

PERBANDINGAN PEMODELAN ELEVASI TOP ZONA BEDROCK DENGAN METODE ORDINARY KRIGING DAN SEQUENTIAL GAUSSIAN SIMULATION

COMPARISON OF BEDROCK ZONE TOP ELEVATION MODEL WITH ORDINARY KRIGING AND SEQUENTIAL GAUSSIAN SIMULATION METHOD

Muhammad Nuzul Khaq¹, Waterman Sulistyana Bargawa¹, Eddy Winarno¹

1. Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Indonesia

Email: nuzul2601@gmail.com

ABSTRAK

Zona *bedrock* tersusun dari batuan dasar segar dan masif yang menjadi zona batas penambangan (*bluezone*) karena tidak mengandung mineral ekonomi. Penaksiran secara tepat terhadap posisi horizon bagian atas zona *bedrock* sebagai batas luar zona bijih pada pemodelan endapan nikel laterit harus dilakukan untuk mendapatkan deskripsi tubuh bijih yang optimal. Metode interpolasi yang sering digunakan saat ini adalah metode *ordinary kriging*. Metode interpolasi *kriging* memiliki karakteristik negatif berupa *smoothing effect*. Metode yang sering digunakan untuk mengurangi *smoothing effect* dari metode *ordinary kriging* adalah metode *sequential gaussian simulation*. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memperkirakan model horizon bagian atas zona *bedrock* dengan menggunakan metode *ordinary kriging* dan *sequential gaussian simulation*. Metode yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari pengumpulan data, menentukan elevasi top zona *bedrock*, analisis statistik deskriptif, analisis geostatistik, perkiraan elevasi top zona *bedrock* dengan metode *ordinary kriging* dan *sequential gaussian simulation* dan analisis validasi model. Hasil dari penelitian ini menunjukkan model elevasi top zona *bedrock ordinary kriging* yang memberikan model yang *smooth*, sedangkan hasil realisasi SGS mampu memberikan gambaran heterogenitas elevasi berdasarkan data sampel elevasi top zona *bedrock*. Hasil analisis *error* terhadap sampel data elevasi top zona *bedrock* juga menunjukkan hasil *E-type* simulasi SGS lebih baik dibandingkan *ordinary kriging*.

Kata kunci: *bedrock*, nikel laterit, *ordinary kriging*, *sequential gaussian simulation*

DOI: 10.15408/jipl.v2i2.28940

ABSTRACT

Zone bedrock is composed of fresh and massive bedrock which becomes the mining boundary zone because it does not contain economic minerals. Accurate estimation of the position of the upper horizon of the bedrock as the outer boundary of the ore zone in laterite nickel deposit modeling must be carried out to obtain an optimal ore body description. The interpolation method that is often used today is the ordinary kriging. The kriging interpolation method has a negative characteristic in the form of a smoothing effect. The method that is often used to reduce the smoothing effect of the ordinary kriging method is the sequential gaussian simulation. Based on this, this research was conducted to estimate the upper horizon model of the bedrock zone using ordinary kriging and sequential gaussian simulation. The methods used in this study consisted of collecting data, determining the bedrock zone top elevation, descriptive statistical analysis, geostatistical analysis, estimation of the bedrock zone top elevation using the ordinary kriging method and sequential gaussian simulation and model validation analysis. The results of this study indicate the top elevation model for the ordinary kriging bedrock which provides a smooth, while the results of the SGS realization are able to provide an overview of the elevation heterogeneity based on the sample data of the bedrock. analysis error on the bedrock zone top elevation data samples also show that the E-type simulation results from SGS are better than ordinary kriging.

Keywords: *bedrock*, nickel laterite, *ordinary kriging*, *sequential gaussian simulation*

PENDAHULUAN

Dewasa ini nikel menjadi salah satu mineral kritis yang merupakan komponen penting dalam inovasi teknologi berbasis energi bersih dan terbarukan (Czerwinski, 2022; Hammond & Brady, 2022; International Energy Agency (IEA), 2022; Nassar & Fortier, 2021). Berdasarkan U.S. Geological Survey (2022) sumberdaya yang telah teridentifikasi rata-rata 300 juta ton berupa nikel, dengan sekitar 60 % berupa laterit. Nikel laterit merupakan hasil pengayaan mineral dari proses laterisasi batuan ultrabasa yang mengalami pelapukan pada lingkungan tropis. Proses laterisasi umumnya akan membagi zona laterit menjadi 3 yaitu, zona limonit, zona saprolit dan zona *bedrock* (Butt & Cluzel, 2013; Farrokhpay dkk., 2019; van der Ent dkk., 2013).

Zona *bedrock* tersusun dari batuan dasar segar dan masif (dunite, peridotit atau batuan ultrabasa lainnya) yang menjadi zona batas penambangan (*bluezone*) karena tidak mengandung mineral ekonomis (Bargawa 2021). Penaksiran secara tepat terhadap posisi horizon bagian atas atau top elevasi zona *bedrock* sebagai batas luar zona bijih pada pemodelan endapan nikel laterit harus dilakukan untuk mendapatkan deskripsi tubuh bijih yang optimal. Metode penaksiran yang sering digunakan saat ini adalah metode *ordinary kriging* (Khaq dkk., 2022; Kumar dkk., 2022; Ozturk & Kilic, 2016; Sahbeni & Szekley, 2022). Metode interpolasi linear seperti IDW (*inverse distance weighted*) dan *kriging* memiliki karakteristik negatif berupa variansi yang lebih rendah dalam nilai perkiraan dibandingkan dengan nilai aslinya. pengurangan variansi ini disebut juga *smoothing effect* yang berdampak terhadap nilai perkiraan yang terlalu tinggi atau terlalu rendah (Liu dkk., 2019; Rossi & Deutsch, 2014).

