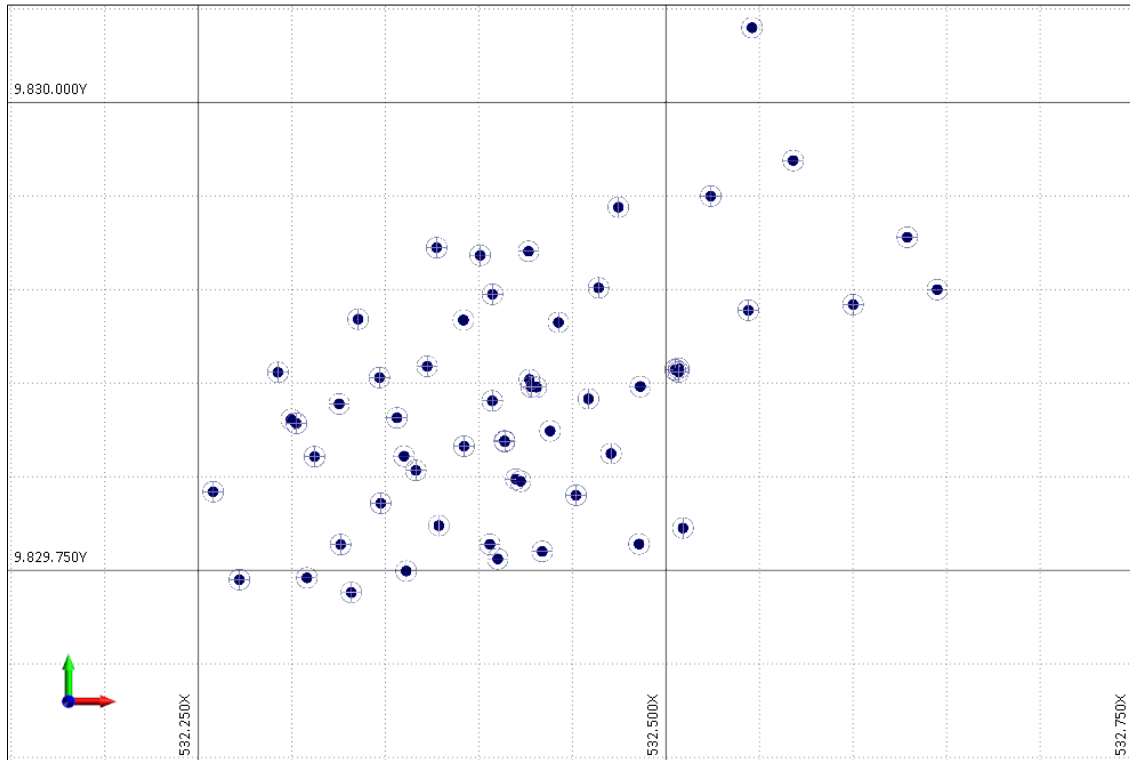
Karakteristik endapan pada blok gossan tipe skarn Zn-Pb (*exoskarn*) dominan di batuan karbonat. Mineralisasi primer yaitu galena, sfalerit dan pirit dan mineralisasi sekunder oksida besi (gossan), mineral Pb karbonat/sulfat. Kontrol mineralisasi yaitu kontak intrusi-karbonat, sesar dan shear. Endapan skarn Pb-Zn di Blok Gossan, Ruwai terbentuk oleh interaksi fluida hidrotermal dari intrusi granitik dengan batuan karbonat, menghasilkan mineralisasi galena-sfalerit di zona kontak. Gossan menandai zona teroksidasi, sementara bijih sulfida primer mungkin masih ada di kedalaman.

II. METODE PENELITIAN

Untuk membuat perkiraan jumlah mineral (estimasi sumberdaya) dalam suatu area tambang menggunakan metode statistik yaitu salah satunya *ordinary kriging*, kita perlu mengumpulkan dan mengolah beberapa jenis data terlebih dahulu. Data-data ini meliputi:

- Data lokasi pengeboran: Informasi mengenai letak persis setiap lubang bor di permukaan tanah, termasuk koordinat utara-selatan (northing), timur-barat (easting), dan ketinggian (elevasi).
- Data kadar mineral: Informasi mengenai kandungan mineral (misalnya, timbal dan seng) pada setiap kedalaman di dalam lubang bor.

- Data jenis batuan: Informasi mengenai jenis batuan yang ditemukan pada setiap kedalaman di dalam lubang bor.
- Data umum lubang bor: Informasi dasar tentang setiap lubang bor, seperti nama atau kode, koordinat titik awal pengeboran, dan kedalaman total.



