

# Model Semivariogram dalam Menaksir Sebaran Kadar Ni Menggunakan Metode *Ordinary Kriging* (Studi Kasus Endapan Nikel Laterit di PT Vale Indonesia Tbk)

Fahrul Usman<sup>1</sup>, Georgina Maria Tinungki<sup>2</sup>, Erna Tri Herdiani<sup>3</sup>  
Program Studi Statistika, Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin<sup>1</sup>  
Departemen Statistika, Universitas Hasanuddin<sup>2,3</sup>  
fahrul.math25@gmail.com<sup>1</sup>

## Article Info

### Article history:

Submitted September 2021  
Revised October 2021  
Accepted April 2022  
Published April 2022

### Keyword:

*Kriging*  
*Ni Content*  
*Ordinary Least Square*  
*Semivariogram*

## ABSTRACT

Geostatistics is a method in statistical science used in spatial distribution. Geostatistics contains correlations between data samples in which there is a regionalized variable called kriging. Kriging is able to provide excellent estimates by minimizing error variance through correlation between drill point samples. Model identification in the semivariogram obtained the selected model, namely the exponential model for the limonite layer, the spherical model for the saprolite layer, and the gaussian model for the bedrock layer. The model was chosen which shows the RMSE value for the limonite layer of 0.13, for the saprolite layer of 0.52, and the bedrock layer of 0.15. The smoothing of the model on the curve detected by ordinary least squares (OLS) gives very good results. This is evidenced by the asymptotically approaching sill and the range is the same as the distance where the curve model is approaching the 95% maximum. Thus, this study conclusively proves that by selecting the right model in the experimental semivariogram, it provides good and accurate predictions of Ni levels.

## Kata Kunci:

Kadar Ni  
Kriging  
Ordinary Least Square  
Semivariogram

## ABSTRAK

Geostatistik merupakan suatu metode dalam ilmu statistika yang digunakan dalam distribusi keruangan. Geostatistik memuat korelasi antar sampel data yang di dalamnya terdapat variabel terregionalisasi yang disebut kriging. Kriging mampu memberikan taksiran yang sangat baik dengan meminimalkan variansi kesalahan melalui korelasi antar sampel titik bor. Identifikasi model dalam semivariogram diperoleh model terpilih yaitu model eksponensial untuk lapisan limonit, model sferikal untuk lapisan saprolit, dan model gaussian untuk lapisan bedrock. Model tersebut terpilih yang menunjukkan nilai RMSE untuk lapisan limonit sebesar 0.13, untuk lapisan saprolit sebesar 0.52, dan lapisan bedrock sebesar 0.15. Penghalusan model pada kurva dideteksi oleh ordinary least square (OLS) yang memberikan hasil yang sangat baik. Hal ini dibuktikan dengan model yang sudah mendekati sill secara asimtotik dan range sama dengan jarak dimana model kurva sudah mendekati 95% maksimum. Dengan demikian, studi ini secara meyakinkan membuktikan bahwa dengan pemilihan model yang tepat dalam semivariogram eksperimental maka memberikan hasil prediksi kadar Ni yang baik dan akurat.

## 1. PENDAHULUAN

Nikel merupakan salah satu produksi tambang yang banyak digunakan hingga saat ini dalam berbagai aplikasi dan industri, seperti pelapisan baja, pelapis tembaga, industri baterai, elektronik, aplikasi dirgantara, industri tekstil, dan berbagai fungsi lainnya. Kegiatan untuk memperoleh nikel secara terus menerus dilakukan oleh industri pertambangan. Oleh karena itu, perlu dilakukan eksplorasi sumber daya nikel dalam memperoleh hasil yang optimal. Hasil yang optimal dapat diketahui dengan menggunakan salah satu pendekatan dalam statistika spasial yaitu secara geostatistik. Geostatistik merupakan cabang ilmu dari statistika terapan yang digunakan dalam industri mineral (Suryani dkk., 2016) yang digunakan untuk melakukan perhitungan cadangan mineral, seperti emas, perak, platina, dan sebagainya. Hal yang paling penting dalam perhitungan cadangan adalah penaksiran. Salah satu metode penaksiran yang digunakan untuk menangani variabel teregionalisasi (*regionalized variable*). Variabel teregionalisasi adalah variabel yang mempunyai nilai berbeda (bervariasi) dengan berubahnya lokasi/tempat. Metode penaksiran yang digunakan untuk menangani variabel teregional disebut dengan metode kriging (Rosalina dkk, 2016). Kriging merupakan generalisasi dari regresi linier klasik yang tidak menganggap variat (data observasi) bersifat independen dan titik observasi bukan suatu sampel random. Kriging menghasilkan seperangkat bobot yang meminimalkan variansi penaksiran sesuai dengan konfigurasi conto di sekitar blok dan sifat mineralisasi. Sifat mineralisasi dinyatakan dalam fungsi variogram yang mengkuantifikasikan korelasi ruang antar conto. Dua hasil utama yang diperoleh dari teknik penaksiran ini adalah taksiran kriging dan variansi kriging atau simpangan baku kriging sebagai ukuran reliabilitas (Bargawa, 2018). Pada tahun 1960an, Kriging dikembangkan dalam geostatistika oleh Georges Matheron.

