

**ANALISIS PENGGUNAAN METODE EMPIRICAL BAYESIAN  
KRIGING UNTUK OPTIMASI ESTIMASI SUMBERDAYA  
TERUKUR ENDAPAN BIJIH NIKEL LATERIT**

(STUDI KASUS: DESA WATURAMBAHA, KABUPATEN KONAWE UTARA,  
PROVINSI SULAWESI TENGGARA)

**TESIS**



Oleh :

**HALILINTAR RANGGA SWARA**

**D112 21 1008**

**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK PERTAMBANGAN**

**FAKULTAS TEKNIK**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2022**

**TESIS**

**ANALISIS PENGGUNAAN METODE EMPIRICAL BAYESIAN  
KRIGING UNTUK OPTIMASI ESTIMASI SUMBERDAYA  
TERUKUR ENDAPAN BIJIH NIKEL LATERIT  
(STUDI KASUS: DESA WATURAMBAHA, KABUPATEN KONAWE  
UTARA, PROVINSI SULAWESI TENGGARA)**

**HALILINTAR RANGGA SWARA  
NIM: D112211008**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Magister Program Teknik Pertambangan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 16 Januari 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

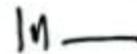
Pembimbing Utama



Dr. Ir. Irzal Nur, MT.

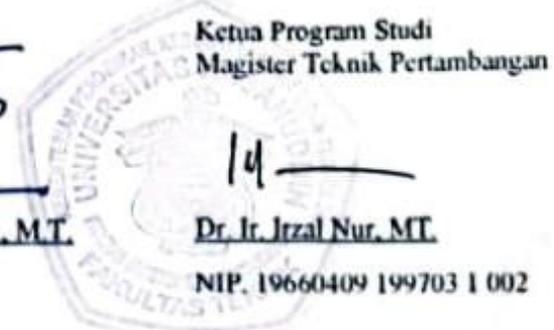
NIP. 19660409 199703 1 002

Pembimbing Pendamping  
an. Pembimbing Utama



Asran Ilyas, ST, MT, Ph.D.

NIP. 19730314 200012 1 001



## Lembar Pernyataan Keaslian

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Halilintar Rangga Swara

Nim : D112211008

Program Studi : Teknik Pertambangan

Jenjang : S2

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

“Analisis Pemanfaatan Metode Empirical Bayesian Kriging Untuk Optimasi Estimasi Sumberdaya Terukur Endapan Bijih Nikel Laterit”

adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilalihan tulisan orang lain, bahwa Tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan Tesis ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, Januari 2023

Yang menyatakan



Halilintar Rangga Swara

## ABSTRAK

Endapan nikel laterit menjadi salah satu endapan penghasil nikel terbesar di dunia. Faktor utama pembentukan endapan nikel laterit adalah proses pelapukan batuan beku ultramafik yang intens. Faktor lain yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit selain proses pelapukan batuan induk yang intens adalah faktor struktur, topografi, dan iklim. Distribusi kadar Ni pada suatu daerah tidak selalu memiliki distribusi yang normal, dan kadang mengandung *trend* serta *outlier*. Sejalan dengan hal ini, perlu digunakan metode *Empirical Bayesian Kriging* (EBK) yang diketahui dapat mengidentifikasi secara akurat untuk berbagai jenis distribusi data. Penelitian ini mencoba menganalisis efektifitas metode EBK untuk estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit pada setiap kelas kemiringan lereng. Hasil dari penelitian ini menunjukkan adanya korelasi yang kuat antara kemiringan lereng dengan ketebalan lapisan limonit dan saprolit. Ketebalan lapisan limonit akan bertambah seiring dengan menurunnya kemiringan lereng, sedangkan pada zona saprolit kemiringan lereng ideal pembentukan endapan nikel laterit yaitu  $16^{\circ}$ - $25^{\circ}$ . Pada zona limonit kadar Ni terkonsentrasi secara maksimal pada derajat kemiringan lereng yang tinggi ( $>16^{\circ}$ ) sedangkan pada zona saprolit kadar Ni terkonsentrasi secara maksimal pada kemiringan lereng  $16^{\circ}$ - $25^{\circ}$ . Validasi dari hasil estimasi dan pemodelan geologi dengan menggunakan *Root Mean Square Error* (RMSE) dengan nilai 0,16 pada zona limonit dan 0,36 pada zona saprolit, *Mean Absolute Error* (MAE) dengan nilai 0,12 pada zona limonit dan 0,28 pada zona saprolit, *Mean Absolute Percent Error* (MAPE) dengan nilai 10,34 pada zona limonit dan 17,6 pada zona saprolite. Sedangkan nilai Regresi linear yang diperoleh adalah 0,59 yang menunjukkan bahwa metode EBK merupakan metode yang akurat untuk melakukan estimasi sumberdaya dan pemodelan geologi.