Gambar 1. Sebaran titik bor daerah blok Gossan

Semua data ini kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak pertambangan seperti Micromine 2020. Perangkat lunak ini akan memproses data dan menampilkannya dalam bentuk visual, seperti peta yang menunjukkan lokasi semua lubang bor dan bentuk tubuh bijih di dalam tanah.

Data-data ini sangat penting untuk membangun model 3D dari deposit mineral dan memperkirakan jumlah mineral yang terkandung di dalamnya. Model 3D ini kemudian dapat digunakan untuk perencanaan penambangan dan pengambilan keputusan lainnya.

A. Analisis Statistik Deskriptif

Analisis statistik deskriptif bertujuan untuk menggambarkan karakteristik data melalui berbagai ukuran seperti posisi pusat data, penyebaran, dan bentuk distribusi. Berikut adalah referensi yang mendukung konsep-konsep ini:

- Rerata (Mean): Rerata adalah rata-rata aritmatika dari data yang diukur pada skala interval atau rasio [3] [4]
- Nilai Tengah (Median): Median mencerminkan skor persentil ke-50 dari distribusi data [3] [4]
- Modus: Modus adalah nilai yang paling sering muncul dalam distribusi data [3] [4]. Ukuran Penyebaran Data
- Rentang (Range): Rentang menggambarkan selisih antara nilai maksimum dan minimum dalam data. [3][4]
- Variansi dan Simpangan Baku (*Standard Deviation*): Variansi dan simpangan baku mengukur seberapa jauh data menyebar dari rata-rata sampel [3] [4].
- Koefisien Variasi (*Coefficient of Variation*): Digunakan untuk menggambarkan tingkat heterogenitas dalam kelompok data. [3][4]
- Histogram : digunakan untuk memvisualisasikan distribusi data dan mengidentifikasi kemiringan. [5]

B. Analisis Variogram

Variogram merupakan bagian dari geostatistik karena digunakan untuk memahami perilaku bagaimana nilai suatu nilai data berubah terhadap jarak dan arah tertentu. Variogram merupakan grafik yang membandingkan antara nilai sampel dan jarak. Variogram dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

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

Keterangan:

$\gamma(m)$ = Fungsi variogram

$N(m)$ = Jumlah pasangan data

$Z(x_i + m)$ = kadar titik contoh berjarak m dari x_i

$Z(x_i)$ = kadar titik contoh x_i

m = jarak tertentu yang mempunyai fungsi vektor arah tertentu.

Hubungan antara variogram *eksperimental* dengan variogram model memiliki nilai parameter kecocokan. Langkah yang dilakukan untuk mendapatkan hubungan antara kedua variogram tersebut adalah dengan melakukan pencocokan (*fitting*) yang disebut juga dengan analisis struktural. Analisis struktural ini dilakukan untuk mendapatkan nilai parameter *nugget effect* (C_0), *sill* dan *range* (k) yang selanjutnya digunakan untuk parameter dalam penaksiran teknik geostatistik (Amri dkk., 2018).

C. Pembuatan Model Blok

Tetapkan ukuran blok berdasarkan kepadatan dan skala proyek, kemudian pastikan model blok mencakup seluruh area eksplorasi

D. Estimasi Metode Ordinary Kriging

Ordinary kriging dikenal sebagai teknik kriging linier karena menggunakan kombinasi linier terbobot dari data yang tersedia untuk proses estimasi (Isaaks dan Srivastava, 1989). Metode ini menggunakan beberapa parameter dalam penaksiran. Adapun parameter yang diperlukan antara lain jumlah data minimum dan maksimum penaksiran, luasan daerah pencarian dan variogram model. Adapun rumus sebagai berikut:

$$\hat{Z}(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Keterangan:

$\hat{Z}(x)$ = Nilai estimasi pada lokasi x

λ_i = Bobot kriging untuk pada data i

$Z(x_i)$ = Nilai variabel pada lokasi

n = Jumlah data yang di gunakan dalam estimasi

E. Validasi Silang (Cross Validation)

Analisis statistik bivarian mempelajari hubungan antara dua variabel yang berbeda tetapi diukur pada lokasi yang sama. Analisis ini membantu dalam memahami tingkat hubungan atau korelasi antara variabel-variabel tersebut, yang sangat penting dalam pemodelan geostatistik untuk memprediksi fenomena spasial. [1]. *Cross-validation* merupakan metode dalam analisis statistik bivarian yang bertujuan untuk menganalisis hubungan antara dua variabel yang berbeda tetapi memiliki lokasi atau posisi yang sama. Hubungan antar variabel ini dapat diukur dengan beberapa parameter, di antaranya sebagai berikut:

a. Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE digunakan untuk mengukur tingkat error prediksi terhadap data aktual. Model estimasi dianggap memiliki tingkat akurasi yang tinggi jika nilai RMSE kecil atau mendekati nol, yang menunjukkan bahwa prediksi mendekati nilai aktual.