Pada perkembangannya banyak metode kriging yang dikembangkan untuk menangani berbagai macam kasus yang ada dalam data geostatistik salah satu kasus yaitu terdapat data kandungan mineral tersampel yang tidak memiliki trend (kecenderungan) tertentu. Metode kriging yang sesuai untuk menyelesaikan kasus tersebut antara lain simple kriging dan ordinary kriging. Simple kriging digunakan pada saat rata-rata populasi diketahui, sedangkan pada *ordinary kriging* digunakan pada saat rata-rata populasi tidak diketahui. Namun, pada penelitian ini akan dibahas tentang metode ordinary kriging karena pada kenyataannya rata-rata populasi tidak dapat diketahui. Metode ordinary kriging dapat digunakan apabila data yang ada merupakan data yang bersifat stasioner. Suatu data dikatakan memiliki sifat stasioner apabila data tersebut tidak memiliki kecenderungan terhadap trend tertentu dengan kata lain, apabila fluktuasi data berada disekitar suatu nilai rata-rata yang konstan maka tidak tergantung pada waktu dan variansi dari fluktuasi tersebut. Pada geostatistika, terdapat suatu perangkat dasar dari geostatistika untuk visualisasi, pemodelan dan eksploitasi autokorelasi spasial dari variabel teregionalisasi yang biasa dikenal sebagai semivariogram. Model semivariogram untuk mengukur variabilitas spasial dan kestasionerannya serta untuk mengestimasi cadangan mineral. Jenis model semivariogram yang akan digunakan pada penelitian ini yaitu model sferikal, model eksponensial, dan model gaussian. Lapisan laterisasi pada endapan nikel laterit terdapat tiga lapisan yaitu limonit, saprolit, dan bedrock (batuan dasar). Model terbaik yang didapatkan pada penelitian ini yaitu model eksponensial untuk lapisan limonit, model sferikal untuk lapisan saprolit, dan model gaussian untuk lapisan bedrock. Dengan pemilihan model semivariogram yang terbaik maka hasil interpolasi sumberdaya mineral akan baik dan akurat dalam prediksinya.

Setelah diperoleh model semivariogram dilakukan analisis menggunakan metode *ordinary kriging*. *Ordinary kriging* merupakan penaksir linear bias terbaik. Metode ini memberikan nilai prediksi spasial baik dan akurat. Hasil dari prediksi spasial digunakan dalam penentuan lokasi titik bor selanjutnya yang berpotensi memiliki kadar Ni yang tinggi. Data titik bor di dalam penelitian ini terdiri dari 134 lubang bor eksplorasi endapan nikel laterit dengan jarak spasi setiap titik bor 25 m. Software yang digunakan untuk menganalisis sebaran kadar Ni pada penelitian ini yaitu R Studio. Salah satu software yang mampu memberikan hasil prediksi dan tampilan visualisasi yang baik. *Ordinary kriging* dapat merupakan metode alternatif dalam penaksiran cadangan mineral terutama dalam kasus mean dan kovarian yang yang tidak memerlukan asumsi.

Dengan demikian, hasil prediksi yang baik dimulai dengan pemilihan model semivariogram yang terbaik. Model semivariogram *eksponensial*, *spherical*, dan *gaussian* pada kasus pertambangan nikel ini dapat menjadi solusi alternatif dalam memprediksi sebaran kadar Ni pada endapan nikel laterit yang berada di PT Vale Indonesia Tbk.

## 2. METODE PENELITIAN

### 2.1. Semivariogram

Semivariogram dapat dihitung sebagai penduga yang menghitung (setengah) nilai rata-rata selisih kuadrat antara semua pasangan pengukuran  $z(s_i)$  dan  $z(s_i + h)$  yang dipisahkan oleh vektor perpindahan  $h$  (Cressie, 1993)

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(s_i) - z(s_i + h)]^2 \quad (1)$$

dimana  $s_i$ : lokasi titik sampel,  $z(s_i)$ : nilai pengamatan pada lokasi  $s_i$ ,  $h$ : jarak antara dua titik sampel ( $s_i, s_i + h$ ): pasangan titik sampel yang berjarak  $h$ ,  $|N(h)|$ : banyaknya pasangan berbeda yang memiliki jarak  $h$ .

### 2.2. Identifikasi Model

Beberapa model semivariogram teoritis baku yang digunakan berdasarkan data adalah sebagai berikut (Nielsen, 2009):

#### 1. Model Sferikal

Persamaan berikut ini menjelaskan model *spherical* sebagai berikut :

$$\gamma^*(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ 1.5 \left( \frac{h}{r} \right) - 0.5 \left( \frac{h}{r} \right)^3 \right\} & 0 < h < r \\ C_0 + C & h \geq r \end{cases}$$

#### 2. Model Eksponensial

Model eksponensial terjadi peningkatan yang sangat curam dan mencapai nilai *sill* secara asimtotik dan dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\gamma^*(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{3h}{r^2} \right) \right\} & h > 0 \end{cases}$$

#### 3. Model Gaussian

Model gaussian merupakan model bentuk kuadratik dari eksponensial yang menghasilkan bentuk parabolik pada jarak yang dekat. Model ini menggambarkan fenomena variabel yang bersifat kontinu secara ekstrim. Model gaussian dapat dirumuskan pada persamaan berikut :

$$\gamma^*(h) = \begin{cases} 0 & h = 0 \\ C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left( -\frac{3h^2}{r^2} \right) \right\} & h > 0 \end{cases}$$

### 2.3. Metode Least Square

Parameter model dapat diperkirakan secara berulang, metode *least square* non linier berfungsi untuk meminimalkan perbedaan kuadrat antara eksperimen semivariogram dan model

yang dianggap sebagai fungsi dari vektor parameter  $\theta$ , dimana  $\theta = [C_0 C_1 R]^T$ . *Least square* merupakan bagian dari model yang difitikan yang berperan untuk meminimumkan jumlah perbedaan kuadrat dari  $R(\theta)$

$$R(\theta) = \sum_{i=1}^k \lambda_i^2 [\hat{\gamma}(h) - \gamma^*(\theta, h)]^2$$

$$\min \sum_{i=1}^k \lambda_i^2 [\hat{\gamma}(h) - \gamma^*(\theta, h)]^2 \quad (2)$$

di mana estimasinya menggunakan formula *ordinary least square*

$$R(\theta)_{OLS} = \sum_{i=1}^k [\hat{\gamma}(h) - \gamma^*(\theta, h)]^2$$

$$\min \sum_{i=1}^k [\hat{\gamma}(h) - \gamma^*(\theta, h)]^2 \quad (3)$$

di mana  $\hat{\gamma}(h)$  adalah semivariogram eksperimental antara dua titik yang dipisahkan oleh vektor  $h$ ;  $\gamma^*(\theta, h)$  adalah semivariogram eksperimental yang berdasarkan sampel titik dalam model (endapan nikel laterit);  $k$  adalah titik sumur pemboran yang digunakan pada setiap lokasi yang diukur;  $\lambda_i$  adalah bobot kriging yang terkait dengan pengamatan di lokasi  $s_i$  terhadap  $s_0$ .  $C(0)$  adalah fungsi kovarians untuk perpindahan vektor  $h = 0$ , dan  $C_0$  adalah parameter dalam model semivariogram. Perhatikan bahwa  $C(0) = \sigma^2$ , merupakan varians dari variabel stokastik.