Kata Kunci: Estimasi sumberdaya, nikel laterit, EBK, validasi estimasi, kelerengan topografi.

## **ABSTRACT**

*Laterite nickel deposits are one of the largest nickel-producing deposits in the world. The main factor for the formation of nickel laterite deposits is the intense weathering of ultramafic igneous rocks. Other factors that affect the formation of nickel laterite deposits besides the intense weathering of the bedrock are structural, topographical, and climatic factors. The distribution of Ni content in an area does not always have a normal distribution, and sometimes contains trends and outliers. To obtain this, Empirical Bayesian Kriging (EBK) method is used which is known to be able to accurately identify various data distributions. This study tries to analyze the effectiveness of the EBK method for estimating laterite nickel ore resources for each type of slope. The results of this study indicate a strong correlation between the slope of the slope and the thickness of the limonite and saprolite layer. The thickness of the limonite layer will increase as the slope decreases, while in the saprolite zone the ideal slope for the formation of laterite nickel deposits is 16°-25°. In the limonite zone, Ni content is maximally concentrated at a high degree of slope (>16°) while in the saprolite zone, Ni content is maximally concentrated at a slope of 16°-25°. Validation of the estimation results and geological modeling using the Root Mean Square Error (RMSE) with a value of 0.16 in the limonite zone and 0.36 in the saprolite zone, Mean Absolute Error (MAE) with a value of 0.12 in the limonite zone and 0.28 in the saprolite zone, Mean Absolute Percent Error (MAPE) with a value of 10.34 in the limonite zone and 17.6 in the saprolite zone. While the linear regression value obtained is 0.59 which indicates that the EBK method is an accurate method for estimating resources and geological modelling.*

*Keywords: Resource estimation, laterite nickel, EBK, estimation validation, topographic slope.*

## KATA PENGANTAR

*Bismillahirrahmanirrahimm*

*Assalamualaikum wr wb*

Puji dan syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat rahmat dan hidayah-Nya yang telah diberikan kepada kita semua sehingga segala aktivitas yang kita lakukan dapat berjalan sesuai kodrat yang telah ditentukan oleh-Nya. Shalawat dan salam senantiasa kita haturkan kepada sang tauladan, sang revolusioner, sang pembawa obor keselamatan Rasulullah Nabi Muhammad SAW yang telah mengangkat derajat manusia dari lembah kejahilnaan ke puncak kemuliaan.

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis ucapkan bagi semua pihak yang terlibat dalam penyelesaian tesis dengan judul “Analisis Penggunaan Metode Empirical Bayesian Kriging Untuk Optimasi Estimasi Sumberdaya Terukur Bijih Nikel Laterit” atas dukungan materil dan immateril yang telah dicurahkan selama penyusunan tesis ini.

Terima kasih penulis ucapkan bagi pihak PT Sinar Jaya Sultra Utama pada umumnya serta pembimbing penulis selama di perusahaan Muhammad Zulfikar Almuhadjir atas kesempatan serta bimbingan yang telah diberikan kepada penulis selama proses pengambilan data di perusahaan sampai pada selesainya tesis ini.

Terima kasih pula penulis ucapkan kepada dosen Departemen Teknik Pertambangan secara keseluruhan yang telah mencurahkan ilmu, waktu, serta pengalamannya selama penulis menuntut ilmu mulai dari strata 1 sampai strata 2 di Departemen Teknik Pertambangan Universitas Hasanuddin. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Bapak Dr. Ir. Irzal Nur, MT. dan Asran Ilyas, ST. MT. Ph.D. selaku Pembimbing penulis. Ilmu serta arahan yang telah diberikan kepada penulis semoga bisa kembali menjadi amal dan berkah kepada Pembimbing di sisi Allah SWT.

Terima kasih yang sebesar-besarnya penulis sampaikan kepada teman-teman S1 Teknik Pertambangan Angkatan 2016 serta S2 Teknik Pertambangan Angkatan 2021 atas canda tawa, suka duka, serta semangat yang dilalui Bersama penulis. Semoga teman-teman selalu dalam lindungan Tuhan yang Maha Esa serta selalu diberi kesuksesan dimanapun teman-teman berada.