b. Koefisien Determinasi (r^2)

Koefisien determinasi menggambarkan proporsi variasi data aktual yang dapat dijelaskan oleh model estimasi. Nilainya berada dalam rentang $0 < r^2 \leq 1$, di mana nilai yang mendekati 1 menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, mengindikasikan model mampu menjelaskan hampir seluruh variasi data.

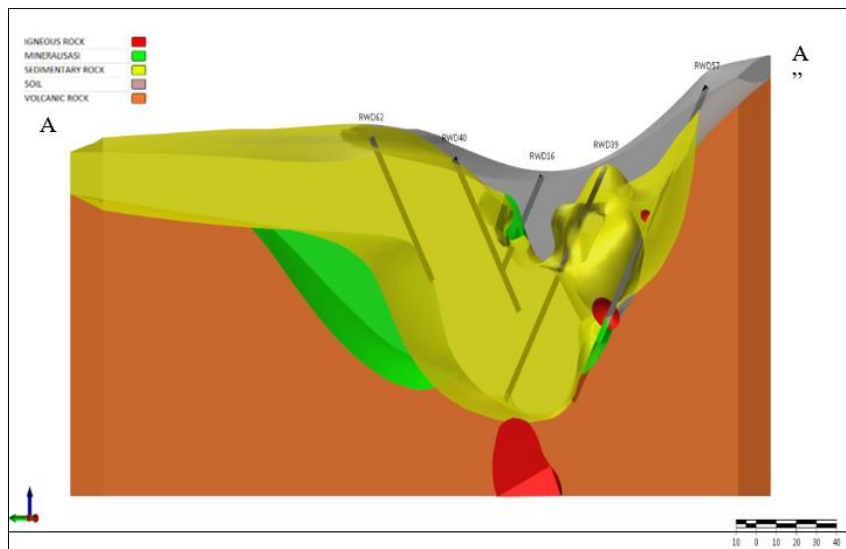
c. Koefisien Korelasi (r)

Koefisien korelasi mengukur kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel. Nilainya berkisar antara $-1 \leq r \leq +1$. Model dianggap akurat jika nilai r mendekati 1, yang menunjukkan hubungan linier positif yang kuat antara variabel estimasi dan nilai aktual.

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Pemodelan Geologi

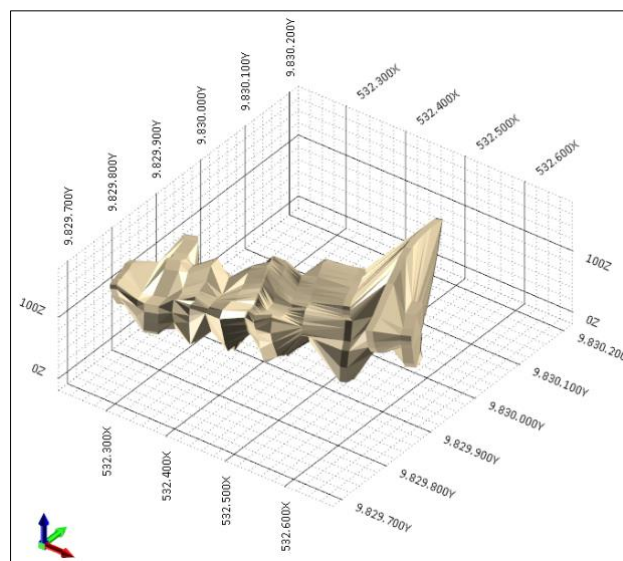
Pemodelan blok geologi dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. Model Geologi pada Blok Gossan

Pembentukan endapan Pb-Zn *skarn* pada daerah penelitian di kontrol dari aspek litostratigrafi dengan adanya batu gamping (sedimentary rock) struktur geologi dan intrusi sekitar. Perselingan antara batuan gamping dan vulkanik yang menonrobos oleh intrusi dasit. 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.

Sebaran titik bor di blok Gossan terdiri dari 82 titik bor dengan kedalaman minimum 30 meter dan kedalaman maksimum 160 meter. Jarak rata-rata antar titik bor adalah 25 meter. Penyebaran titik bor di area penelitian serta badan bijih skarn logam dasar di Blok Gossan dapat divisualisasikan menggunakan perangkat lunak *Micromine 2025*, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pembuatan database.