#### 2.4. Pendekatan Kriging Biasa

Kriging merupakan penaksir tak bias linier terbaik dalam geostatistik yang mengacu pada keluarga metode regresi kuadrat terkecil (Isaaks dan Srivastava, 1989; Webster dan Oliver, 2007). Ini membantu untuk memperkirakan nilai variabel yang tidak diketahui di lokasi yang tidak teramati berdasarkan nilai yang diketahui yang diamati di lokasi sekitarnya. Rumus umum kriging biasa (OK) untuk memperkirakan nilai yang tidak tersampel dari variabel  $Z$  dalam ruang diberikan sebagai berikut:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (4)$$

di mana  $\hat{Z}(s_0)$  merupakan taksiran titik yang tidak tersampel dari variabel  $Z$  (endapan nikel laterit dalam penelitian ini) pada lokasi yang diinginkan  $s_0$ ;  $\lambda_i$  adalah bobot kriging yang terkait dengan pengamatan di lokasi  $s_i$  terhadap  $s_0$ ;  $n$  menunjukkan jumlah titik data yang diamati. Bobot kriging bergantung pada model semivariogram yang dipasang.

Kondisi ketidakbiasan dalam estimasi kriging dipastikan dengan memberlakukan batasan pada bobot kriging yang dinyatakan dengan:

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

Namun, kondisi ketidakbiasan yang ditunjukkan dalam persamaan (5) tidak dapat memastikan mendapatkan bobot kriging positif dalam solusi algoritma kriging. Adapun bentuk matriks dari sistem persamaan *ordinary kriging* adalah:

$$\begin{bmatrix} C(0) & C(s_1 - s_2) & C(s_2 - s_1) & C(0) & \dots & C(s_n - s_1) & 1 & \dots & 1 & \dots & \dots & C(s_1 - s_n) \\ 1 & 1 & \dots & C(0) & 1 & \dots & 1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C(s_0 - s_1) & C(s_0 - s_2) & \dots & C(s_0 - s_n) & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

di mana  $C(0)$  merupakan matriks kovariansi antara variabel tersampel pada lokasi  $n$  dengan variabel tersampel pada lokasi  $n$ ,  $C(s_0 - s_n)$  adalah vektor variansi kovariansi antara variabel tersampel pada lokasi  $n$  dengan variabel yang akan diestimasi di lokasi tidak tersampel,  $m$  merupakan parameter pengali lagrange.

Selanjutnya diperoleh persamaan variansi residual yang minimum dalam bentuk kovariogram sebagai estimator *ordinary kriging*:

$$\sigma_R^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i C_{i0} - m \quad (7)$$

Variansi estimator minimum biasa disebut dengan variansi estimator *ordinary kriging*, dengan demikian sifat best dimiliki oleh metode *ordinary kriging*.

## 2.5. Validasi Silang

Akurasi dan presisi interpolasi spasial dievaluasi melalui pendekatan validasi silang. Kriteria yang paling penting meliputi: *Mean Bias Error* (MBE), *Mean Absolute Error* (MAE), *Mean Squared Error* (MSE) dan *Root Mean Squared Error* (RMSE). MAE dan RMSE adalah di antara ukuran kinerja model "terbaik" secara keseluruhan (Willmott, 1982 dan Webster dan Oliver, 2001). RMSE memberikan ukuran kesalahan, tetapi sensitif terhadap outlier karena menempatkan banyak bobot pada kesalahan besar (Chai dan Draxler, 2014). MAE memberikan ukuran absolut dari ukuran kesalahan dan kurang sensitif terhadap nilai ekstrim (Delbari dkk., 2013). Definisi MAE, MBE dan RMSE adalah sebagai berikut:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z^*(s_i) - z(s_i)| \quad (8)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(s_i) - z(s_i)) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(s_i) - z(s_i))^2} \quad (10)$$

di mana  $z(s_i)$  dan  $z^*(s_i)$  masing-masing adalah nilai yang diamati dan diprediksi. Untuk melihat bagaimana nilai prediksi yang cocok dengan nilai yang diamati maka RMSE dapat digunakan. Semakin kecil nilai dari RMSE maka akan semakin baik.

## 2.6. Data

Data yang dikumpulkan merupakan data tertutup (sekunder) endapan nikel laterit dengan 134 titik pemboran di area *west block* selama satu tahun terakhir (2020). Data tertutup diperoleh dari hasil aktivitas pertambangan (pengeboran) yang dilakukan oleh tim geologi perusahaan. Ada

tiga jenis data yang diklasifikasikan yaitu data assay merupakan data lengkap secara keseluruhan (6172) data memuat unsur senyawa mineral, data collar yang menampilkan jumlah sampel (134) data berdasarkan lubang bor, data geologi merupakan data tampilan yang berdasarkan kadar yang dipilih untuk di olah. Ketiga jenis data tersebut, data yang terlengkap digunakan sebagai acuan adalah data assay. Data collar dan data geologi merupakan bagian dari data assay yg dipilih untuk dimasukkan ke dalam *spreadsheet*.