Metode penaksiran yang sering digunakan untuk mengurangi *smoothing effect* dari metode *ordinary kriging* adalah metode simulasi *sequential gaussian simulation* (SGS). Pendekatan metode simulasi memperhitungkan variasi spasial data asli di lokasi dengan sampel dan variasi hasil perkiraan di lokasi tanpa sampel sehingga mampu mereproduksi statistik sampel (histogram dan model kontinuitas spasial) dan memberikan hasil yang lebih realistis dibandingkan metode *kriging* (Mery & Marcotte, 2022; Soltani dkk., 2013). Tujuan utama dalam penelitian ini adalah melakukan perkiraan model horizon bagian atas atau top elevasi zona *bedrock* dengan menggunakan metode *ordinary kriging* dan *sequential gaussian simulation* untuk mendapatkan gambaran penyebaran zona *bedrock* dan menentukan metode yang paling tepat dalam perkiraan top elevasi zona *bedrock* pada daerah penelitian.

METODE

Metode penelitian terdiri dari pengumpulan data eksplorasi berupa data pemboran inti endapan nikel laterit, menentukan elevasi top zona *bedrock* dan analisis statistik deskriptif. Selanjutnya adalah melakukan analisis geostatistik atau *variography* terhadap data asli dan data yang telah ditransformasi. Hasil dari analisis variogram data asli digunakan dalam perkiraan elevasi top zona *bedrock* dengan metode *kriging* dan variogram data yang telah ditransformasi digunakan dalam perkiraan elevasi top zona *bedrock* dengan metode *sequential gaussian simulation*. Hasil perkiraan dari metode *ordinary kriging* dan *sequential gaussian simulation* kemudian dibandingkan dan dianalisis terhadap data asli pada lokasi yang sama.

Analisis Variogram

Variogram adalah ukuran dari variansi antara pasangan data pada jarak tertentu. Variogram merupakan landasan utama dari banyak aplikasi geostatistik. Variogram terdiri dari dua jenis yaitu variogram eksperimental dan variogram model. Variogram model yang dicocokkan dengan variogram eksperimental harus akurat, karena jika variogram menggambarkan variansi dengan buruk maka prediksi cenderung buruk juga dan memungkinkan tidak valid. Variogram eksperimental dihitung menggunakan persamaan (1) berikut :

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{i=1}^n [Z(S_{i+h}) - Z(S_i)]^2}{2N(h)} \quad (1)$$

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* (a) yang selanjutnya digunakan sebagai parameter dalam penaksiran aplikasi geostatistik (Oliver & Webster, 2015).

Empat model variogram teoritis yang secara luas digunakan dalam analisis struktural yaitu :

1. Model variogram linear didefinisikan dengan persamaan berikut :

$$\gamma(h) = |h| \tag{2}$$

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

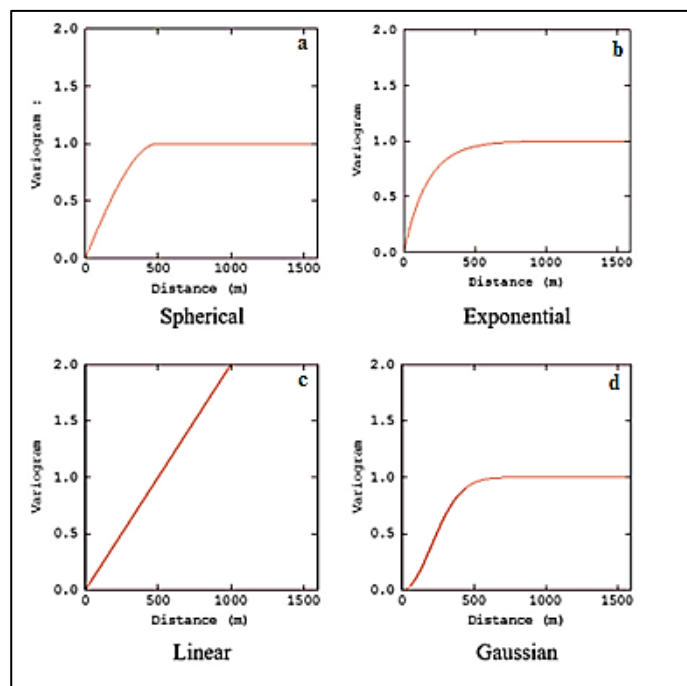
$$\begin{aligned} \gamma(h) &= C_0 + C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] && \text{untuk } h < a \\ \gamma(h) &= C_0 + C && \text{untuk } h \geq a \\ \gamma(h) &= 0 && \text{untuk } h = 0 \end{aligned} \tag{3}$$

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

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \tag{4}$$

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

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(-\frac{h^2}{a^2} \right) \right] \tag{5}$$



Gambar 1. Model variogram : Model *spherical* (a), *exponential* (b), *linear* (c) dan *gaussian* (d) (Abzalov, 2016).

Metode *Ordinary Kriging* (OK)

Ordinary kriging merupakan salah satu analisis geostatistik *linear* untuk memprediksi suatu nilai berdasarkan nilai-nilai di sekitarnya dengan mempertimbangkan komponen spasial. Estimasi dengan metode *ordinary kriging* bersifat B.L.U.E. (*best linear unbiased estimator*) karena menghasilkan penduga yang tidak bias (Seo, 2013).