Gambar 3. Badan bijih galena blok Gossan menggunakan software *micromine 2025*

B. Analisis statistik deskriptif

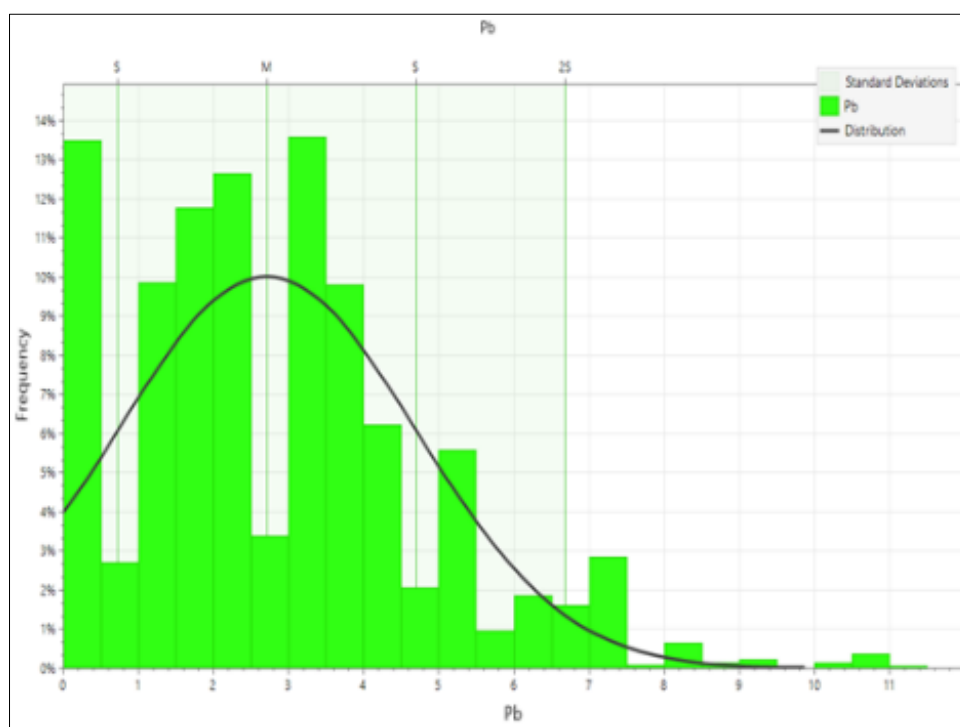
Analisis statistik yang dilakukan pada data kadar timbal setara (Pb-Zn) di endapan skarn menunjukkan bahwa:

- Rata-rata kadar: Cukup tinggi, yaitu sekitar 2.71%. Ini berarti secara umum, kandungan timbal setara dalam endapan ini cukup tinggi.
- Variabilitas rendah: Nilai koefisien variasi yang hanya 0.734 menunjukkan bahwa kadar timbal di seluruh area penelitian cenderung seragam atau tidak terlalu bervariasi.
- Median lebih rendah dari rata-rata: Fakta bahwa nilai tengah (median) lebih rendah dari rata-rata mengindikasikan adanya beberapa data dengan nilai yang sangat tinggi (*outlier*) yang menarik rata-rata ke atas.

hasil analisis menunjukkan bahwa endapan *skarn* ini memiliki kadar timbal (Pb) yang cukup baik secara rata-rata, namun distribusi kadarnya tidak merata. Ada beberapa area dengan kadar yang sangat tinggi yang mempengaruhi nilai rata-rata secara keseluruhan.

Tabel 1 analisis statistik galena

Parameter	Nilai (Pb)
<i>Minimum Value</i>	0.00
<i>Maximum Value</i>	11.00
<i>Mean</i>	2.71
<i>Median</i>	2.40
<i>Standard Deviation</i>	1.99
<i>Coeff. of Variation</i>	0.734
<i>Variance</i>	3.95
<i>N (Jumlah Data)</i>	4061



Gambar 4. Histogram hasil analisis statistik deskriptif Galena pada blok *Gossan*

C. Analisis variogram

Model variogram adalah kunci utama dalam memperkirakan jumlah sumber daya mineral menggunakan metode statistik yang disebut Ordinary Kriging. Model ini menentukan seberapa besar nilai suatu mineral (emas) di suatu lokasi akan dipengaruhi oleh nilai mineral di lokasi lain yang berdekatan. Untuk membuat model variogram yang akurat, kita perlu menganalisis data dari berbagai arah. Pada kasus ini, analisis dilakukan pada tiga arah utama: major, minor dan vertikal. Setiap arah mewakili pola penyebaran mineral yang berbeda.