Hasil dari data assay yaitu menggunakan data collar yang diinterpretasikan melalui gambar adalah sebagai berikut:

Tabel 1. Data Titik Bor Endapan Nikel Laterit

No.	BHID	Easting (X)	Northing (Y)	Elevasi (Z)	Kedalaman (m)	Kadar Ni (%)	Layer
1	C150341Z	8924,499	12951,88	445,8962	39	0,579	LIM
2	C150342Z	9024,351	13050,06	488,5194	44	0,507	LIM
3	C150344Z	8924,868	13049,53	482,3866	46	0,619	LIM
4	C150385Z	8688,283	12912,03	447,5592	33	0,798	LIM
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
6172	C364548	8812,806	12812,61	443,4227	64	0,308	BRK

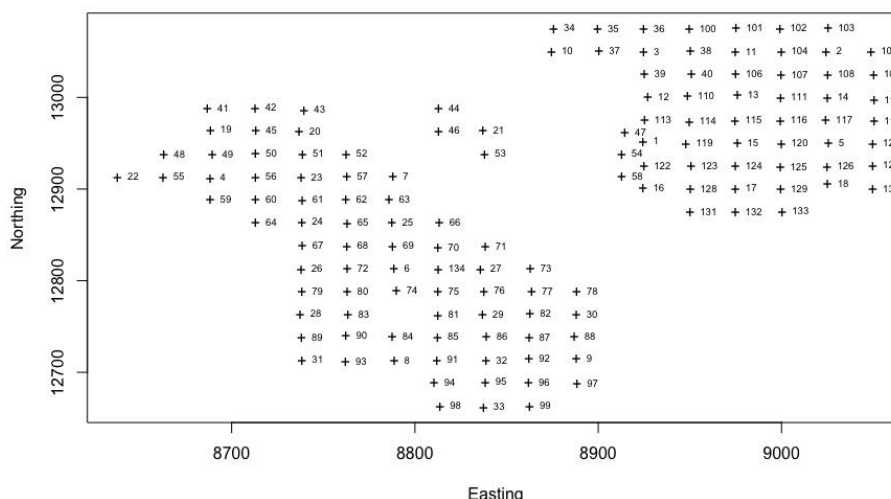
Keterangan :

Sumber: Data titik bor PT. Vale Indonesia Tbk tahun 2020

BHID = Borehole Identity (Nama lubang bor); LIM = merupakan singkatan dari lapisan atas (Limonit); SAP = singkata dari (Saprolit); BRK = singkatan dari (Bedrock).

X: Titik koordinat absis (meter); Y : Titik koordinat ordinat (meter); Z : Elevasi topografi muka bumi (meter); Ni : Kandungan Nikel (%). Kolom  $x$  dan  $y$  menyatakan lokasi (posisi, koordinat) titik sampel dan  $z = z(x, y)$  menyatakan pengamatan di titik  $(x, y)$ , di mana  $z$  adalah kandungan Ni pada titik  $(x, y)$ .  $Ni$  merupakan variabel utama dalam penelitian ini dan X, Y, Z merupakan variabel terregional sebagai penghubung variabel kadar  $Ni$ . Dengan demikian, Tabel 1 merepresentasikan variabel terregional, kedalaman, dan layer. Dari 134 titik bor kadar Ni terdiri dari tiga layer yaitu limonit, saprolit, dan bedrock yang diketahui dari kedalaman (m). Jadi, total keseluruhan data adalah sebanyak 6172.

Dibawah ini merupakan lokasi titik bor yang berada pada area *west block* PT. Vale Indonesia Tbk, Sorowako, Luwu Timur



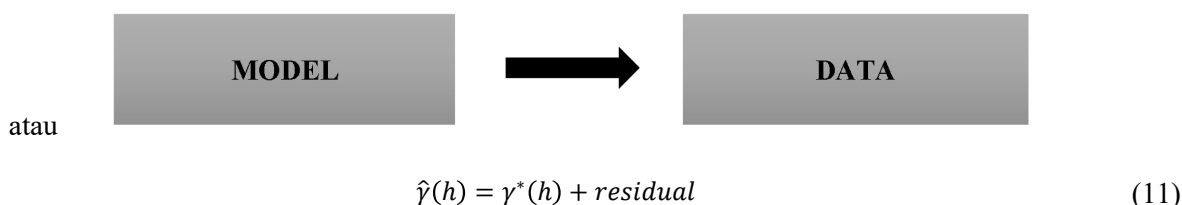
Gambar 1. Persebaran endapan nikel laterit Ni pada ruang dimensi dua (2-D)

Gambar 1 terdiri dari tiga bagian pemboran yaitu sisi kiri (barat daya), tengah, dan sisi kanan (timur laut). Terdapat empat titik pemboran yang terpisah oleh dua bagian, barat dan timur, dan empat titik bor terpisah berada di daerah tengah yang tidak memungkinkan untuk ditambang, dikarenakan terdapat aliran air danau sebagai pemisah. Jarak antar titik bor adalah 25 m baik pada

arah timur-barat maupun utara-selatan. Penambangan dilakukan dengan jarak yang telah ditentukan ke seluruh area yang telah direncanakan (seragam) dengan titik *grid*. Seluruh area pemboran direncanakan berdasarkan analisis geologi.

## 2.7. Desain Penelitian

Inputan desain penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut (Darwis, 2012):



Di mana  $\hat{\gamma}(h)$  : data,  $\gamma^*(h)$  : fit model, dan *residual* : error.

Adapun metodologi penelitian yang dilakukan dalam inputannya sebagai berikut:



Alur penelitian dimulai dengan menafsirkan data dalam bentuk plot, histogram, secara deskriptif untuk melihat sebaran data dan melihat normalitas suatu data. Setelah itu, melakukan perhitungan yang kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik. Grafik yang telah ditentukan akan dibentuk suatu model berdasarkan pengamatan dengan menentukan nilai *range*, *sill*, dan *nugget*. Ukuran visual akan memberikan kesalahan jika ditampilkan dalam kesemua model (model spherikal, model eskponensial, dan model gaussian), dengan meminimalkan kesalahan model maka dilakukan fitting menggunakan salah satu metode yang mengabaikan daya tarik visual yaitu *least square*. Kesemua model akan tepat berada pada posisinya masing-masing. Model semivariogram yang diperoleh dipakai dalam menafsirkan kadar endapan nikel laterit. Kemudian, model semivariogram dilakukan pengujian untuk membuktikan bahwa model yang dipakai akurat dengan cukup melihat nilai *root mean square error* (RMSE). Hasil tersebut diimplementasikan untuk sampel yang tidak diukur.