Nilai taksiran metode *ordinary kriging* ditentukan dengan persamaan (6) berikut :

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z_i \text{ dengan } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \tag{6}$$

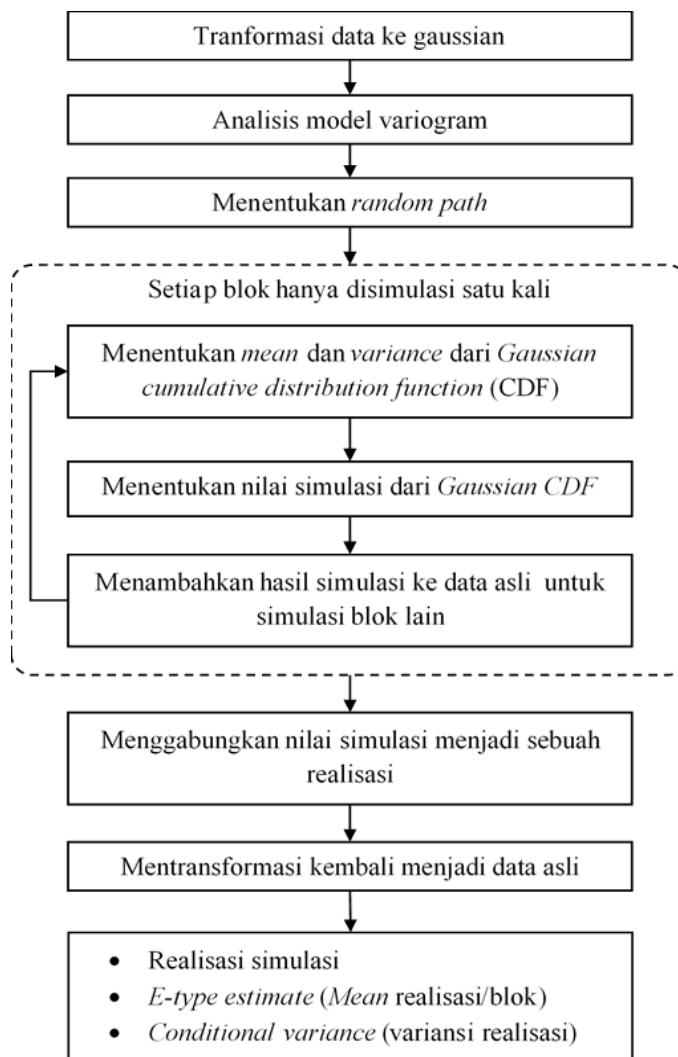
Sedangkan nilai variansi kriging ditentukan dengan menggunakan persamaan (7) berikut :

$$\sigma^2 = C(0) - ((\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C_{i,0}) + \mu) \tag{7}$$

Metode *ordinary kriging* menggunakan beberapa parameter dalam penaksiran kadar. Parameter penaksiran yang diperlukan meliputi luasan daerah pencarian data, jumlah data minimum dan maksimum yang digunakan dalam penaksiran dan parameter variogram (*nugget, sill dan range*) dari hasil *fitting variogram*.

Metode Sequential Gaussian Simulation (SGS)

Sequential gaussian simulation (SGS) merupakan algoritma pemodelan stokastik yang menghasilkan beberapa realisasi model. Metode SGS menuntut data yang digunakan dalam bentuk standar *gaussian* dengan nilai *mean* 0 dan variansi 1. Metode *Sequential gaussian simulation* didasarkan pada prinsip bahwa simulasi yang tepat untuk sebuah titik adalah nilai yang diambil secara acak dari fungsi distribusi kumulatif *conditional* nya, yang ditentukan oleh rata-rata *kriging* dan variansi estimasi yang berasal dari sejumlah titik terdekat. Titik-titik berurutan yang disimulasi tidak hanya dibuat dari data *conditioning* asli di sekitarnya, tetapi juga nilai yang disimulasi sebelumnya yang berada di sekitarnya (Liu dkk., 2019).



Gambar 2. Alur kerja umum dalam *sequential gaussian simulation* (Liu dkk., 2019).