Ucapan terima kasih penulis ucapkan kepada orang tua penulis Bapak Ahmad Dahlan dan Ibu Jumrian Zainuddin S,Pd atas semua yang telah diberikan kepada penulis mulai dikandung badan sampai sekarang. Terima kasih yang paling dalam penulis ucapkan atas hadirnya Irmawati selaku istri penulis dan Aurum Dara Halilintar selaku buah hati dari penulis yang kehadirannya menjadi semangat, motivasi, serta menghadirkan kebahagiaan yang tak terhingga bagi penulis dalam menjalani kehidupan.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan Tesis ini masih terdapat kekurangan dalam penyusunannya. Oleh karena itu, penulis menyampaikan permohonan maaf atas semua kekurangan yang dijumpai dalam proses penyusunan laporan Tugas Akhir ini. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua, Amin.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Gowa, Januari 2023

Halilintar Rangga Swara

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>vi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>viii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN .....</b>	<b>xiv</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	3
1.3. Tujuan Penelitian.....	3
1.4. Manfaat Penelitian.....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Endapan Bijih Nikel Laterit.....	5
2.2 Klasifikasi Sumberdaya.....	11
2.3 Analisis Statistik.....	13
2.3 Geostatistik.....	20
2.4 Estimasi Sumberdaya dan Analisis Sebaran Kadar.....	20
2.5 Metode Kriging .....	21
2.8 <i>Variogram dan Semivariogram</i> .....	23
2.9 Teorema Bayesien dalam Statistik .....	27
2.10 Empirical Bayesian Kriging .....	28

<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>30</b>
3.1. Lokasi Penelitian .....	30
3.2 Tahapan Penelitian .....	30
3.3. Bagan Alir Penelitian .....	36
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>38</b>
4.1 Analisis Statistik.....	38
4.2 Hubungan Ketebalan Lapisan Laterit dengan Topografi .....	55
4.3 Estimasi Sumberdaya Metode EBK .....	61
4.4 Validasi Hasil Estimasi .....	81
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>87</b>
5.1 Kesimpulan.....	87
5.2 Saran.....	88
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>89</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
2.1 Sebaran Endapan Nikel Laterit Dunia (Brand, 1998).....	5
2.2 Profil laterit yang terbentuk dari proses serpentinisasi batuan ultramafic. (A) Oxide, (B) partly silificated oxide, (C) hydrous Mg silicate, (D) Clay silicate (Butt dan Cluzel, 2013). ....	6
2.3 Bijih oksida pada batuan dasar, Kuba (Butt dan Cluzel, 2013) .....	7
2.4 Oxide (oc) dan hydrous Mg silicates, Plateeau Mine, New Caledonia	7
2.5 Bijih clay silicate, Bulong, Western Australia. ....	8
2.6 Proses pembentukan endapan nikel laterit (Butt dan Cluzel, 2013) ....	11
2.7 Distribusi normal.....	16
2.8 Contoh distribusi Chi-square .....	17
2.9 Student t distbution .....	17
2.10 Snedecor's F-distribution .....	18
2.11 Binomial distribution .....	19
2.12 Model Semivariogram.....	25
2.13 Spektrum model semivariogram yang dihasilkan dari metode EBK...	29
3.3 Bagan alir penelitian .....	37
4.1 Histogram zona limonit 0°-15°.....	40
4.2 Analisis box plot zona limonit kemiringan lereng 0°-15° .....	41
4.3 Histogram zona limonit kemiringan lereng 16°-25°.....	43
4.4 Analisis box plot zona limonit kemiringan lereng 16°-25° .....	44
4.5 Histogram zona limonit kemiringan lereng 25°-55°.....	45
4.6 Box plot kemiringan lereng zona limonit 25°-55°.....	46
4.7 Histogram zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	48
4.8 Box plot zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	49
4.9 Histogram pada zona saprolit kemiringan lereng 16°-25°.....	51
4.10Box plot zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	52
4.11 Histogram zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	53
4.12 Box plot zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	54