## 3. HASIL DAN ANALISIS

### 3.1. Gambaran Umum Endapan Nikel Laterit

Secara administratif daerah pengambilan sampel terletak di empat Desa, Kecamatan Nuha, Kabupaten Luwu Timur, Provinsi Sulawesi Selatan. Letak astronomis daerah pengambilan sampel berada pada posisi 2°18'00" - 2°39'00" Lintang Selatan dan 121°3'00" - 121°34'30" Bujur Timur dengan luas wilayah 808,27 km<sup>2</sup>. Kecamatan Nuha menempati urutan kelima kecamatan terluas di Kabupaten Luwu Timur dengan persentase sebesar 11,64 persen. Kecamatan Nuha berbatasan dengan Kecamatan/Provinsi sebagai berikut: Sebelah Timur: Kecamatan Towuti, Sebelah Barat: Kecamatan Wasuponda, Sebelah Selatan: Kecamatan Towuti, dan Sebelah Utara: Provinsi Sulawesi Tengah. Kecamatan Nuha terdiri dari empat desa (Sorowako, Nikkel, Matano, Nuha) dengan satu kelurahan (Kelurahan Magani).

Tabel 2 memperlihatkan deksripsi data kadar Ni dari  $n = 134$  lubang bor. Daerah endapan nikel laterit terbagi menjadi tiga lapisan laterisasi, yaitu limonit, saprolit, dan bedrock. Total data keseluruhan sebanyak 6172. Perhitungan semivariogram eksperimental memberikan model semivariogram anisotropik tetapi model tersebut cukup mewakili dengan isotropik tunggal. Karena sebaran endapan nikel laterit dibawah tanah sifatnya acak maka secara umum sifat tersebut cukup dapat diwakilkan dengan pemodelan secara isotropik tunggal.

Tabel 2. Deskripsi Data Kadar Ni pada Daerah Penelitian dalam Satuan Persentase(%)

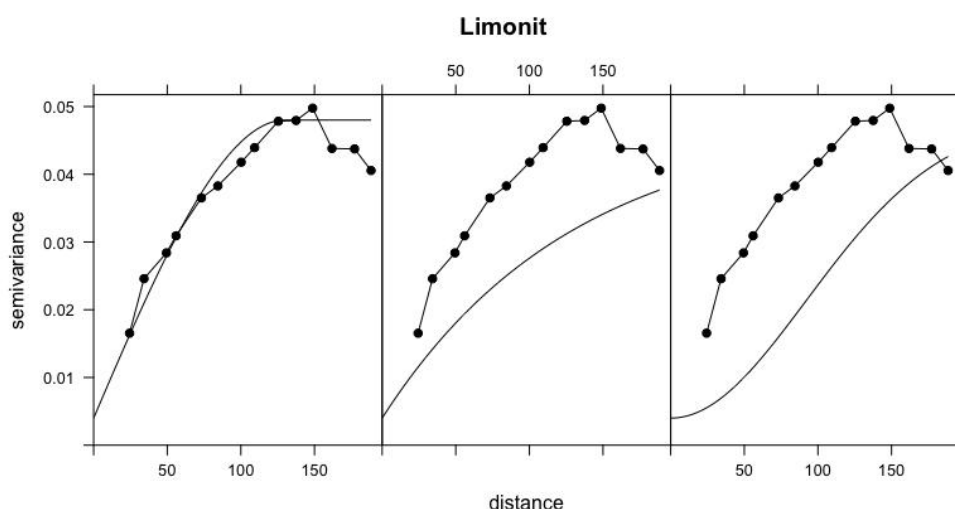
Lapisan Laterisasi	N	Min	Max	Median	Mean	Standar Deviasi	Varians
Limonit	130	0.65	1.71	1.15	1.16	0.20	0.04
Saprolit	128	0.47	1.59	1.43	1.59	0.59	0.35
Bedrock	127	0.23	0.51	0.48	0.51	0.15	0.02

Banyaknya jumlah titik eksplorasi kadar Ni secara keseluruhan adalah 134 titik bor. Jumlah titik bor yang memiliki lapisan limonit, saprolit, dan bedrock masing-masing adalah 130, 128, dan 127 titik bor. Dari total 134 titik bor tersebut, terdapat titik bor dengan kandungan Ni yang tidak terdeteksi, terdapat nilai pada kedalaman tertentu tidak disertakan dalam pendeskripsian. Alternatif solusi adalah dihilangkan karena tidak mempengaruhi deskripsi suatu data. kemudian, untuk nilai kadar Ni pada lapisan limonit minimal 0.65 dan maksimal 1.71 sedangkan lapisan saprolit minimal 0.47 dan maksimal 1.59 dan lapisan bedrock yang memiliki nilai kadar Ni yang paling kecil diantara kedua lapisan tersebut yaitu limonit dan saprolit. Dengan demikian, kadar limonit dapat dipastikan mempunyai nilai kadar yang paling besar.

