

Pemetaan Sebaran Kadar Besi Pada Endapan Laterit Nikel Menggunakan Metode Interpolasi Indikator Kriging dan *Ordinary Kriging*

(Mapping The Distribution of Iron Content in Nickel Laterite Deposits Using Indicator Kriging and Ordinary Kriging Interpolation Method)

Hendro Purnomo^{1*}

*Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Nasional Yogyakarta

* Korespondensi E-mail: hendro.purnomo@itny.co.id

Abstrak

Dalam endapan laterit nikel selain mengandung unsur logam nikel (Ni) itu sendiri juga mengandung unsur-unsur logam lainnya, diantaranya adalah unsur logam besi (Fe) yang kadarnya bervariasi pada setiap zonanya. Dalam penelitian ini dilakukan pemetaan sebaran kadar besi pada zona limonit dari endapan laterit nikel dengan menggunakan metode interpolasi indikator kriging (IK) untuk menganalisis sebaran probabilitas kadar besi dan *ordinary kriging* (OK) untuk menganalisis variabilitas kadar besi secara spasial. *Fitting* variogram dilakukan dengan menggunakan model variogram teoritis *spherical*, *exponential* dan *gaussian*. Pemilihan model variogram terbaik dilakukan berdasarkan nilai parameter *root mean square error* (RMSE) terkecil, sedangkan estimasi potensi sumberdaya dilakukan dengan metode *polygon extended area*. Hasil interpolasi menunjukkan bahwa sebaran anomali kadar besi menempati $\pm 83,3\%$ daerah penelitian dengan potensi sumberdaya $\pm 64.522.110$ -ton logam besi. Evaluasi hasil interpolasi berdasarkan parameter *root mean square standardized prediction error* (RMSP) menunjukkan bahwa hasil estimasi kadar besi dengan menggunakan metode OK adalah *underestimated*.

Kata kunci: indikator, kriging, *ordinary*, RMSE, RMSP

Abstract

Beside containing nickel (Ni), nickel laterite deposits also contain other elements, including iron (Fe) which have varying levels in each layer. In this study, the distribution of Fe content in the limonite layers was carried out using the indicator kriging method to analyze the probability distribution of iron levels and ordinary kriging to analyze the variability of iron levels spatially. Fitting the variogram was undertaken by using *spherical*, *exponential* and *gaussian* models. The selection of the best variogram model was carried out based on the smallest root mean square error (RMSE) value, while the estimation of resource potential was calculated by the *polygon extended area* method. The results of the interpolation show that the distribution of iron anomaly occupies $\pm 83,3\%$ of the research area with a potential resource of $\pm 64.522.110$ ton of iron. The evaluation of the interpolation results base on the root mean square standardized prediction error (RMSP) indicates that the estimation results of iron content using the ordinary kriging method are *underestimated*.

Keywords: indicator, kriging, *ordinary*, RMSE, RMSP

1. Pendahuluan

Endapan laterit nikel adalah hasil pelapukan intensif dari batuan ultra basa di daerah yang lembab beriklim tropis sampai sub tropis (Butt dan Cluzel, 2013). Pada umumnya profil endapan laterit nikel mempunyai tiga horizon yang terdiri dari zona saprolit pada bagian bawah, zona transisi pada bagian tengah dan zona limonit pada bagian atas. Pada setiap zona selain berpotensi mengandung unsur logam nikel (Ni) juga mengandung unsur lain diantaranya adalah unsur besi (Fe) dengan nilai rata-rata kadar yang bervariasi antara 40–50 % Fe pada zona limonit, 25-40% Fe pada zona transisi dan 10-25% pada zona saprolit (Elias, 2013), oleh karena itu untuk mengetahui potensi

keekonomian dari suatu cebakan selain dilakukan pemetaan terhadap sebaran kadar Ni juga dilakukan pemetaan sebaran kadar Fe pada setiap tahapan eksplorasi laterit nikel. Pemetaan sebaran kadar unsur mineralisasi dapat dilakukan dengan menggunakan beberapa metode interpolasi diantaranya adalah metode deterministik dan metode geostatistik.