4.13 Analisis trend antara ketebalan limonit dengan kemiringan lereng.....	56
4.14 Analisis trend ketebalan lapisan saprolit dengan kemiringan lereng...	58
4.17 Semivariogram zona limonit 0°-15° .....	61
4.18 Distribusi nugget zona limonit kemiringan lereng 0°-15° .....	62
4.19 Distribusi partial sill zona limonit kemiringan lereng 0°-15° .....	62
4.20 Transformasi model zona limonit kemiringan lereng 0°-15° .....	63
4.21 Semivariogram zona limonit 16°-25° .....	64
4.22 Distribusi nugget zona limonit kemiringan lereng 16°-25° .....	65
4.23 Distribusi partial sill zona limonit kemiringan lereng 16°-25° .....	65
4.24 Transformasi model zona limonit kemiringan lereng 16° - 25° .....	66
4.25 Semivariogram zona limonit 25°-55° .....	67
4.26 Distribusi nugget zona limonit kemiringan lereng 25°-55° .....	67
4.27 Distribusi sill zona limonit kemiringan lereng 25°-55° .....	68
4.28 Distribusi range zona limonit kemiringan lereng 25°-55° .....	68
4.29 Transformasi model zona limonit kemiringan lereng > 25° .....	69
4.30 Semivariogram zona saprolite 0°-15° .....	70
4.31 Distribusi nugget zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	70
4.32 Distribusi partial sill zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	71
4.33 Distribusi range zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	71
4.34 Transformasi model zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	72
4.35 Semivariogram zona saprolit 16°-25° .....	73
4.36 Distribusi nugget zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	73
4.37 Distribusi nugget zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	74
4.38 Distribusi range zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	74
4.39 Transformasi model zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	75
4.40 Semivariogram zona saprolit 25°-55° .....	76
4.41 Distribusi nugget zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	76
4.42 Distribusi partial sill zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	77
4.43 Distribusi range zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	77
4.44 Transformasi model zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	78
4.45 Model geologi zona limonit kemiringan lereng 0°-15° .....	79

4. 46 Model geologi zona limonit kemiringan lereng 16°-25° .....	79
4. 47 Model geologi zona limonit kemiringan lereng 25°-55° .....	79
4. 48 Model geologi zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	80
4. 49 Model geologi zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	80
4. 50 Model geologi zona saprolit kemiringan lereng 16°-25° .....	80

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
4.1 Zona limonit kemiringan lereng 16°-25° .....	42
4.2 Parameter statistik zona limonit kemiringan lereng 25°-55° .....	44
4.3 Hasil analisis statistik zona saprolit kemiringan lereng 0°-15° .....	47
4.4 Hasil analisis statistik kemiringan lereng 16°-25° .....	50
4.5 Hasil analisis statistik zona saprolit kemiringan lereng 25°-55° .....	52
4.6 Sebaran data titik bor pada setiap kelas kemiringan lereng .....	55
4.7 Hasil estimasi sumberdaya zona limonit dan saprolit .....	81
4.8 Validasi hasil pemodelan dan estimasi sumberdaya zona limonit. ....	82
4.9 Validasi hasil pemodelan dan estimasi sumberdaya zona saprolit.....	83
4.10 Hasil analisis regresi dan koefisien korelasi .....	86

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
A Peta Tunjuk Lokasi .....	93
B Peta Lokasi Penelitian .....	94
C Peta Sebaran Kemiringan Lereng.....	95
D Peta Sebaran Ketebalan Zona Limonit.....	96
E Peta Sebaran Ketebalan Zona Saprolit.....	97
F Peta Sebaran Kadar Ni Zona Limonit .....	98
G Peta Sebaran Kadar Ni Zona Saprolit .....	99
H Data Bor .....	100

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Endapan nikel berdasarkan proses pembentukannya terdiri dari dua jenis yaitu endapan nikel laterit dan endapan nikel sulfida. Berdasarkan jumlah sumberdayanya, endapan nikel laterit memiliki 70 % dari sumberdaya nikel dunia. Endapan nikel laterit terbentuk dari pelapukan intens yang terjadi pada batuan beku ultramafik dan berbagai faktor lain yang mempengaruhi persebaran dari unsur-unsur yang terdapat pada endapan nikel laterit. Berbagai faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit tersebut antara lain tipe batuan induk, topografi, struktur geologi, komposisi dari material organik, dan intensitas pelapukan (Brand dkk, 1998). Berbagai faktor tersebut turut mempengaruhi persebaran unsur-unsur yang terdapat pada endapan nikel laterit. Salah satu faktor yang dianggap memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap persebaran unsur-unsur yang terdapat pada endapan nikel laterit adalah faktor kemiringan lereng (Ilyas dkk, 2016).

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki cadangan nikel laterit terbesar di dunia. Cadangan nikel laterit yang melimpah terdapat di pulau Sulawesi termasuk di Provinsi Sulawesi Tenggara. Keterdapatn cadangan nikel laterit yang melimpah dapat diestimasi dengan berbagai metode estimasi.