HASIL DAN PEMBAHASAN

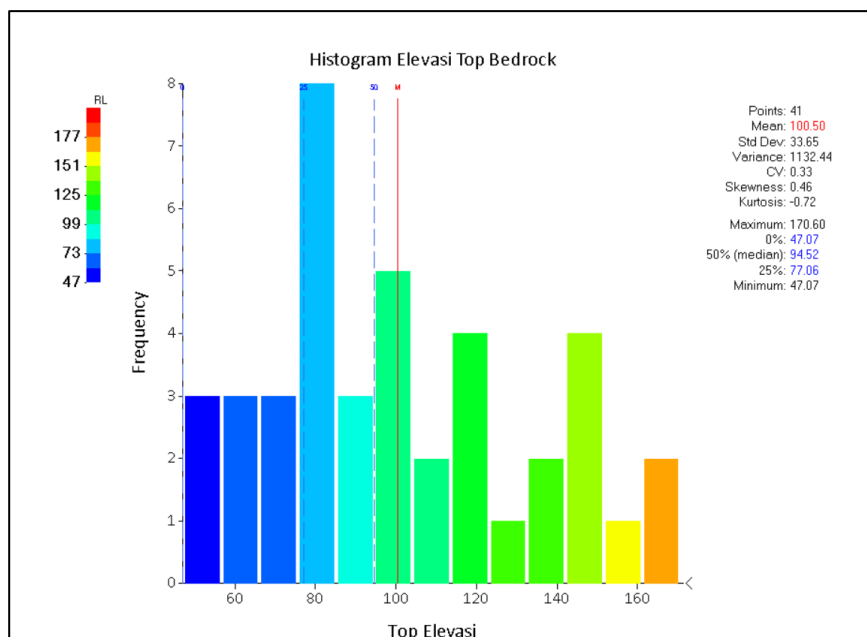
Analisis Statistik Deskriptif

Analisis statistik dilakukan terhadap data elevasi top zona *bedrock* pada 41 titik. Analisis ini bertujuan untuk mendeskripsikan dan memberikan gambaran tentang distribusi data. Hasil analisis statistik dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Statistik deskriptif elevasi top *bedrock*

Parameter	Elevasi top <i>bedrock</i>
<i>N</i> (jumlah data)	41
Minimum Value	47,07
Maximum Value	170,60
Mean	100,50
Median	94,52
Variance	1132,44
Standard Deviation	33,65
Coeff. of Variation	0,33
Skewness	0,46
Kurtosis	-0,72

Distribusi data elevasi top zona *bedrock* pada daerah penelitian secara umum memperlihatkan distribusi mendekati normal dengan sedikit skew positif yaitu 0,46. Distribusi data dominan pada elevasi rendah dengan nilai median 94,52 lebih kecil dari nilai *mean* 100,50 sebagaimana terlihat pada gambar 3. Nilai koefisien variasi adalah 0,33 sebagaimana terlihat pada Tabel 3.1 yang secara empiris reliabilitas kisaran koefisien variasi di bawah 0,5 cocok dengan penaksiran dengan pendekatan *ordinary kriging*.

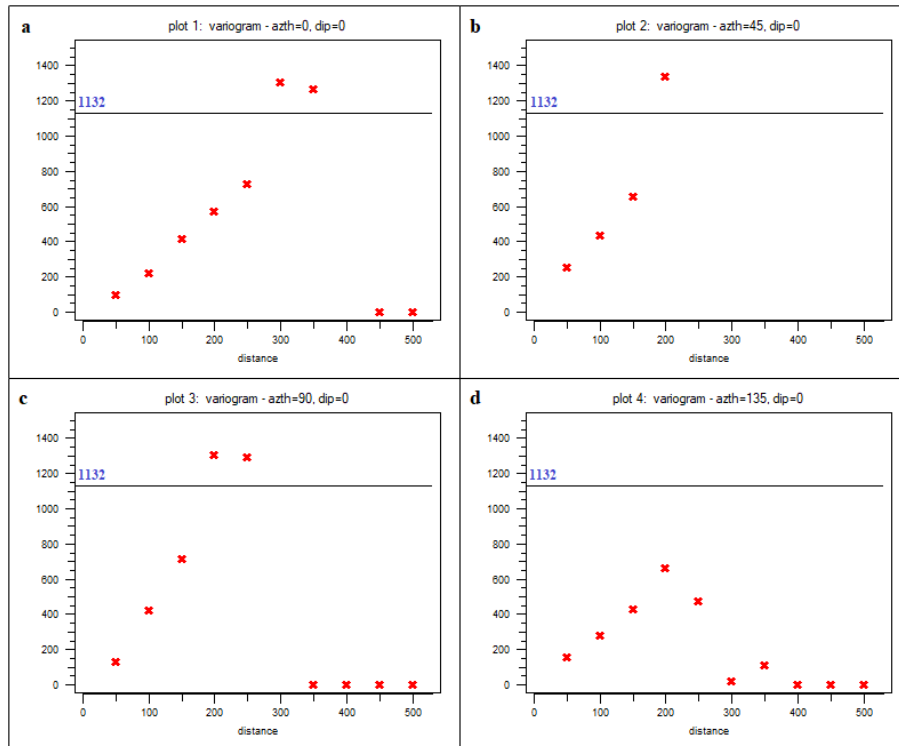


Gambar 3. Histogram elevasi top zona *bedrock*

Analisis Geostatistik

Analisis geostatistik dilakukan dengan membuat variogram elevasi top zona *bedrock* untuk mengetahui tingkat variabilitas data pada jarak dan arah tertentu. Analisis variogram eksperimental pada penelitian ini dilakukan terhadap empat arah yaitu, 0°, 45°, 90°, dan 135°. Hasil analisis variogram dapat dilihat pada gambar 4 di bawah ini.

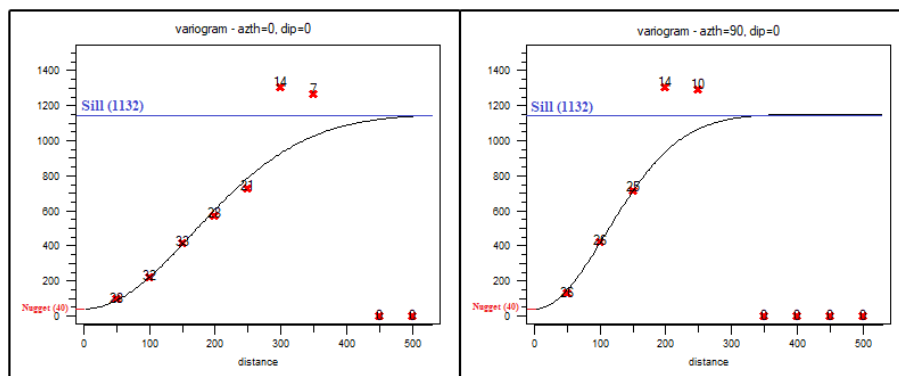
Pencocokan (*fitting*) model variogram terhadap variogram eksperimental dilakukan terhadap variogram arah 0° dan 90° sebagai sumbu *major* dan *semi-major* terhadap variogram model *gaussian* sebagaimana terlihat pada gambar 5. Hasil analisis variogram model *gaussian* terhadap sumbu *major* dan *semi-major* dengan 1 struktur, diketahui nilai parameter geostatistik berupa nilai *nugget* 40, nilai struktur 1.092 dan total *sill* 1.132. Nilai *range* pada sumbu *major* adalah 410 dan pada sumbu *semi-major* 270. Hasil analisis model variogram dapat dilihat pada tabel 2.