Kriging adalah metode interpolasi geostatistik yang terdiri dari beberapa jenis varian diantaranya adalah *ordinary kriging* (OK), *simple kriging*, indikator kriging (IK) dan co-kriging, dengan metode *ordinary kriging* sebagai varian yang paling sering digunakan dalam interpolasi (Yimit, dkk, 2011). Metode kriging secara luas telah digunakan dalam pemetaan endapan bijih

dan estimasi sumberdaya dan cadangan (Daya, 2015). Daya (2015) menggunakan metode *ordinary* kriging untuk estimasi sumberdaya tembaga pada cebakan tipe vein di Chelkureh-Iran. Shahbeik, dkk (2014) membandingkan metode interpolasi *ordinary* kriging dan *inverse distance weighted* dalam evaluasi distribusi kadar Fe berdasarkan estimasi *error* pada cebakan bijih besi di Dardevey-Iran. Yasrebi, dkk (2009) membandingkan kinerja metode interpolasi *ordinary* kriging dan metode *inverse distance weighting* dalam memprediksi variabilitas spasial unsur kimia dalam tanah di Bajgah, provinsi Fars-Iran. Robinson dan Metternicht (2006) membandingkan kinerja metode *ordinary* kriging dan metode *inverse distance weighting* berdasarkan parameter statistik *root mean squared error*.

Indikator kriging (IK) adalah metode geostatistik non-parametrik yang digunakan untuk mengestimasi nilai probabilitas berdasarkan nilai ambang yang spesifik (Antunes dan Albuquerque, 2013., Goovaerts, 1997). Antunes dan Albuquerque (2013) menggunakan metode indikator kriging (IK) untuk evaluasi potensial kontaminasi arsenik di area bekas tambang di Portugal. Piccini, dkk (2012) menggunakan indikator kriging untuk evaluasi probabilitas sebaran kontaminasi nitrat yang melebihi nilai ambang batas (*threshold*). Narany, dkk (2014) menggunakan metode indikator kriging untuk melakukan assesmen kualitas air tanah di Amol-Babol Iran. Arslan (2012) menggunakan *ordinary* kriging dan indikator

kriging untuk menganalisis distribusi spasial salinitas air tanah di Bafra-Turkey.

Tujuan penelitian ini dilakukan untuk memetakan sebaran kadar besi secara lateral dan estimasi sumberdaya besi pada zona limonit menggunakan metode interpolasi Indikator Kriging untuk sebaran probabilitas kadar Fe dan *ordinary* kriging untuk penaksiran kadar Fe dan ketebalan endapan limonit serta estimasi sumberdaya.

2. Metode

Penelitian dilakukan di daerah Blok S, kabupaten Konawe Propinsi Sulawesi tenggara (Gambar 1). Daerah penelitian secara geologi terletak di bagian lengan tenggara pulau Sulawesi dan termasuk dalam lajur Ofiolit Sulawesi Timur yang ditempati oleh kompleks batuan ofiolit yang berumur Kapur Akhir–Oligosen Akhir (Martosuwito, 2012). Komplek batuan ofiolit tersebut tersebar luas mulai dari bagian lengan timur pulau Sulawesi sampai pada beberapa pulau kecil disebelah timurnya, dan secara umum berumur semakin muda kearah timur (Panggabea dan Surono, 2011). Batuan ofiolit di bagian timur Sulawesi ini terdiri dari batuan basa dan ultrabasa yaitu gabro, lherzolite, harzburgite, dunite, piroksinit dan serpentinite (Martosuwito, 2012., Surono, 1997). Menurut Brand, dkk (1998) jenis batuan ultrabasa dapat mengandung 0,2-0,4% unsur Ni, dan dapat menjadi sumber dari pembentukan endapan residu laterit nikel.



Gambar 1. Peta mendala geologi Pulau Sulawesi (Panggabea dan Surono, 2011)

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah hasil dari pemboran eksplorasi pada tahap prospeksi di daerah dengan luas $\pm 9 \text{ km}^2$. Pemboran dilakukan dengan jarak antar titik bor sejauh 500m dengan pola pemboran sistem grid. Jumlah seluruh lubang bor adalah 28 titik dengan ketebalan zona limonit mulai dari 0,5m sampai 30,4m. Pengambilan sampel untuk analisa geokimia dilakukan pada setiap lubang bor dengan interval 1m. Analisa kimia kadar Fe dilakukan dengan menggunakan metode XRF (*X-Ray Fluorescence*), sedangkan koordinat lokasi titik bor dikonfirmasi dengan menggunakan *global positioning system* (GPS).

Pada lokasi yang tidak dilakukan pemboran nilai kadar Fe ditentukan dengan menggunakan metode interpolasi *ordinary kriging* (OK) dan indikator kriging (IK). Hasil interpolasi tersebut selanjutnya digunakan untuk menggambarkan peta variabilitas spasial dan peta probabilitas kadar Fe pada zona limonit di daerah penelitian.