Metode-metode yang dapat digunakan unruk melakukan estimasi dan analisis sebaran unsur antara lain metode IDW (*Inverse Distance Weighting*), metode AOI (*Area of Influence*), serta metode *kriging* (Bohling, 2005; Goovaerts 1998). Metode yang dianggap paling tepat untuk melakukan estimasi sumberdaya Ni dan analisis sebaran unsur pada endapan nikel laterit adalah metode *kriging*. Metode *kriging* dalam melakukan estimasi dan analisis persebaran unsur mempertimbangkan kondisi geospasial sepenuhnya dari suatu endapan. Metode *kriging* terbagi menjadi tiga jenis yaitu metode *simple kriging*, metode *ordinary kriging*, serta metode *universal kriging* (Bohling, 2005; Goovaerts 1998).

Metode *Kriging* yang dapat digunakan untuk melakukan estimasi sumberdaya pada endapan bijih nikel laterit adalah metode *Ordinary Kriging* (Ilyas

dan Koike, 2012). Metode estimasi dengan menggunakan metode *Ordinary Kriging* dalam melakukan estimasi membutuhkan data yang stasioner (Gribov dan Krivoruchko, 2019), sehingga metode ini kurang efektif untuk digunakan dalam melakukan interpolasi data yang tidak stasioner. Endapan nikel laterit dalam proses pembentukannya dipengaruhi oleh berbagai faktor mulai dari iklim, intensitas pelapukan, geomorfologi, dan batuan induk. Salah satu faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit adalah kemiringan lereng, sehingga karakteristik dari endapan nikel laterit berbeda yang tentunya dapat menyebabkan suatu data menjadi tidak stasioner.

Salah satu metode yang merupakan pengembangan dari metode *kriging* adalah metode *Empirical Bayesian Kriging* (EBK). Metode ini dapat digunakan untuk melakukan interpolasi pada data yang stasioner maupun data yang tidak stasioner (Gribov dan Krivoruchko, 2019). Ada berbagai penelitian telah dilakukan yang telah membuktikan tingkat efektivitas dari metode EBK dibanding metode lain dalam melakukan interpolasi data yang tidak stasioner ( Fabijańczyk dkk, 2019).

Perbedaan mendasar metode geostatistik yang biasa digunakan dengan metode EBK adalah metode geostatistik pada umumnya hanya mempertimbangkan satu *variogram* untuk menentukan parameter-parameter interpolasi, tidak mempertimbangkan ketidakpastian dalam melakukan interpolasi, dan tidak efektif digunakan untuk yang tidak pasti dan tidak mempertimbangkan kesalahan tunggal dalam pengukuran *variogram* (Gribov dan Krivoruchko, 2019), sedangkan metode EBK dapat melakukan ribuan simulasi pemodelan *variogram* sehingga semua *variogram* tersebut dipertimbangkan untuk melakukan analisis (Gribov dan Krivoruchko, 2019).

Metode EBK dianggap dapat melakukan interpolasi dengan cepat dan dapat digunakan untuk kelompok data yang besar yang jumlah datanya lebih dari jutaan data (Krivoruchko, 2019). Metode EBK dapat mengolah data dengan menggunakan banyak *semivariogram* kemudian memberikan bobot pada setiap *semivariogram* yang terbentuk. Berdasarkan pertimbangan tersebut maka metode ini dapat digunakan untuk melakukan estimasi sumberdaya nikel laterit. Metode ini

kemudian dikombinasikan dengan data kemiringan lereng dalam melakukan estimasi sumberdaya untuk mengetahui keterkaitan antara persebaran kadar setiap unsur pada endapan bijih nikel laterit dengan kemiringan lereng dari satu daerah.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Estimasi sumberdaya dengan menggunakan metode *empirical bayesian kriging* (EBK) berdasarkan pengaruh kemiringan lereng terhadap sebaran nikel diproyeksikan untuk menghasilkan estimasi yang optimal dan akurat dibandingkan dengan metode estimasi geostatistik pada umumnya. Metode geostatistik pada umumnya dalam proses estimasinya mempertimbangkan berbagai faktor untuk memperoleh hasil estimasi yang lebih akurat diantaranya harus memiliki data yang terdistribusi secara normal, tidak mengandung *trend*, dan tidak mengandung data pencilan. Hal ini menyebabkan metode geostatistik pada umumnya tidak relevan untuk diterapkan disemua jenis endapan termasuk endapan nikel laterit yang sifatnya *eratic* dan perlu Langkah-langkah yang lebih kompleks untuk memperoleh hasil estimasi yang lebih akurat. Dengan demikian penggunaan metode EBK untuk semua jenis endapan dapat diterapkan tanpa mempertimbangkan parameter-parameter yang menjadi syarat estimasi dengan metode geostatistik pada umumnya.