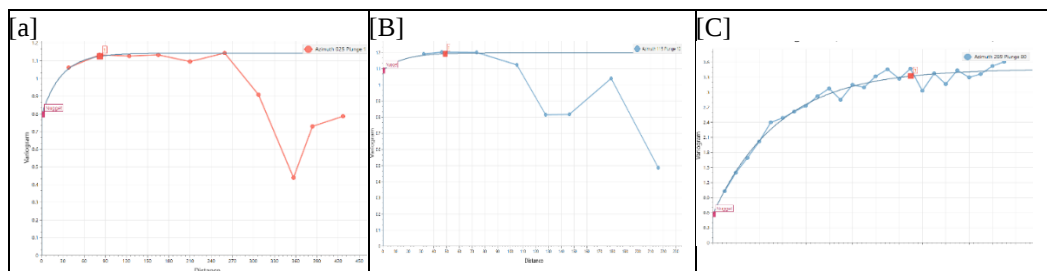
Model variogram memiliki beberapa parameter penting, yaitu:

- 1 *Nugget*: Menunjukkan tingkat variasi acak dalam data yang tidak dapat dijelaskan oleh model spasial.
- 2 *Sill*: Menunjukkan variabilitas total data.
- 3 *Range*: Menunjukkan jarak maksimum di mana dua titik masih memiliki korelasi spasial.
- 4 *Partial sill*: Perbedaan antara dan *nugget*.

Nilai-nilai parameter ini kemudian *sill* digunakan untuk membangun model variogram yang paling sesuai dengan data kita. Hasil analisis variogram dapat dilihat pada **Tabel 1.** dan **Gambar 4.**

Secara sederhana, model variogram seperti peta yang menunjukkan bagaimana nilai suatu mineral berubah dari satu titik ke titik lainnya dalam suatu area. Dengan model variogram yang baik, kita dapat membuat perkiraan yang lebih akurat tentang jumlah mineral yang terkandung dalam suatu deposit.

Intinya, variogram adalah alat yang sangat penting dalam estimasi sumberdaya mineral. Dengan memahami variogram, kita dapat membuat keputusan yang lebih baik dalam perencanaan penambangan.



Gambar 5. [A]Arah Major, [B] Minor dan [C] Vertikal (Downhole)

Tabel 2 hasil fitting variogram model

Arah	Model	Nugget	Partial Sill	Ranges	Azimuth	Plunge
Major	Spherical	0,65	0,235	102	25	4
Minor	Spherical	0.62	0.21	45	115	10
Vertikal	Spherical	0,56	0,24	16.5	289	80

Blok model sumberdaya sebelum menghitung jumlah sumberdaya mineral, kita perlu membuat sebuah model 3D dari area tambang yang disebut "blok model". Model ini membagi area tambang menjadi kubus-kubus kecil yang disebut "blok". Setiap blok mewakili sebagian kecil dari tambang.

Mengapa kita perlu membuat blok model

- Untuk mempermudah perhitungan: Dengan membagi area tambang menjadi blok-blok, kita bisa menghitung jumlah mineral dalam setiap blok, lalu menjumlahkannya untuk mendapatkan total keseluruhan.
- Sesuaikan dengan data bor: Ukuran blok dibuat sesuai dengan jarak antara lubang bor, sehingga setiap blok mewakili volume batuan yang telah kita ambil sampelnya.
- Untuk perencanaan penambangan: Model 3D ini akan sangat berguna untuk merencanakan bagaimana cara menambang mineral secara efisien dan aman.

Jadi, dalam penelitian ini, area tambang dibagi menjadi blok-blok dengan ukuran 6 meter x 6 meter x 1 meter. Ukuran ini dipilih karena sesuai dengan jarak rata-rata antara lubang bor. Dengan model 3D ini, kita bisa mendapatkan gambaran yang lebih jelas tentang distribusi mineral di dalam tanah dan memperkirakan berapa banyak mineral yang bisa kita tambang.