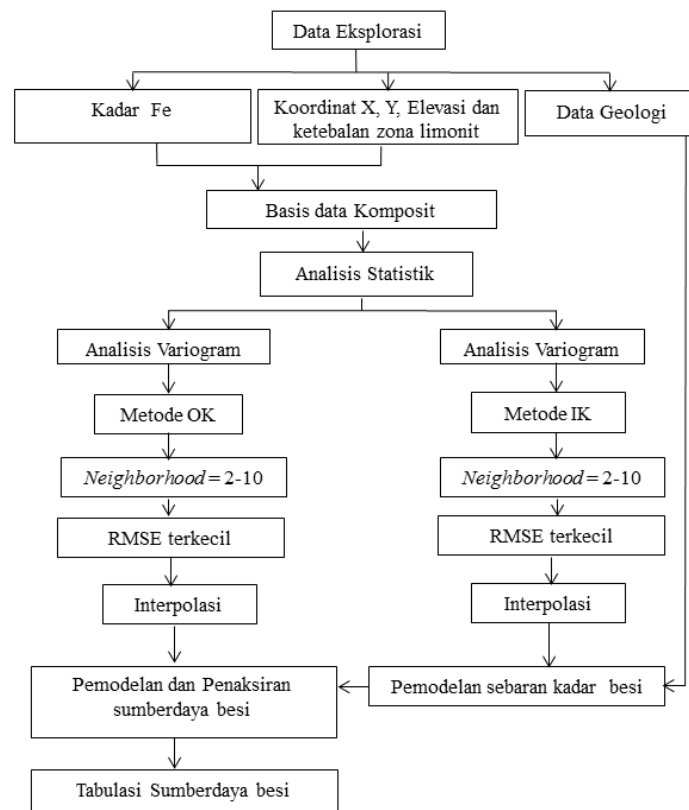
Pengolahan data dimulai dengan Analisa visual dengan melakukan pengecekan nilai data pada setiap lokasi atau titik bor untuk mengidentifikasi kemungkinan kesalahan koordinat dan nilai kadar yang tidak logis pada

setiap data. Dalam proses pengolahan data diperlukan satu nilai komposit pada setiap lokasi data untuk dijadikan basis data, sehingga perlu dilakukan penentuan nilai kadar komposit pada setiap titik bor, yang dihitung dengan persamaan berikut:

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i \cdot g_i}{\sum_{i=1}^n t_i} \quad (1)$$

Keterangan: $\bar{g}$ adalah nilai rata-rata tertimbang t_i adalah ketebalan sampel dan g_i adalah kadar sampel pada interval- i

Selanjutnya deskripsi nilai data disajikan dalam ringkasan statistik meliputi nilai rata-rata, nilai maksimum dan minimum, standar deviasi, *skewness* dan koefisien variansi. Analisis kriging dimulai dari studi variogram yang dilakukan untuk mengetahui korelasi spasial antar data, untuk selanjutnya estimasi nilai kadar Fe dan ketebalan dilakukan dengan metode OK dan analisis probabilitas kadar Fe dilakukan dengan metode IK. Gambar 2, menunjukkan alur pengolahan data spasial pada penelitian ini.



Gambar 2: Diagram pengolahan data spasial

Dalam perhitungannya metode geostatistik kriging memerlukan pemodelan semi variogram untuk mengkuantifikasi variasi spasial dari variable yang terregional (Saby, dkk., 2006). Semi variogram $\gamma(h)$ mengukur rata-rata

variabilitas antara dua titik x dan $x+h$ sebagai fungsi dari jaraknya h . Variogram eksperimental dihitung dengan beberapa jarak lag untuk kemudian dicocokkan dengan model variogram teoritis yang terdiri dari sebelas fungsi yang

berbeda diantaranya adalah model Circular, spherical, exponential, gaussian, hole effect, stable, dll (Narany, dkk., 2014). Dari model variogram tersebut diperoleh struktur variasi spasial dan parameter masukan untuk digunakan dalam perhitungan kriging (Saby, dkk., 2006). Beberapa model variogram yang secara umum sering digunakan dalam estimasi kriging antara lain model *spherical*, *exponential* dan *gaussian* (Oliver, dkk., 2014). Semivariogram eksperimental dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Isaaks dan Srivastava., 1989).

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

Keterangan: $\gamma(h)$ adalah fungsi variogram, $n(h)$ adalah jumlah pasangan data, $Z(x_i + h)$ adalah nilai kadar pada lokasi $(x_i + h)$, $Z(x_i)$ adalah nilai kadar pada lokasi x_i dan h adalah suatu vektor yang menyatakan jarak antara dua titik sesuai dengan nilai lag untuk perhitungan variogram eksperimental.