Gambar 4. Variogram eksperimental elevasi top zona bedrock arah 0° (a), arah 45° (b), arah 90° (c), dan arah 135° (d).

Tabel 2. Parameter variogram elevasi top zona *bedrock*

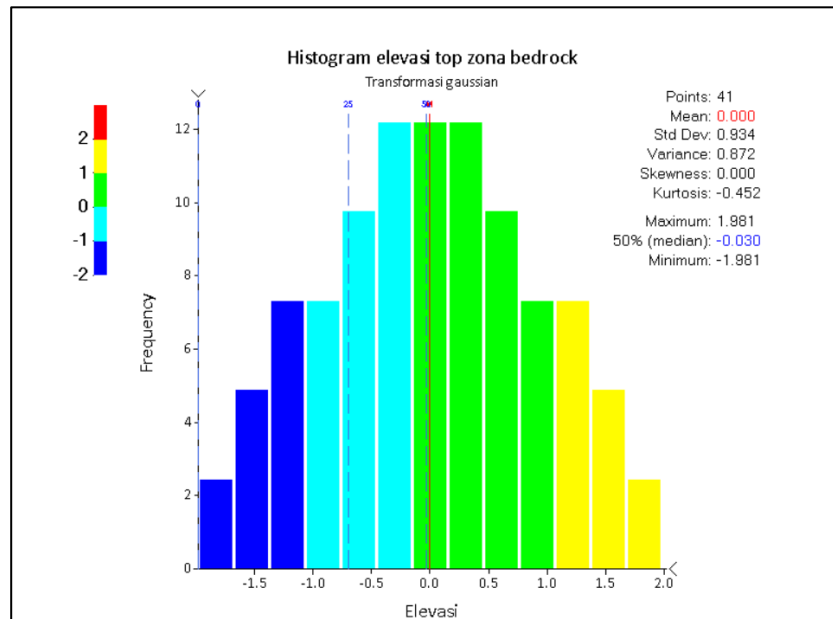
<i>Direction</i>	<i>Azimuth</i>	<i>Dip</i>	<i>Model</i>	<i>Nugget</i>	<i>Struktur 1</i>	<i>Total Sill</i>	<i>Range</i>
<i>Major</i>	0	0	<i>Gaussian</i>	40	1092	1132	410
<i>Semi-major</i>	90	0	<i>Gaussian</i>	40	1092	1132	270



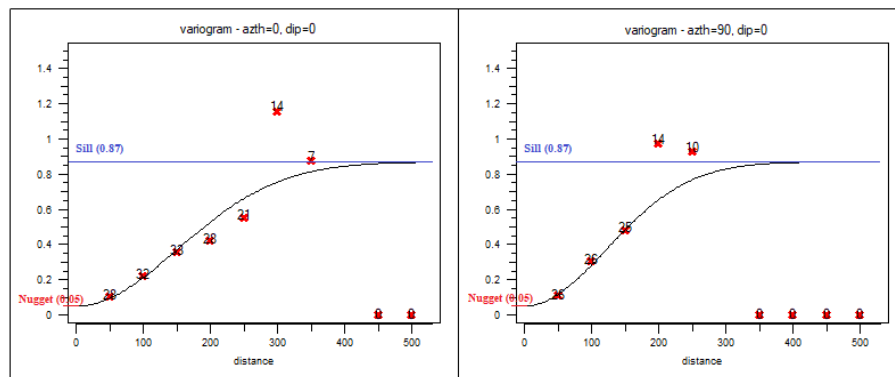
Gambar 5. Variogram model *gaussian* elevasi top zona *bedrock* pada arah 0° (kiri) dan arah 90° (kanan).

Analisis variogram juga dilakukan pada data yang telah ditransformasi ke distribusi *gaussian*, hal ini diperlukan untuk melakukan penaksiran dengan metode SGS (*sequential gaussian simulation*).

Metode SGS mensyaratkan data dalam bentuk *gaussian* sehingga diperlukan transformasi data menjadi distribusi *gaussian*. Hasil transformasi data dapat dilihat pada gambar 6.



Gambar 6. Histogram data elevasi top zona *bedrock* transformasi *gaussian*



Gambar 7. Variogram model *gaussian* elevasi top zona *bedrock* yang telah ditransformasi *gaussian* pada arah 0° (kiri) dan arah 90° (kanan)

Analisis variogram pada data yang telah ditransformasi dilakukan pada arah 0°, 45°, 90° dan 135°. Pencocokan model variogram menunjukkan sumbu *major* pada arah 0° dengan *range* 370 dan sumbu *semi-major* pada arah 90° dengan *range* 300 yang dapat dilihat pada gambar 7. Hasil analisis variogram pada tabel 3 memperlihatkan hasil pencocokan model variogram *gaussian* pada sumbu *major* dengan azimuth 0° dan *semi-major* dengan azimuth 90°, yaitu nilai *nugget* 0,05, nilai struktur 0,82, dan total *sill* 0,87.