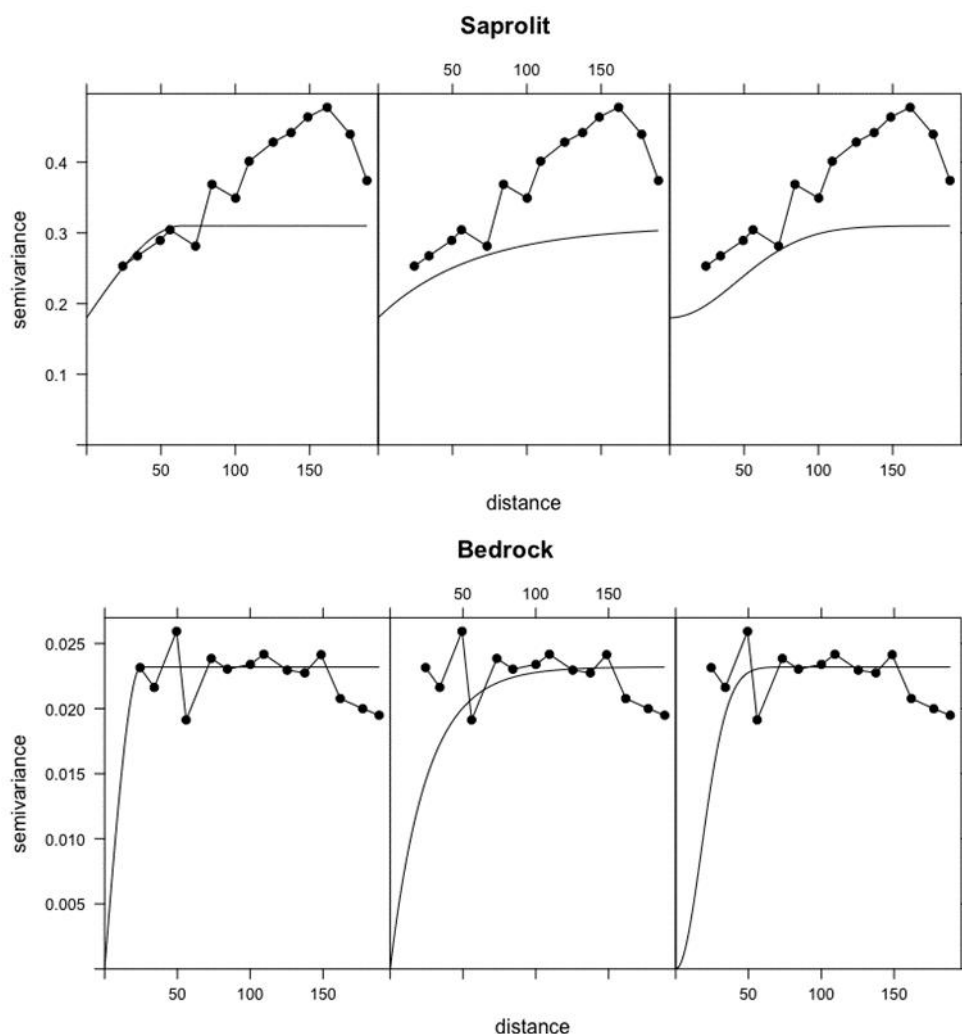
Apabila kita melihat nilai mean di setiap lapisan, maka kadar Ni di lapisan saprolit yang terbesar. Hal ini seiring dengan standar deviasi dan variansi yang menunjukkan lebih kecil daripada nilai rata-rata kadar Ni sehingga dapat disimpulkan data kadar Ni di lapisan saprolit seragam. Begitupun, juga di lapisan limonit dan bedrock yang menunjukkan hal yang sama.

### 3.2. Pemodelan Semivariogram

Setelah dilakukan perhitungan secara empiris maka selanjutnya adalah dilakukan pemasangan semivariogram dengan melihat korelasi antar garis.







Gambar 2. Pemodelan semivariogram menggunakan visual pengamatan dengan tiga model, bagian kiri (model spherikal), tengah (model eksponensial), dan bagian kanan (model gaussian).

Pengamatan yang dilakukan menggunakan visual tidak dapat dijadikan sebagai kesimpulan dalam penaksiran, karena tingkat keakuratan sangatlah tidak baik pada model yang lain, sehingga perlu melakukan fitting model untuk meminimalisir error yang terjadi. Hanya lapisan bedrock yang tidak memiliki nugget. Model tidak mendekati *sill* secara asimtotik (*sill* = asimtot datar) dan range sama dengan jarak dimana model (kurva) untuk seluruh lapisan hanya berlaku pada model eksponensial dan model bedrock yang tidak mencapai 95% maksimum. Laju kenaikan model eksponensial dan model bedrock lebih lambat dibanding model spherikal. Gradien (kemiringan) kurva disekitar titik pangkal sudah mendekati baik, sedangkan di titik lain kurva terletak dibawah atau diatas data. Untuk mengatasi masalah *sill*, *nugget*, dan *range* maka dilakukan fitting model seperti yang terlihat hasil dari Tabel 4 dan Gambar 3.

Tabel 3. Nilai Model Semivariogram yang Belum Difitkan

Zona Laterisasi	Tipe	Range	Partial sill	Nugget	Metode
Limonit	Spherical	130	0.044	0.004	Visual
	Ekspensial	130	0.044	0.004	Visual
	Gaussian	130	0.044	0.004	Visual
Saprolit	Spherical	64	0.13	0.18	Visual
	Ekspensial	64	0.13	0.18	Visual
	Gaussian	64	0.13	0.18	Visual
Bedrock	Spherical	25	0.0232	0	Visual

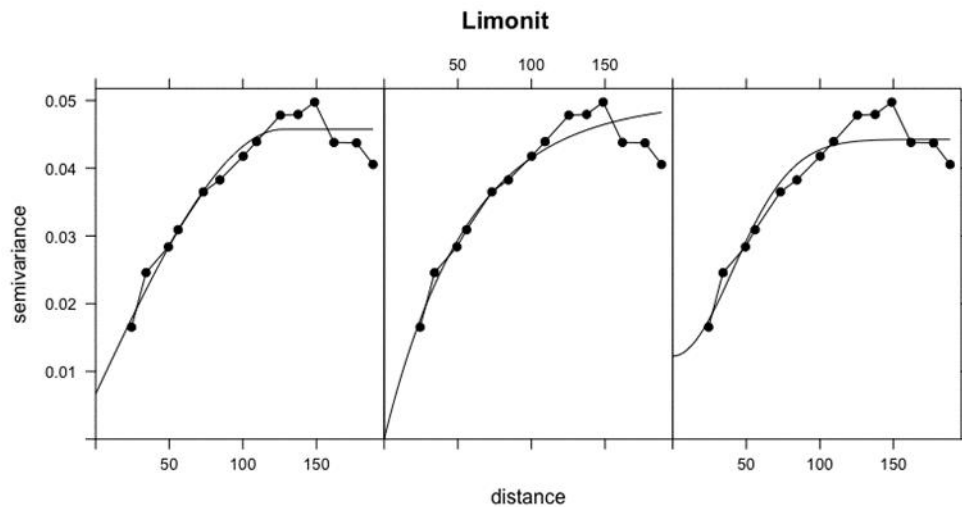
Ekspensial	25	0.0232	0	Visual
Gaussian	25	0.0232	0	Visual