Pemilihan model variogram dilakukan dengan menggunakan parameter statistik *root mean square error* (RMSE) yang diperoleh dari estimasi *cross validation*, dimana variogram dengan nilai RMSE terkecil dipilih sebagai yang terbaik (Suryani S, dkk, 2016). Nilai RMSE dihitung dengan persamaan berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))^2} \quad (3)$$

Keterangan: $\hat{Z}(x_i)$ adalah nilai estimasi, $Z(x_i)$ adalah nilai pengukuran, dan n adalah jumlah data prediksi.

Metode ordinary kriging (OK) digunakan untuk mengestimasi nilai suatu titik lokasi yang tidak tersampling berdasarkan rata-rata tertimbang dari data disekitarnya. Jika nilai estimasi rata-rata tertimbang yang diberikan pada lokasi yang tidak tersampling $\hat{Z}$ (Isaaks dan Srivastava., 1989):

$$\hat{Z} = \sum_{i=1}^n w_i z_i \quad i=1, \dots, n \quad (4)$$

dengan jumlah faktor pembobot w_i sama dengan satu,

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1 \quad (5)$$

Masing masing bobot dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sum_i^n w_i \cdot c_{ij} + \mu = c_{i,0} \quad (6)$$

Keterangan: $c(i, j)$ adalah kovariansi antar sampel, $c(i, 0)$ adalah kovariansi antara sampel dan titik/blok, dan μ adalah pengali *lagrange*.

Pada metode indikator kriging (IK) nilai data akan diberikan kode nilai 0 dan 1 berdasarkan nilai ambang batas (*threshold*) yang telah ditentukan, sehingga nilai hasil estimasi dari metode IK adalah antara nilai 0 dan maksimum bernilai 1. Fungsi indikator kriging dinyatakan dengan persamaan berikut (Journel, 1983)

$$I(S; Z_k) = \begin{cases} 1, & \text{jika } Z(s) \leq Z_k \\ 0, & \text{jika } Z(s) > Z_k \end{cases} \quad (7)$$

Nilai $\hat{I}(s; Z_k)$ dapat diperoleh melalui proses estimasi kriging dan dapat ditulis sebagai berikut:

$$\hat{I}(s; Z_k) = \sum_{i=1}^n w_i I(s; Z_k) \quad (8)$$

Untuk menilai hasil estimasi dari metode interpolasi dilakukan pengujian perbedaan antara hasil data prediksi dengan data aktual, menggunakan parameter statistik *root mean square standardized prediction error* (RMSP). Nilai prediksi adalah akurat jika nilai RMSP sama dengan satu. Jika nilai RMSP lebih besar dari satu menunjukkan bahwa nilai hasil estimasi *underestimated* dan sebaliknya (Robinson dan Metternicht, 2006). Nilai RMSP dihitung dengan persamaan berikut

$$RMSP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{ME}{\theta^2(x_i)} \right)^2} \quad (9)$$

Nilai *ME* (*mean error*) adalah:

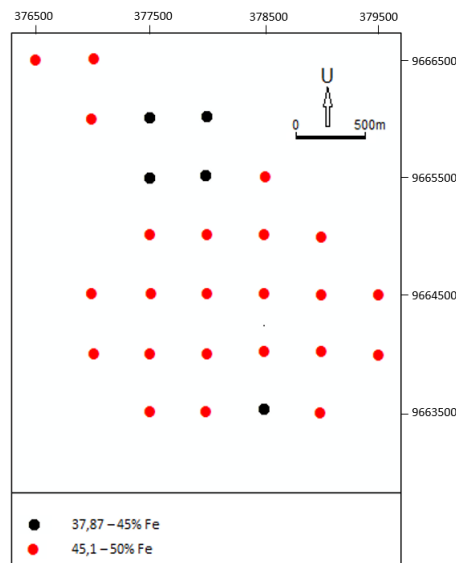
$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i) - \hat{Z}(x_i)] \quad (10)$$

Keterangan: $\theta^2(x_i)$: variansi kriging pada lokasi x_i , $\hat{Z}(x_i)$: nilai estimasi, $Z(x_i)$: nilai pengukuran, dan n adalah jumlah data prediksi.

Estimasi sumberdaya dilakukan dengan menggunakan metode *polygon extended area*, dimana batas pengaruh suatu titik data pada metode ini diekstensikan sejauh setengah jarak terhadap titik data terdekat disekitarnya.

3. Hasil dan Pembahasan

Perhitungan nilai komposit dilakukan dengan menggunakan persamaan (1). Sebaran data komposit dan klasifikasi kadar Fe disajikan pada Gambar 3. Deskripsi statistik kadar komposit Fe dan ketebalan zona limonit digunakan untuk mengetahui karakteristik data di daerah penelitian. Hasil analisis statistik kadar Fe dan ketebalan zona limonit disajikan pada Tabel 1.