Pada penelitian ini akan dilakukan analisis pengaruh kemiringan lereng terhadap ketebalan dari zona laterit serta menganalisis keterkaitan pengaruh ketebalan dari zona laterit terhadap sebaran kadar Ni pada setiap kelas kemiringan lereng. Pengelompokan kemiringan lereng berdasarkan kondisi topografi dari daerah penelitian dilakukan untuk melihat efektivitas dari metode EBK dalam melakukan estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit pada setiap kelas kemiringan lereng.

## **1.3. Tujuan Penelitian**

### **1.3.1 Tujuan Umum**

Tujuan umum dari penelitian ini adalah melakukan estimasi sumberdaya terhadap endapan nikel laterit dengan menggunakan metode *Empirical Bayesian Kriging* berdasarkan pengaruh kemiringan lereng terhadap sebaran kadar nikel.

### 1.3.2 Tujuan Khusus

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh kemiringan lereng terhadap ketebalan dari zona laterit pada endapan nikel laterit di daerah penelitian pada setiap kelas kemiringan lereng.
2. Menganalisis pengaruh kemiringan lereng terhadap sebaran kadar Ni pada setiap kelas kemiringan lereng serta bagaimana model distribusi kadar Ni.
3. Menghitung tonase endapan nikel laterit dengan metode EBK pada setiap **kelas** kemiringan lereng.
4. Menganalisis efektivitas estimasi sumberdaya nikel laterit dengan metode EBK pada setiap kelas kemiringan lereng.

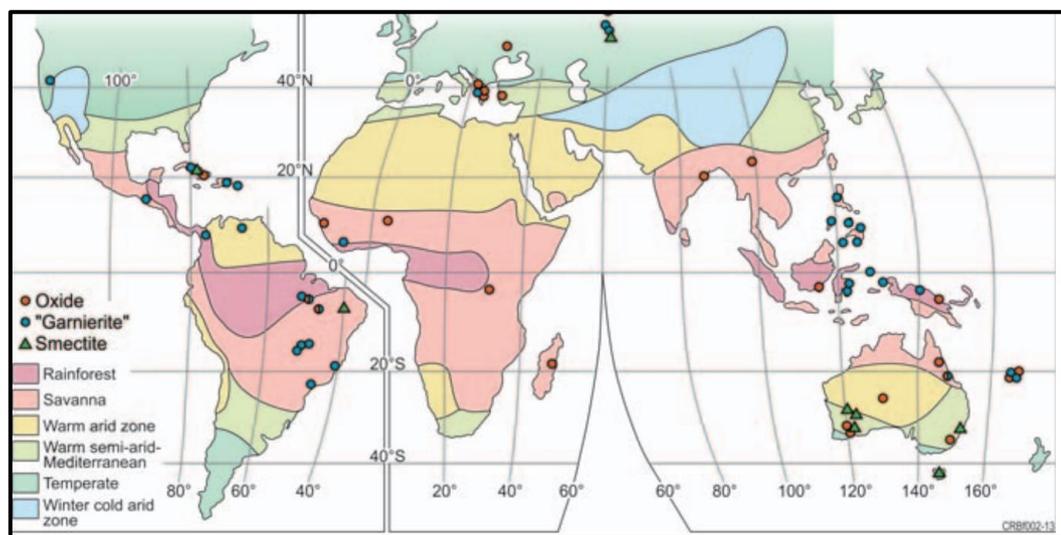
## 1.4. Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah dapat menjadi salah satu rujukan bagi akademisi dan praktisi penambangan endapan nikel laterit terkait estimasi sumberdaya terukur endapan nikel laterit dan analisis sebaran unsur Ni dengan metode EBK dengan mempertimbangkan pengaruh kemiringan lereng terhadap sebaran kadar serta mengetahui efektivitas metode EBK dalam estimasi sumberdaya endapan bijih nikel laterit.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Endapan Bijih Nikel Laterit