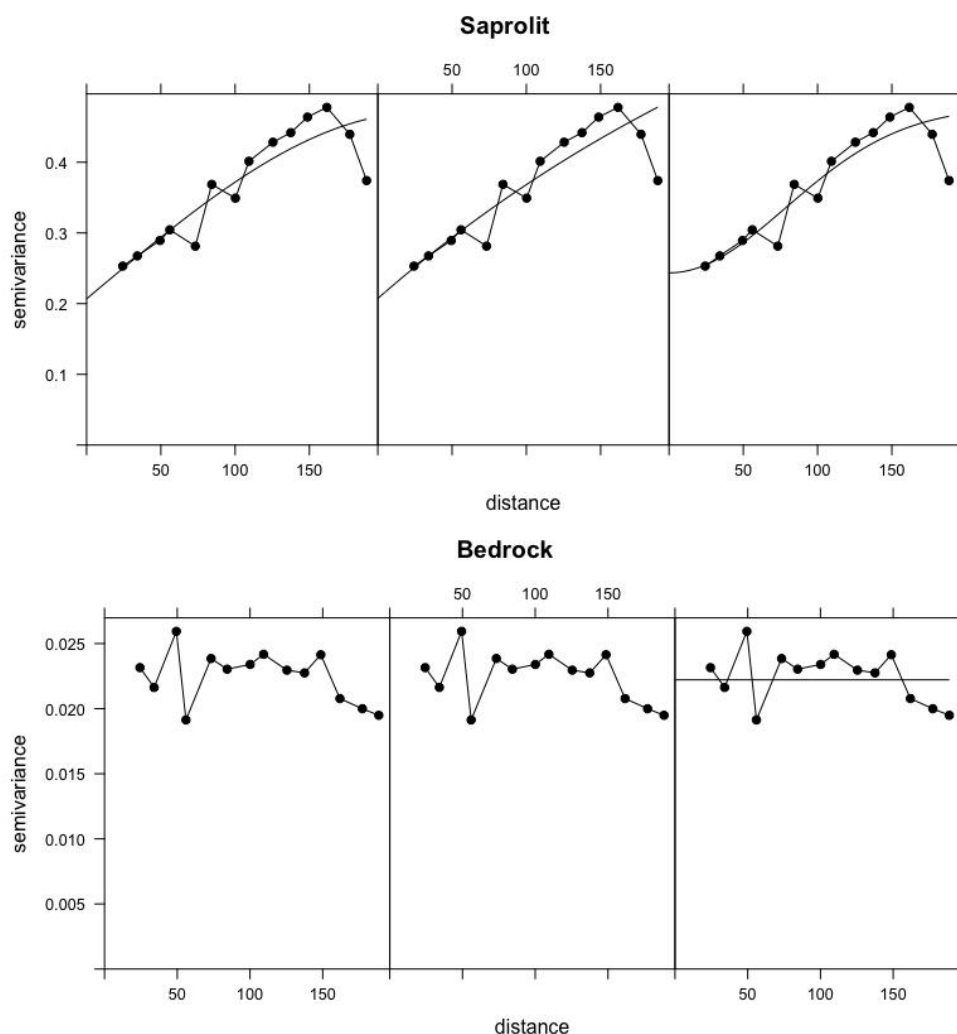
Nilai model pada Tabel 3 merupakan nilai model yang dilakukan secara visual melalui pengamatan yang dianalisis pada grafik model semivariogram. Hasil yang diperoleh bahwa secara visual tingkat keakuratan kurang baik sehingga diperlukan suatu formula untuk meminimalkan error dalam semivariogram. Salah satu metode parametrik untuk meminimalkan error adalah *least square*, sebagaimana yang terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Nilai Model Semivariogram yang Telah Difitkan

Zona Laterisasi	Tipe	Range	Partial sill	Nugget	Metode
Limonit	Spherical	127.40	0.039	0.0067	OLS
	Ekspensial	56.40	0.050	0	OLS
	Gaussian	57.42	0.032	0.012	OLS
Saprolit	Spherical	222.89	0.263	0.207	OLS
	Ekspensial	360.10	0.664	0.207	OLS
	Gaussian	111.36	0.235	0.244	OLS
Bedrock	Spherical	25	0.0232	1	OLS
	Ekspensial	25	0	2.29	OLS
	Gaussian	25	0	0.022	OLS

Perbandingan kedua Tabel 3 dan Tabel 4, terlihat bahwa keakuratan nilai dari *range*, *partial sill*, dan *nugget* memberikan solusi yang akurat dibandingkan menggunakan visual pengamatan akibatnya model semivariogram menjadi sangat baik. Hasil ini dapat diperjelas pada Gambar 3 berikut.





Gambar 3. Semivariogram eksperimental dan model semivariogram eksponensial, spherikal, dan gaussian yang paling cocok untuk data kadar Ni (menggunakan metode *least square*).

Gambar 3 memperlihatkan fit model spherikal, eksponensial, dan bedrock pada data endapan nikel laterit. Model spherikal, eksponensial, dan bedrock memiliki *sill* dan *range*. Model mendekati *sill* secara asimtotik (*sill* = asimtot datar) dan *range* sama dengan jarak dimana model (kurva) untuk seluruh lapisan mendekati 95% maksimum. Laju kenaikan model eksponensial dan model bedrock pada lapisan limonit lebih cepat dibanding model spherikal. Laju kenaikan model spherikal dan gaussian lebih cepat dibanding model eksponensial. Laju kenaikan model spherikal, eksponensial, dan gaussian sama (tetap). Kemudian, gradien (kemiringan) kurva disekitar titik pangkal sudah baik, sedangkan di titik lain kurva terletak dibawah atau diatas data yang erornya semakin kecil dan baik. Jadi, model sudah dapat diandalkan (Darwis, 2012).