Gambar 3: Sebaran data dan klasifikasi kadar Fe

Tabel 1 Analisis statistik kadar Fe dan ketebalan zona limonit

Variabel	CV	Mean	Min	Max	Std deviasi	Skewness	Jumlah data
Fe	0.07	46.87	37.87	50	3.23	-1.33	28
Ketebalan	0.57	11.68	0.50	30.40	6.65	0.67	28

Analisis variogram dilakukan menggunakan geometri isotropi dengan tiga model variogram yang dievaluasi dalam proses analisis structural yaitu, model *spherical*, *exponential* dan *gaussian*. Tabel 2, menyajikan model variogram dan parameter kadar Fe yang diperoleh dari metode OK. Tabel tersebut menunjukkan bahwa model variogram *spherical* mempunyai nilai RMSE terkecil dan dipilih sebagai variogram terbaik untuk selanjutnya digunakan dalam proses estimasi kriging. Gambar 4, menunjukkan model variogram *spherical* untuk kadar Fe, dan ketebalan zona limonit menggunakan metode OK, dan model variogram gaussian untuk metode IK.

Hasil *fitting* variogram terbaik pada kadar Fe dan ketebalan menunjukkan nilai rasio *nugget* terhadap *sill* adalah 27 - 42% (Tabel 2 dan Tabel 3) yang dapat diklasifikasikan sebagai *spatial dependence* medium (Cambardella, dkk., 1994). klasifikasi ini menunjukkan bahwa hasil analisis variogram pada penelitian ini kurang sempurna. Hal ini dapat disebabkan oleh jumlah data yang tidak mencukupi untuk dapat membentuk variogram yang ideal. Menurut Robinson dan Metternicht (2006) untuk mendapatkan bentuk variogram yang ideal diperlukan paling sedikit 100-150 data.

Proses penaksiran dengan metode OK dilakukan dengan menggunakan jumlah maximum 10 data dan minimum 3 data, sedangkan batas jarak dan arah pencarian

(*search area*) ditentukan berdasarkan pada nilai *range* dari variogram terbaik dari masing masing variabel. Interpolasi OK dilakukan dengan metode *point kriging*, dimana penaksiran nilai di suatu titik dilakukan berdasarkan nilai data disekitarnya. Titik yang ditaksir tersebut akan memiliki satu nilai hasil estimasi dan satu nilai variansi estimasi. Untuk penaksiran kadar Fe dan ketebalan zona limonit menggunakan variogram terbaik *spherical*.

Hasil interpolasi OK menunjukkan bahwa sebaran kadar dengan nilai 45–50% Fe (warna merah) menempati $\pm 78,12\%$ dan kadar Fe dengan nilai 38-45% (warna biru) menempati $\pm 21,88\%$ dari luas daerah penelitian (Gambar 5.a). Pada peta tersebut juga menunjukkan bahwa sebaran kadar dengan nilai 45-50% masih terbuka dan menerus kearah barat dan timur dari daerah penelitian. Sedangkan ketebalan endapan limonit cenderung menipis kearah utara dan ketebalan maksimum terletak di bagian selatan daerah penelitian (Gambar 5.c)

Evaluasi hasil estimasi menunjukkan nilai RMSP untuk kadar Fe adalah 1,012637 dan untuk ketebalan limonit adalah 0,970307 (Tabel 2). Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil estimasi kadar Fe adalah *underestimated* sedangkan hasil estimasi ketebalan zona limonit *overestimated* (Robinson dan Metternicht., 2006).

Metode Indikator Kriging (IK) digunakan untuk menaksir probabilitas kadar Fe berdasarkan nilai ambang batas (*threshold*) 45% Fe. Nilai yang

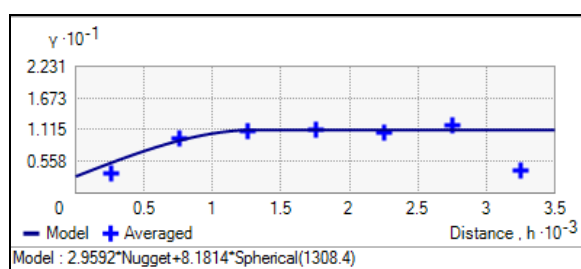
melebihi ambang batas diberi kode 1 dan nilai yang kurang dari ambang batas diberi kode 0. Lokasi yang menunjukkan nilai lebih besar dari ambang batas dikategorikan sebagai lokasi potensial atau anomali. Estimasi probabilitas kadar Fe dilakukan dengan menggunakan model variogram terbaik gaussian. Gambar 5.b menunjukkan peta sebaran probabilitas kadar Fe berdasarkan nilai ambang batas 45% hasil interpolasi metode IK. Peta probabilitas kadar Fe menunjukkan bahwa potensi probabilitas sebaran anomali Fe dengan kadar lebih besar dari 45% menempati sebagian besar ($\pm 83,33\%$) daerah penelitian. Potensi sebaran daerah anomali Fe ini (warna merah) masih terbuka kearah barat, timur dan selatan dari daerah