Endapan bijih nikel laterit menyumbang lebih dari 60% dari pasokan nikel global. Endapan nikel laterit merupakan hasil pelapukan yang intensif dari serpentinit di bawah kondisi tropis yang lembap. Nikel terkonsentrasi lebih dari 1% dan terdapat pada berbagai jenis endapan mulai dari endapan *secondary oxides*, *hydrous mg silicates*, dan smektit. Pembentukan, mineralogi dan kadar dari endapan dikontrol oleh litologi, tektonik, iklim dan geomorfologi. Endapan pada umumnya melalui beberapa fase pembentukan dan pengembangan, berkembang seiring dengan perubahan iklim dan/atau topografi lingkungan deposit dengan kadar tertinggi biasanya memiliki >3% Ni terbentuk dimana regolit yang kaya oksida terangkat dan Ni mengalami pelindihan ke bawah pada formasi silikat di zona saprolit (Butt dan Cluzel, 2013). Sebaran endapan nikel laterit dunia secara umum dapat dilihat pada Gambar 2.1.

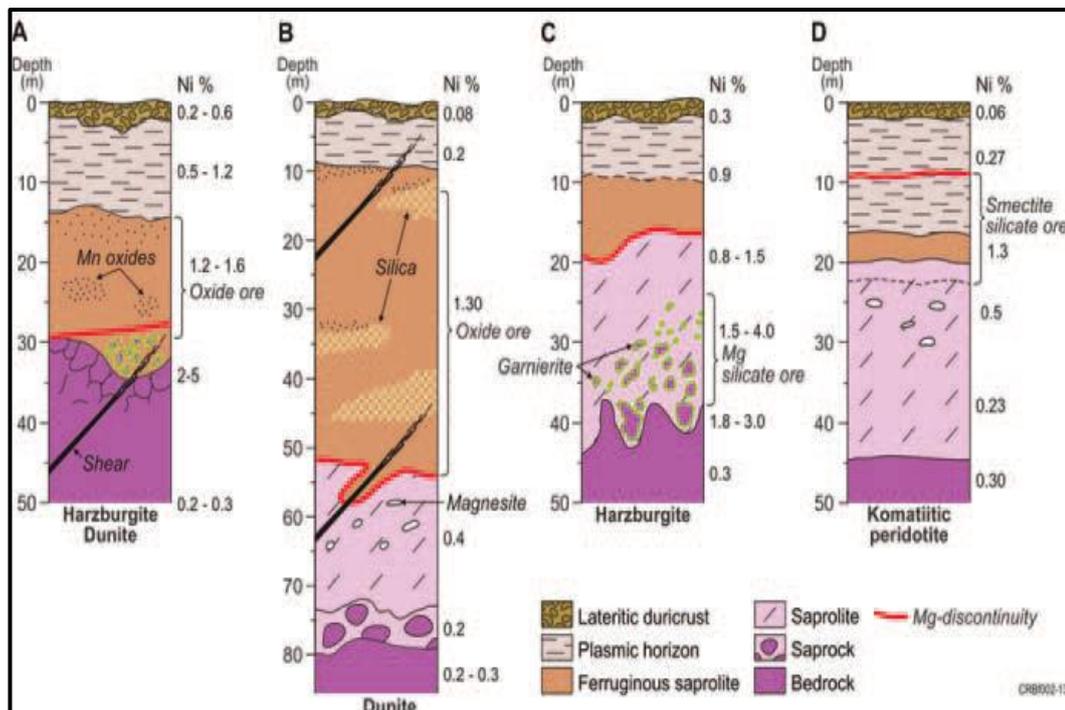


Gambar 2. 1 Sebaran Endapan Nikel Laterit Dunia (Brand, 1998).

#### 2.1.1. Karakteristik Endapan Nikel Laterit

##### 2.1.1.1 *Lateritic Regolith*

*Lalteritic regolith* umumnya terdiri dari beberapa zona. Zona *Lateritic regolith* jika ditinjau secara vertical dari bawah terdiri beberapa zona antara lain: *saprock*, *saprolite*, *plasmic zone*, *mottled zone*, *ferruginous duricrust*, dan *soil* (Eggleton 2001). Ketebalan dari lapisan *saprolite* dapat mencakup lebih dari 80% total ketebalan dari profil laterit. Endapan ini terbentuk di bawah kondisi iklim tropis sampai sub tropis. *Lateritic regolith* terbentuk dari batuan ultramafic yang dapat mengandung konsentrasi unsur Ni yang signifikan dan bernilai ekonomis pada satu atau lebih zona. Ada tiga jenis tipe bijih secara umum, berdasarkan mineral pembawa nikelnya antara lain: *oxides*, *hydrous mg silicates*, dan *clay silicates* (dapat dilihat pada gambar 2.2).