Tabel 3. Parameter variogram elevasi top zona *bedrock* yang telah ditransformasi *gaussian*

Direction	Azimuth	Dip	Model	Nugget	Struktur 1	Total Sill	Range
Major	0	0	Gaussian	0,05	0,82	0,87	370
Semi-major	90	0	Gaussian	0,05	0,82	0,87	300

Penaksiran Elevasi Top Zona *Bedrock*

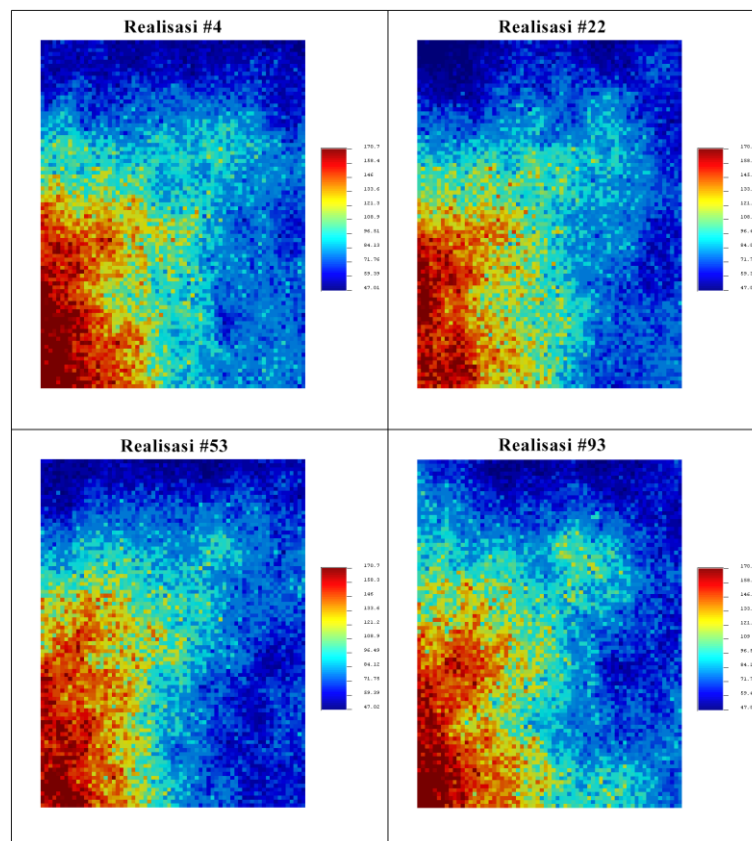
Penaksiran elevasi top zona *bedrock* dilakukan pada *grid* yang teratur dengan titik *origin* 406290E dan 9610800N. Ukuran *grid* adalah 5 x 5 m dengan 67 *grid* dalam arah *easting* dan 88 *grid* dalam arah *northing*, sehingga memberikan total 5896 *grid*. Radius pencarian dilakukan dengan dimensi elipsoid 300 x 200 m pada azimuth 0° dan *dip* 0° dengan data minimum 3 dan maksimum 15. Penaksiran

dengan metode SGS dilakukan sebanyak 100 simulasi dengan menggunakan data yang telah ditransformasi ke dalam distribusi *gaussian*. Proses penaksiran dalam metode SGS secara otomatis akan mentransformasi kembali hasil realisasi menjadi data dengan distribusi asli sehingga proses *back-transform* tidak perlu dilakukan.

Statistik hasil penaksiran elevasi top zona *bedrock* pada tabel 4 menampilkan statistik hasil penaksiran elevasi top *bedrock ordinary kriging*, 4 realisasi (#4, #22, #53, #93) dan *E-type* dari simulasi SGS. Statistik hasil penaksiran menunjukkan realisasi hasil simulasi memiliki nilai minimum dan maksimum mendekati data sampel, sedangkan hasil *ordinary kriging* memiliki data minimum lebih kecil dari data sampel dan data maksimum lebih besar dari data sampel. Statistik *E-type* memperlihatkan hasil rata-rata dari 100 realisasi tiap *grid* sehingga menghasilkan data dengan variansi yang lebih kecil.

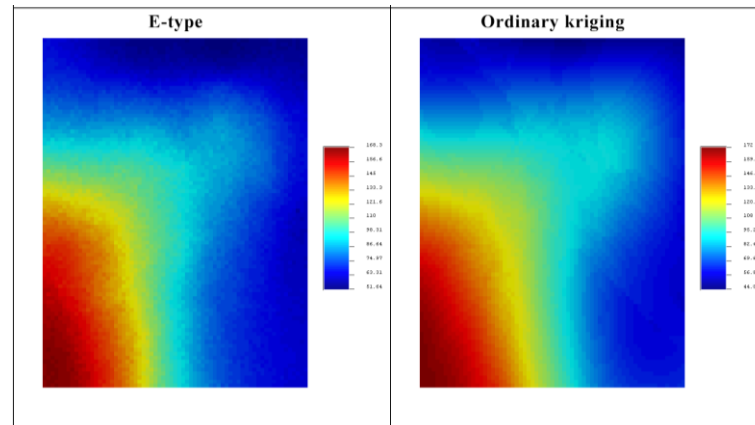
Tabel.4 Statistik hasil penaksiran elevasi top model zona *bedrock ordinary kriging*, 4 realisasi dan *e-type* simulasi SGS