penelitian. Berdasarkan peta sebaran anomali tersebut maka eksplorasi yang lebih detail dengan target anomali Fe dapat difokuskan pada area dengan warna merah dan dapat di perluas kearah barat, timur dan selatan daerah penelitian.

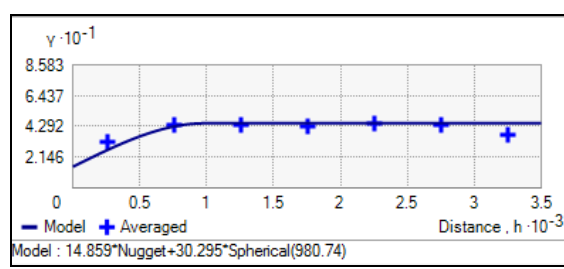
Evaluasi hasil interpolasi probabilitas kadar Fe menunjukkan nilai RMSP adalah 0.964813 (Tabel 3), nilai ini menunjukkan bahwa hasil estimasi *overestimated* (Robinson dan Metternicht., 2006). Hal ini sesuai dengan hasil analisis variogram yang menunjukkan klasifikasi *medium spatial dependence* (Cambardella, dkk., 1994) sehingga menghasilkan interpolasi probabilitas kadar Fe yang kurang akurat.

Tabel 2: Nilai nugget, sill, range RMSE dan RMSP kadar Fe dan Ketebalan dengan metode OK.

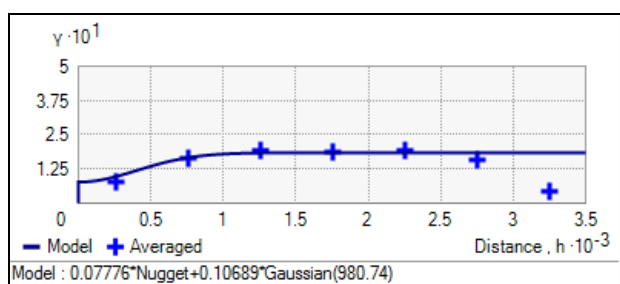
Variabel	Model Variogram	Nugget	Sill	Range	(Nugget/sill) (%)	RMSE	RMSP
Fe	Spherical	2.96	11.16	1308.4	27	2.94398	1.01263
	Exponential	0	11.34	1295.4	0	3.02942	1.00568
	Gaussian	4.8	11.19	1184.6	43	2.97005	1.01656
Ketebalan	Spherical	17.29	45.5	1028.6	38	6.52766	0.97030
	Exponential	10.55	45.9	1028.6	23	6.66045	0.97755
	Gaussian	27.87	45.6	1028.6	61	6.60920	0.97679



(a)



(b)