Tabel 3. Parameter ukuran blok model

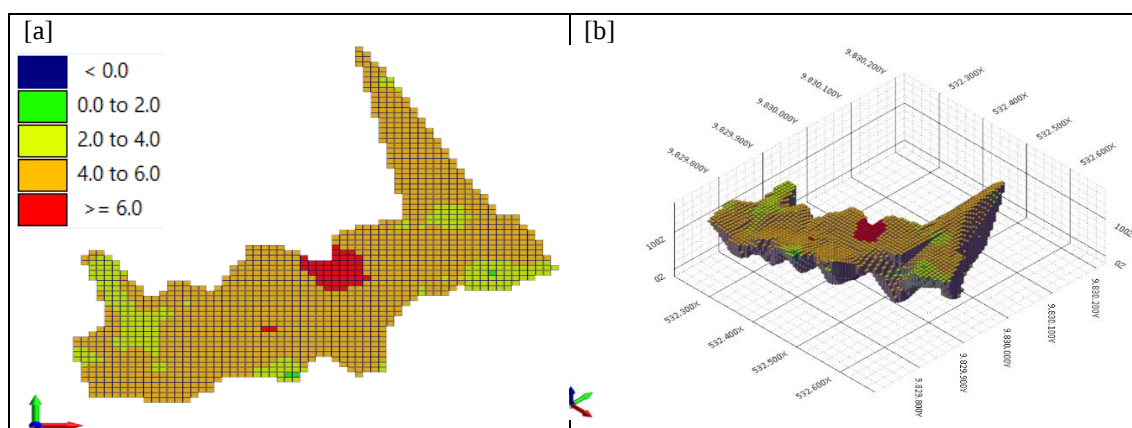
Parameter	Eastng	Northng	RL
Minimal	532.234.594.084.084	982.971.489.059.656	-1.900.406.421.145
Maximal	532.670.094.084.084	983.018.289.059.656	1.699.959.357.885
Ukuran blok	6.5 meter	6.5 meter	1 meter

D. Blok Model Hasil Estimasi Kriging

Setelah kita memiliki model 3D dari tambang yang dibagi menjadi blok-blok, langkah selanjutnya adalah menghitung kadar mineral (dalam hal ini timbal dan seng) pada setiap blok.

- Pengolahan Data: Data kadar mineral dari hasil pengeboran (assay) diproses terlebih dahulu dengan cara menggabungkan data dari beberapa meter menjadi satu nilai rata-rata (komposit). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan data yang lebih representatif untuk setiap blok.
- Estimasi dengan Ordinary Kriging: Metode statistik yang disebut Ordinary Kriging digunakan untuk memperkirakan kadar mineral pada setiap blok yang belum diketahui kadarnya. Metode ini akan mempertimbangkan kadar mineral pada blok-blok di sekitarnya.
- Hasil Akhir: Hasil dari proses estimasi ini adalah sebuah model 3D yang menunjukkan distribusi kadar mineral di seluruh tambang. Model ini dapat dilihat pada Gambar 6.

Secara sederhana, setelah kita memiliki peta 3D dari tambang yang dibagi menjadi blok-blok, kita akan mengisi setiap blok dengan perkiraan kadar mineral. Perkiraan ini didapatkan dengan menganalisis data dari lubang bor di sekitar blok tersebut. Hasil akhirnya adalah peta 3D yang menunjukkan di mana konsentrasi mineral paling tinggi dan berapa banyak mineral yang bisa kita dapatkan dari setiap bagian tambang.