Parameter	OK	Realisasi				<i>E-type</i>
		# 4	# 22	# 53	# 93	
<i>N</i>	5896	5896	5896	5896	5896	5896
<i>Minimum Value</i>	44,03	47,01	47,01	47,02	47,01	51,64
<i>Maximum Value</i>	171,99	170,75	170,63	170,70	170,92	168,31
<i>Median</i>	84,81	82,78	80,90	79,19	84,71	81,22
<i>Mean</i>	92,31	94,17	91,72	91,18	94,43	92,12
<i>Variance</i>	1032,43	975,87	929,15	990,79	957,59	908,82
<i>Standard Deviation</i>	32,13	31,24	30,48	31,48	30,95	30,15
<i>Coeff. of Variation</i>	0,35	0,33	0,33	0,35	0,33	0,33
<i>Skewness</i>	0,78	0,88	0,84	0,86	0,76	0,88
<i>Kurtosis</i>	-0,42	-0,07	-0,13	-0,26	-0,32	-0,30



Gambar 8. Empat realisasi elevasi top zona *bedrock*

Model hasil penaksiran *ordinary kriging* menghasilkan model yang *smooth*, sedangkan hasil realisasi metode SGS memperlihatkan hasil dengan heterogenitas model yang disimulasikan berdasarkan variabilitas data sampel. *E-type* dari hasil simulasi SGS memperlihatkan hasil yang mirip dengan *ordinary kriging*. Model elevasi top zona bedrock hasil 4 realisasi SGS dapat dilihat pada gambar 8 dan *E-type* dan *ordinary kriging* dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. *E-type* dan *ordinary kriging* elevasi top zona *bedrock*

Validasi Model Elevasi Top Zona *Bedrock*

Validasi perkiraan model elevasi top zona *bedrock* hasil *ordinary kriging* dan *sequential gaussian simulation* dilakukan dengan analisis regresi linear terhadap data sampel elevasi top zona *bedrock* pada titik yang sama, serta analisis *error* dengan metode *Mean Absolute Error* (MAE) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Analisis *regresi linear* akan memperlihatkan hasil koefisien korelasi data yang diamati dengan nilai berkisar $-1 \leq r \leq +1$, parameter data memiliki korelasi yang baik apabila hasil menunjukkan nilai yang tinggi atau mendekati 1. Parameter analisis dengan MAE dan RMSE menunjukkan hasil yang baik jika nilai kesalahan (*error*) kecil atau mendekati 0. Nilai MAE dan RMSE dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\hat{Z}_{(i)} - Z_{(i)}| \tag{8}$$

dan

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}_{(i)} - Z_{(i)})^2} \tag{9}$$

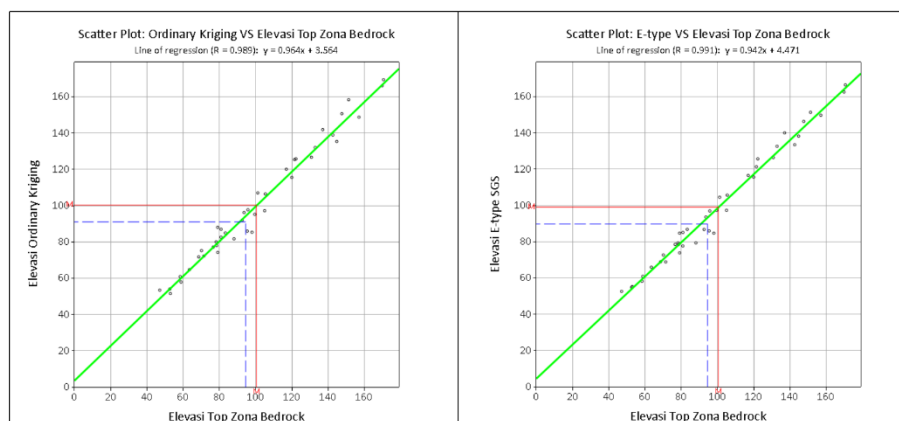
Keterangan :

- n = Jumlah data
- Z_i = Nilai sampel ke-i
- \hat{Z}_i = Nilai hasil interpolasi ke-i

Validasi model dilakukan terhadap hasil *ordinary kriging* dan *E-type* hasil simulasi SGS terhadap data sampel pada titik yang sama. Jumlah titik pengamatan sebanyak 41 titik sesuai dengan jumlah data sampel elevasi top zona *bedrock*. Hasil regresi linear pada gambar 10 menunjukkan nilai koefisien korelasi (R) *ordinary kriging* dan *E-type* terhadap data sampel elevasi top zona *bedrock* memperlihatkan hasil yang baik dengan nilai 0,99. Hasil analisis *error* dengan MAE dan RMSE pada tabel 5 menunjukkan hasil *E-type* lebih baik dibandingkan *ordinary kriging*, hal ini ditunjukkan dengan nilai MAE dan RMSE *E-type* lebih kecil dibandingkan *ordinary kriging*.

Tabel 5. Hasil analisis validasi silang *ordinary kriging* dan *E-type* simulasi SGS

Metode	R	MAE	RMSE
OK	0,99	3,98	4,94
<i>E-type</i> SGS	0,99	3,62	4,75



Gambar 10. Scatterplot hasil *ordinary kriging* dan *E-type* simulasi SGS terhadap sampel elevasi top zona *bedrock*.