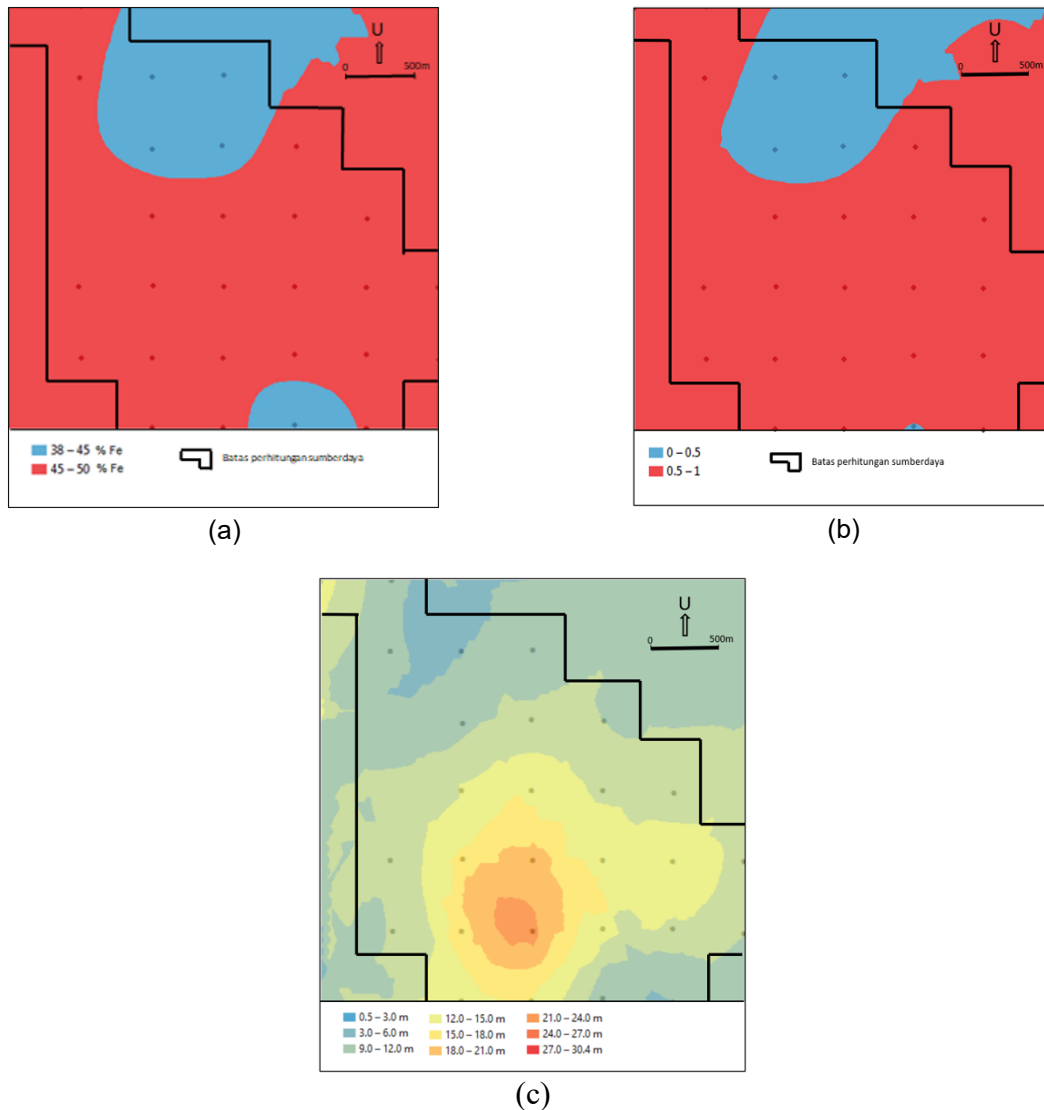


(c)

Gambar 4: Model variogram terbaik spherical pada metode OK (a) untuk kadar Fe dan (b) untuk ketebalan limonit, dan (c) model variogram *gaussian* untuk kadar Fe dengan metode IK

Tabel 3: Nilai nugget, sill, range RMSE dan RMSP kadar Fe pada metode IK.

Variabel	Model Variogram	Nugget	Sill	Range	(Nugget/sill) (%)	RMSE	RMSP
Fe	Spherical	0.04	0.14	1061.9	23	0.38187	0.98094
	Exponential	0	0.18	1000.4	0	0.38122	0.93672
	Gaussian	0.07	0.11	980.7	42	0.37827	0.96481



Gambar 5: (a) Peta distribusi kadar Fe, (b) Peta probabilitas kadar Fe, dan (c) Peta distribusi ketebalan zona limonit

Dalam perhitungan estimasi sumberdaya diasumsikan bahwa setiap blok mempunyai ketebalan dan kadar Fe yang konstan dengan ketebalan dan kadar titik bor dalam blok tersebut.

Data yang digunakan dalam estimasi sumberdaya berdasarkan pada nilai kadar Fe $\geq 45\%$ yang terdapat di dalam batas perhitungan (*outline*) yang telah ditentukan (Gambar 5.a). Jumlah sumberdaya merupakan jumlah seluruh

tonase setiap blok yang diperoleh dari perkalian antara densitas limonit ($1,6 \text{ ton/m}^3$) dengan volume blok, sedangkan volume blok merupakan hasil perkalian antara luas blok (500×500) m^2 dengan ketebalan endapan limonit pada setiap lubang bor. Hasil estimasi sumberdaya Fe di daerah penelitian (endapan limonit sebesar 137.748.000 ton dengan kadar rerata sebesar 46,43 %Ni dan jumlah logam 64.522.110 ton.