Gambar 6. hasil blok model menggunakan *ordinary kriging*

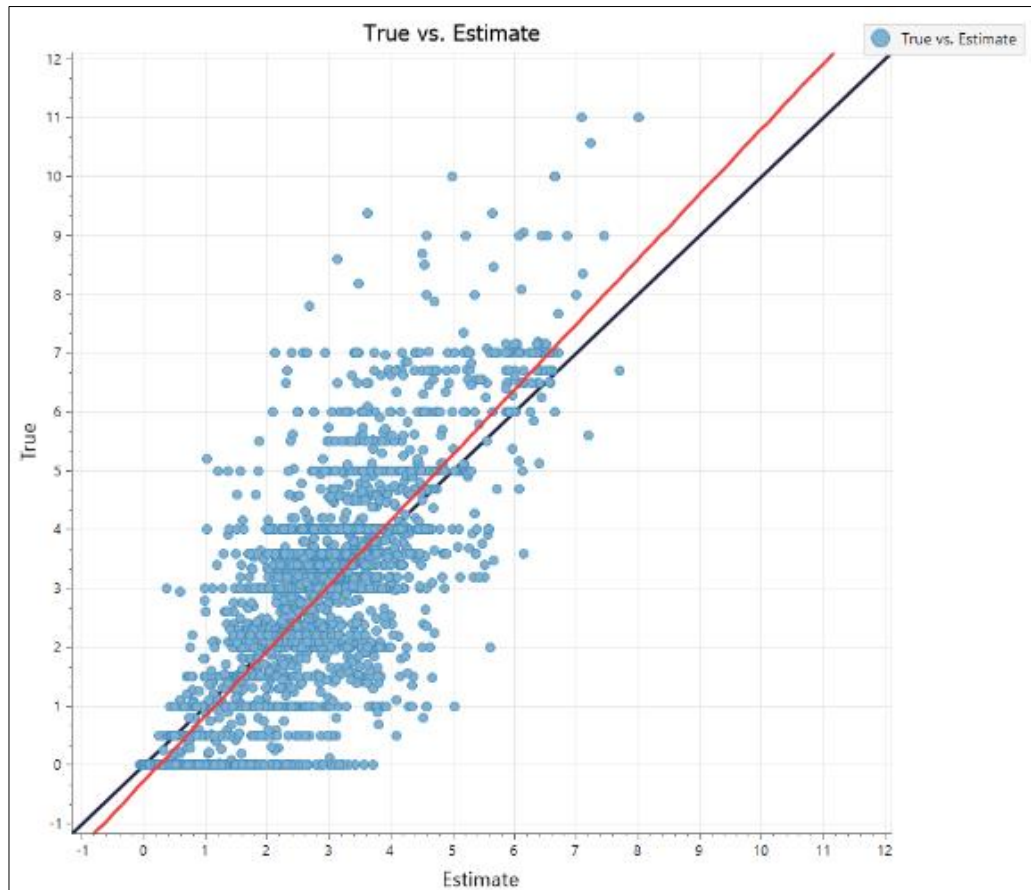
E. Validasi data

Untuk memeriksa apakah hasil perhitungan kadar mineral (timbang dan seng) yang kita dapatkan dari model komputer (estimasi) sudah akurat, kita membandingkannya dengan data kadar mineral yang sebenarnya dari hasil analisis sampel batuan.

Cara membandingkannya:

- Gambar Sebaran: Kita membuat grafik yang menunjukkan hubungan antara kadar mineral yang dihitung (dari model komputer) dan kadar mineral yang diukur langsung dari sampel batuan. Grafik ini disebut scatter plot.
- Hitung Nilai Statistik: Kita menghitung beberapa nilai statistik untuk mengukur seberapa baik hasil perhitungan kita mendekati hasil pengukuran yang sebenarnya. Nilai-nilai ini antara lain:
 - RMSE (Root Mean Square Error): Menunjukkan rata-rata selisih antara nilai yang dihitung dan nilai yang diukur. Semakin kecil nilai RMSE, semakin akurat hasil perhitungan kita.
 - Koefisien Korelasi (r): Menunjukkan seberapa kuat hubungan antara nilai yang dihitung dan nilai yang diukur. Nilai r berkisar antara -1 hingga 1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan korelasi positif yang kuat.
 - Koefisien Determinasi (R^2): Menunjukkan proporsi variabilitas data yang dapat dijelaskan oleh model. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa model kita dapat menjelaskan sebagian besar variasi data.

Dari hasil perhitungan, diperoleh nilai RMSE sebesar 0,40, koefisien korelasi (r) sebesar 0.67, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.44. dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 7. Crossvalidation Metode Ordinary Kriging

Berdasarkan hasil perhitungan teknik estimasi *ordinary kriging*, diperoleh nilai RMSE (Root Mean Square Error) sebesar 0,40, koefisien korelasi (r) sebesar 0,67, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,44. Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa model *ordinary kriging* yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, ditunjukkan oleh nilai RMSE yang relatif rendah. Nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,67 mengindikasikan adanya hubungan yang cukup kuat antara nilai estimasi dengan nilai aktual. Sementara itu, koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,44 menunjukkan bahwa 44% variasi data dapat dijelaskan oleh model tersebut. Meskipun hasilnya cukup baik, masih terdapat ruang untuk perbaikan guna meningkatkan keakuratan dan kemampuan prediksi model.

Tabel 4. Klasifikasi Sumberdaya menggunakan nilai RKSD

Metode	Voulme (m3)	Density (t/m3)	Tonnase (t)	Pb (%)	Klasifikasi RKSD
Ordinary kriging	1555856.25	7.5	11.668.921.88	39.600	<i>Indicated</i>
	7309.25	7.5	54.819.38	40.073	<i>Inferred</i>
	2012325.25	7.5	15.092.439.38	37.090	<i>Measured</i>

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan metode estimasi *ordinary kriging*, sumberdaya timbal (Pb) diklasifikasikan ke dalam tiga kategori berdasarkan RKSD, yaitu *measured*, *indicated*, dan *inferred*. Kategori *measured* memiliki volume sebesar 2.012.325 m³, dengan densitas 7,5 t/m³, menghasilkan tonase sebesar 15.092.439 ton dan kadar timbal (Pb) sebesar 3,7%. Kategori *indicated* memiliki volume 1.555.856,25 m³, dengan densitas 7,5 t/m³, menghasilkan tonase 11.668.921ton dan kadar Pb 3,9%. Sementara itu, kategori *inferred* memiliki volume 7.309,25 m³, dengan densitas 7,5 t/m³, menghasilkan tonase 54.819 ton dan kadar Pb 4%.