### 3.3. Validasi Silang

Saat memasang dan menemukan model semivariogram yang paling pas, parameter semivariogram yang sesuai yaitu *sill*, *nugget*, *range* juga dihitung. Rincian parameter semivariogram disajikan pada Tabel 3. Untuk menyesuaikan model semivariogram dengan semivariogram eksperimental, meminimalkan jumlah sisa kuadrat dianggap sebagai fungsi tujuan. Model yang memberikan nilai RMSE terendah, diidentifikasi sebagai model yang paling pas. Pemodelan semivariogram dan estimasi parameter dilakukan di platform perangkat lunak R Studio. Seperti dapat dilihat dari Tabel 5, eksponensial model semivariogram lapisan limonit memberikan nilai RMSE terendah dan karenanya memberikan model semivariogram yang paling pas. Begitu juga dengan spherikal model semivariogram untuk lapisan saprolit, gaussian untuk lapisan bedrock.

Dengan demikian, model tersebut cocok digunakan untuk menginterpolasi sumberdaya mineral endapan nikel laterit yang ada di PT. Vale Indonesia Tbk.

Tabel 5. Nilai RMSE Semivariogram Eksperimental Anisotropik Zonal dengan Isotropik yang Tunggal

Lapisan Laterisasi	Spherical Model	Eksponensial Model	Gaussian Model
Limonit	0,1348803	<b>0,1312319</b>	0,1400686
Saprolit	<b>0,5197354</b>	0,5210126	0,525933
Bedrock	0,1511173	0,1511316	<b>0,1511316</b>

Berdasarkan hasil di atas (Tabel 5) nilai RMSE yang paling kecil pada lapisan limonit berada pada model eksponensial dengan nilai 0,1312319, pada lapisan saprolit berada pada model sferikal dengan nilai 0,5197354, dan lapisan bedrock berada pada model gaussian dengan nilai 0,1511316. Untuk lapisan bedrock, nilai RMSE yang paling kecil hampir semua sama, tetapi berdasarkan uji validitasnya, model gaussian cocok diterapkan pada lapisan bedrock. Lapisan bedrock, nilai kadar Ni tidak terlalu besar dibandingkan kandungan SiO<sub>2</sub>, MgO, dan Fe, proses kadar Ni tidak terurai secara sempurna pada lapisan tersebut atau tidak terjadi proses pengayaan.

#### 4. KESIMPULAN

Dalam studi ini, diperoleh suatu kesimpulan bahwa:

1. Model semivariogram terpilih yang cocok untuk menginterpolasi kadar Ni pada lapisan limonit adalah model eksponensial, lapisan saprolit adalah model sferikal, dan lapisan bedrock adalah model gaussian.
2. Identifikasi model dalam semivariogram dilakukan dua proses pengerjaan yaitu, pertama melalui pengamatan dengan menetapkan nilai *sill*, *range*, *nugget* berdasarkan intuisi (kesesuaian gambar dan teori yang sudah ada). Kedua melakukan penghalusan menggunakan bantuan software program R dengan menggunakan teori *ordinary least square* (OLS) yang meminimalkan eror. OLS memberikan fitting model yang sangat baik dan akurat serta tidak memerlukan syarat terhadap distribusi suatu data.
3. Model semivariogram hanya dapat digunakan pada data yang terdistribusi dalam ruang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada PT. Vale Indonesia Tbk yang telah memberikan izin untuk menggunakan kumpulan data. Terima kasih juga yang sebesar-besarnya disampaikan kepada Ibu Aliahni Djafar, Divisi Geologi, dan Seluruh Staf Karyawan PT. Vale Indonesia Tbk yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian. Atas bantuan dan kerja sama saya mengucapkan terima kasih.

#### REFERENSI

- [1] Bargawa, W. S. (2018) 'Geostatistik', Kilau Book, Yogyakarta.
- [2] Chai, T. dan Draxler, R. R. (2014) 'Root Mean Square Error or Mean Absolute Error? Arguments Against Avoiding RMSE in The Literature', *Geoscientific Model Development*, 7, pp. 1247-1250.
- [3] Cressie, N. A. C. (1993) 'Statistics for Spatial Data', John Wiley & Sons, New York.
- [4] Darwis, S. (2012) 'Catatan Kuliah Analisis Data', ITB Press, Bandung.
- [5] Delbari M., Bahraini M. M. dan Amiri M. (2013) 'Spatio-Temporal Variability of Groundwater Depth in The Eghlid Aquifer in Southern Iran', *Earth Sci. Res. J. Vol. 17 N°2*, pp. 105-114.
- [6] Kitanidis, P. K. (1997) 'Introduction to Geostatistics: Applications to Hydrogeology', Cambridge University Press, United Kingdom.

- [7] Nielsen, A. A. (2009) '*Geostatistics and Analysis of Spatial Data*' <http://www.imm.dtu.dk/~aa>. 6 October 2009.
- [8] Rozalina, G., Yasin, H., dan Ispriyanti, D., (2016), 'Penerapan Metode Ordinary Kriging pada Pendugaan Kadar NO<sup>2</sup> di Udara', *Jurnal Gaussian*, Volume 5, Nomor 1, Halaman 113-121.
- [9] Suryani, S., Sibaroni, Y., dan Heriawan, M. N. (2016) 'Spatial Analysis 3D Geology Nickel Using Ordinary Kriging Method', *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 78:5, 373 – 379.
- [10] Webster, R. and Oliver, M. A. (2001) '*Geostatistics for Enviromental Scientists*', John Wiley & Sons Ltd, Chichester.
- [11] Willmott, C. J. (1982) 'Some Comments on The Evaluation of Model Performance', *Bull. Am. Meteorol. Soc*; Vol.63, pp.1309-1313.