4. Kesimpulan

Hasil interpolasi dengan menggunakan metode IK dan OK menunjukkan bahwa sebaran endapan limonit dengan kadar $\geq 45\%$ menempati sebagian besar daerah penelitian dan masih terbuka ke arah timur, barat dan selatan. Sedangkan ketebalan zona limonit menunjukkan

kecenderungan menipis ke arah utara dengan ketebalan maksimum terdapat di bagian selatan daerah penelitian. Dengan asumsi nilai batas kadar anomali 45% Fe dan densitas limonit $1,6 \text{ ton/m}^3$ diperoleh estimasi sumberdaya adalah $\pm 137.748.000$ ton endapan limonit dengan kadar rata-rata 46,43% Fe atau setara dengan $\pm$

64.522.110 ton logam Fe. Evaluasi hasil interpolasi berdasarkan nilai RMSP menunjukkan bahwa hasil taksiran kadar Fe dengan metode OK adalah *underestimated*.

Ucapan Terimakasih

Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada Kaprodi Teknik Pertambangan dan Dekan FTM ITNY atas dukungan yang telah diberikan dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Antunes, I.M.H.R., Albuquerque, M. T. D., 2013, Using indicator kriging for evaluation of arsenic potential contamination in an abandoned mining area (Portugal), *Science of the Total Environment* 442, 545-552.
- Arslan, H., 2012, Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey, *Agricultural Water Management*, 113, pp 57-63.
- Brand, N.W, Butt C.R.M, Elias M., 1998, Nickel Laterite: Classification Features, *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 17(4), 81-88.
- Butt, C. R. M, and Cluzel, D., 2013, Nickel Laterite Ore Deposits: Weathered Serpentinites, *Elements*, Vol.9, pp. 123-128.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak. J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., Konopka, A.E., 1994, Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils, *Soil Science Society of America Journal* 58, 1501-1511.
- Daya, A.A., 2015, Ordinary Kriging for the Estimation of Vein Type Copper Deposit: A Case Study of The Chelkureh Iran, *Journal of Mining and Metallurgy*, 51A (1) (2015) 1-14.
- Elias, M., 2013, Nickel laterite in SE Asia., *East Asia geology exploration Technologies and Mine*.
- Goovaerts, P., 1997, *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*, Oxford Unuversity Press, New York, USA.
- Isaaks, E.H. and R.M. Srivastava., 1989, *Applied geostatistics*, Oxford University Press, New York.
- Journal, A. G., 1983, Non-parametric estimation of spatial distribution, *Mathematical Geology*, 15, 445-468.
- Martosuwito, S., 2012, Tectonostratigraphy of the Eastern part of Sulawesi, Indonesia. In *Relation to The Terrane Origins*, JSD. Geol. Vol.22, pp 199-207.
- Narany, T. S., Ramli, M. F., Aris, A.Z., Sulaiman, W. N. A., and Fakharian, K., 2014, Spatial assessment of groundwater quality monitoring wells using indicator kriging and risk mapping, *Amol-Babol Palin, Iran, Water*, 6, 68-85
- Oliver, M.A and Webster, R., 2014, *A tutorial guide to geostatistics: Computing and modeling variograms and kriging*, Catena 113.
- Panggabean, H dan Surono., 2011, Tektonostratigrafi bagian timur Sulawesi, *Jurnal Sumber Daya Geologi* 21, 5.
- Piccini, C., Marchetti, A., Farina, R., and Francaviglia, R., 2012, Application of Indicator Kriging to Evaluate the Probability of Exceeding Nitrate Contamination Thresholds, *Int. J. Environ. Res.*, 6(4): 853-862.
- Robinson, T.P., G. Metternicht., 2006, Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties, *Computer and Electronics in Agriculture* 50, pp 97-108.
- Saby, N., Arrouays, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Pochot, A., 2006, Geostatistical assessment of Pb in soil around Paris, France, *Science of the Total Environment* 367, 212-221.
- Shahbeik, S., Afzal, P., Moarefvand, P., Qumarsy, M., 2014, Comparison between ordinary kriging (OK) and inverse distance weighted (IDW) based on estimation error. Case study: Dardevey iron ore deposit, NE Iran, *Arab J Geosci* 7:3693-3704.
- Surono., 1997, A provenance study of sandstones from the Meluhu Formation, Southeast Sulawesi, Eastern Indonesia, *Journal of Geology and Mineral Resources* 73: 2-16.
- Suryani, S., Y. Sibarani and M.N. Heriawan., 2016, Spatial analysis 3D geology nickel using ordinary kriging method, *Jurnal Teknologi*, 78:5, 373-379.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., Gazni, R., 2009, Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters, *Research Journal of Biological Sciences* 4 (1): 93-102.
- Yimit, H., Eziz, M., Mamat, M., Tohti, G., 2011, Variations in groundwater levels and salinity in the Ili River irrigation Area, Xinjiang, Northwest China: a geostatistical approach, *International Journal of Sustainable Development and Word Ecology* 18 (1), 55-64.