Berdasarkan hasil perhitungan teknik estimasi *ordinary kriging*, diperoleh nilai RMSE (Root Mean Square Error) sebesar 0,40, koefisien korelasi (r) sebesar 0,67, dan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,44. Dari data tersebut, dapat disimpulkan bahwa model *ordinary kriging* yang digunakan memiliki tingkat akurasi yang cukup baik, ditunjukkan oleh nilai RMSE yang relatif rendah. Nilai koefisien korelasi (r)

sebesar 0,67 mengindikasikan adanya hubungan yang cukup kuat antara nilai estimasi dengan nilai aktual, sementara koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,44 menunjukkan bahwa 44% variasi data dapat dijelaskan oleh model tersebut dengan hasil cukup baik.

Berdasarkan pemodelan geologi pembentukan endapan Pb-Zn skarn pada daerah penelitian di kontrol dari aspek litostratigrafi dengan adanya batu gamping (*sedimentary rock*) struktur geologi dan intrusi sekitar. Perselingan antara batuan gamping dan vulkanik yang menorobos oleh intrusi dasit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada KTBT PT Kapuas Prima Coal Bapak Acmad Romadhona yang telah memberikan izin untuk penelitian, Kepala Laboratorium Simulasi dan Komputasi Tambang Universitas Veteran Yogyakarta yang telah meminjamkan lisensi *software micromine 2025* dan teman-teman Magister Teknik Pertambangan Universitas Veteran Yogyakarta, yang telah membantu penulisan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Armstrong, *Basic Linear Geostatistic*. Pp. 25-46 Springer. 1998.
- [2] M. A. Asy'ari, R. Hidayatullah, dan A. Zulfadli, "Geologi dan Estimasi Sumberdaya Nikel Laterit Menggunakan Metode Ordinary Kriging di PT. Aneka Tambang, Tbk", *Jurnal INTEKNA: Informasi Teknik dan Niaga*, vol. 13, no. 1. 2013. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/542938231.pdf>
- [3] A. Elordi, E. Celaya, dan H. Lopez, "Development Of Methods Based On Neural Networks In The Estimation Of Mineral Resources", *Dyna*, 2024. doi: doi.org/10.6036/11077
- [4] E. H. Isaaks dan R.M. Srivastava, *Applied Geostatistics*, New York: Oxford University Press, 1989. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02065815>
- [5] O. C. Ibe, *Introduction to Descriptive Statistics*, 2014. doi: [10.1016/B978-0-12-800852-2.00008-0](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800852-2.00008-0)
- [6] J. M. Josselin and B. L. Maux, *Descriptive Statistics And Interval Estimation*, 2017. doi: [10.1007/978-3-319-52827-4_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-52827-4_3)
- [7] KCMI, *Kode Pelaporan Hasil Eksplorasi, Sumberdaya Mineral, dan Cadangan Mineral Indonesia*, Komite Cadangan Mineral Indonesia (KCMI), 2011.
- [8] L. D. Meinert, *Skarns and Skarn Deposits*, Geoscience Canada. 1992. [Online] Available: <https://journals.lib.unb.ca/index.php/GC/article/view/3773/4287>
- [9] M. Samson dan C. Deutsch, *A Hybrid Estimation Technique Using Elliptical Radial Basis Neural Networks and Cokriging*, *Mathematical Geosciences*, 2021. doi: <https://doi.org/10.1007/S11004-021-09969-3>
- [10] SNI 4726, *Pedoman Pelaporan Hasil Eksplorasi, Sumberdaya dan Cadangan Mineral*, Badan Standarisasi Nasional Indonesia, 2019. [Online]. Available: <https://www.perhapi.or.id/doc/sni-4726.pdf>
- [11] T. R. Vetter, "Descriptive Statistics: Reporting The Answers To The 5 Basic Questions Of Who, What, Why, When, Where, And A Sixth, So What?", *Anesthesia & Analgesia*, vol. 125, pp. 1797–1802, 2017. doi: [10.1213/ANE.0000000000002471](https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002471)
- [12] T. M. Van Leeuwen, "Skarn and Porphyry-Style Mineralization in Central Kalimantan", *Jurnal Geologi Indonesia*, 1994.



©2025. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).