PENUTUP

Simpulan

Simpulan dari penelitian ini adalah hasil penaksiran elevasi top zona *bedrock* dengan metode *sequential gaussian simulation* (SGS) memberikan hasil realisasi yang mendekati statistik data sampel, sedangkan hasil *ordinary kriging* (OK) mengalami *smoothing effect* sehingga memberikan hasil yang kurang akurat. Hasil realisasi SGS mampu memberikan gambaran heterogenitas elevasi berdasarkan data sampel elevasi top zona *bedrock*. Hasil analisis *error* terhadap sampel data elevasi top zona *bedrock* menunjukkan hasil *E-type* simulasi SGS lebih baik dibandingkan hasil *ordinary kriging* dengan nilai MAE dan RMSE yang lebih kecil.

Saran dari penelitian ini, sebaiknya perusahaan perlu melakukan *infill drilling* untuk analisis lebih lanjut terkait tingkat akurasi taksiran.

UCAPAN TERIMAKASIH

Dalam penyusunan paper ini penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan dari berbagai pihak khususnya Kepada Prodi Magister Teknik Pertambangan UPN “Veteran” Yogyakarta. Penulis juga menyampaikan terimakasih kepada PT. Bumi Nikel Nusantara dan dosen pembimbing atas arahan serta masukkan dalam menyelesaikan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abzalov, M. (2016). Applied Mining Geology. Dalam *Modern Approaches in Solid Earth Sciences* (Vol. 12). Springer International Publishing AG Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-39264-6>
- Butt, C. R. M., & Cluzel, D. (2013). Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites. *Elements*, 9(2), 123–128. <https://doi.org/10.2113/gselements.9.2.123>
- Czerwinski, F. (2022). Critical Minerals for Zero-Emission Transportation. *Materials*, 15(16), 5539. <https://doi.org/10.3390/ma15165539>
- Farrokhpay, S., Cathelineau, M., Blancher, S. B., Laugier, O., & Filippov, L. (2019). Characterization of Weda Bay nickel laterite ore from Indonesia. *Journal of Geochemical Exploration*, 196, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.002>
- Hammond, D. R., & Brady, T. F. (2022). Critical minerals for green energy transition: A United States perspective. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 00(00), 1–18. <https://doi.org/10.1080/17480930.2022.2124788>

- International Energy Agency (IEA). (2022). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report*. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions/executive-summary>
- Khaq, M. N., Bargawa, W. S., & Winarno, E. (2022). Estimasi Sumberdaya Endapan Nikel Laterit Sulawesi Tenggara dengan Metode Ordinary Kriging. *Jurnal Sumberdaya Bumi Berkelanjutan (SEMATAN)*, 1(1), 1–6. <https://doi.org/10.31284/j.semitan.2022.3213>
- Kumar, P., Rao, B., Burman, A., Kumar, S., & Samui, P. (2022). Spatial variation of permeability and consolidation behaviors of soil using ordinary kriging method. *Groundwater for Sustainable Development*, 100856. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100856>
- Liu, Y., Cheng, Q., Carranza, E. J. M., & Zhou, K. (2019). Assessment of Geochemical Anomaly Uncertainty Through Geostatistical Simulation and Singularity Analysis. *Natural Resources Research*, 28(1), 199–212. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9388-1>
- Mery, N., & Marcotte, D. (2022). Assessment of Recoverable Resource Uncertainty in Multivariate Deposits Through a Simple Machine Learning Technique Trained Using Geostatistical Simulations. *Natural Resources Research*, 31(2), 767–783. <https://doi.org/10.1007/s11053-022-10028-9>
- Nassar, N. T., & Fortier, S. M. (2021). *Methodology and technical input for the 2021 review and revision of the U.S. Critical Minerals List: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021–1045*. 31. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/ofr20211045>
- Oliver, M. A., & Webster, R. (2015). *Basic steps in Geostatistics: The variogram and kriging*.
- Ozturk, D., & Kilic, F. (2016). Geostatistical Approach for Spatial Interpolation of Meteorological Data. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 88(4), 2121–2136. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150103>
- Rossi, M. E., & Deutsch, C. v. (2014). Mineral resource estimation. Dalam *Mineral Resource Estimation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>
- Sahbeni, G., & Szekley, B. (2022). Spatial modeling of soil salinity using kriging interpolation techniques: A study case in the Great Hungarian Plain. *EURASIAN JOURNAL OF SOIL SCIENCE (EJSS)*, 11(2), 102–112. <https://doi.org/10.18393/ejss.1013432>
- Seo, D.-J. (2013). Conditional bias-penalized kriging (CBPK). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 27(1), 43–58. <https://doi.org/10.1007/s00477-012-0567-z>
- Soltani, F., Afzal, P., & Asghari, O. (2013). Sequential Gaussian Simulation in the Sungun Cu Porphyry Deposit and Comparing the Stationary Reproduction with Ordinary Kriging. *Universal Journal of Geoscience*, 1(2), 106–113. <https://doi.org/10.13189/ujg.2013.010210>
- U.S. Geological Survey. (2022). Mineral Commodity Summaries 2022. Dalam *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952. (Issue 703).
- Van der Ent, A., Baker, A. J. M., van Balgooy, M. M. J., & Tjoa, A. (2013). Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): Mining, nickel hyperaccumulators and opportunities for phytomining. *Journal of Geochemical Exploration*, 128, 72–79. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.009>