Gambar 2. 2 Profil laterit yang terbentuk dari proses serpentinisasi batuan ultramafic. (A) *Oxide*, (B) *partly silicified oxide*, (C) *hydrous Mg silicate*, (D) *Clay silicate* (Butt dan Cluzel, 2013).

#### 2.1.1.2 Oxide Deposits

*Oxide deposits* (bijih limonitic) didominasi oleh mineral-mineral pembawa Fe seperti goetit, pada pertengahan sampai pada bagian atas *saprolite* dan berlanjut pada zona *plasmic* (dapat dilihat pada gambar 2.2(A), 2.2(B), dan gambar 2.3).

Unsur Ni umumnya terdapat pada goetit, dengan substitusi dari Fe atau dengan proses adsorpsi. Kadar rata-rata dari *oxide deposit* adalah 1,0 sampai 1,6% Ni dan merepresentasikan sekitar 60% dari total Cadangan Nikel laterit.

### 2.1.1.3 *Hydrous Mg Silicate Deposits*

Endapan *hydrous Mg silicate* terbentuk di bagian tengah sampai bagian bawah saprolite dengan konsentrasi Ni pada serpentin, talk, klorit dan sepiolit, beberapa diantaranya tidak didefinisikan secara baik dan umumnya dikenal dengan istilah garnierit (dapat dilihat pada gambar 2.2 (C) dan gambar 2.4). Endapan ini memiliki konsentrasi kadar tertinggi (mulai dari 2% sampai lebih dari 5% Ni) dan, mayoritas dari Nikel laterit berjenis tipe ini. Endapan ini merepresentasikan sekitar 32% dari total sumberdaya Nikel, dengan kadar rata-rata 1,44%. Endapan *hydrous Mg silicates* pada umumnya terbentuk dari serpentinisasi, *ophiolitic harzburgite* dan yang paling banyak diketahui terbentuk dari wilayah tektonik aktif pada relief yang tinggi di *circum-Pacific* dan *Carribean* (Glazkovsky et al, 1977).



Gambar 2. 3 Bijih oksida pada batuan dasar, Kuba (Butt dan Cluzel, 2013)



Gambar 2. 4 *Oxide (oc)* dan *hydrous Mg silicates*, Plateeau Mine, New Caledonia (Butt dan Cluzel, 2013)

#### 2.1.1.4 Clay Silicate Deposits

Endapan nikel laterit *clay silicate* akhir-akhir ini diketahui dan dieksploitasi sebagai jenis bijih, meskipun kehadiran dari lapisan Ni yang tebal pada pengembangan regiolit pada batuan peridotit yang terserpentinisasi juga telah lama diketahui. Mineral bijih utamanya adalah *saponite* yang kaya akan Ni dan smektit pada pertengahan sampai bagian atas saprolite (dapat dilihat pada gambar 2D dan gambar 2.5). Kadar rata-rata dari endapan ini berkisar 1,0% sampai 1,5% dan merepresentasikan sekitar 8% dari total sumberdaya nikel laterit.



Gambar 2. 5 Bijih clay silicate, Bulong, Western Australia (Butt dan Cluzel, 2013)

#### 2.1.2 Faktor yang Mempengaruhi Distribusi dan Pembentukan Nikel Laterit

##### 1. Batuan Dasar

Litologi dari endapan nikel laterit secara eksklusif terbentuk pada batuan ultramafik yang kaya akan olivine dan mengalami serpentinisasi yang mengandung 0,2 sampai 0,4% Ni. ada beberapa deposit kecil yang terbentuk dari proses pelapukan ulang sedimen yang mengandung lateritik dari serpihan peridotit yang terserpentinisasi (Valeton dkk, 1987). Jenis endapan Sebagian dipengaruhi oleh litologi batuan. Batuan peridotit akan menjadi endapan oksida dan endapan hidro silikat atau kumpulan *clay silicate*, sedangkan dunit umumnya akan endapan oksida, yang banyak mengandung silika yang dapat menyebabkan terjadinya dilusi pada bijih. Derajat serpentinisasi dari peridotit mempengaruhi keadaan dan kumpulan dari endapan hidro silka (Golightly,1979 dan Pelletier, 1996). Pada batuan yang tidak terserpentinisasi, cenderung membentuk endapan yang kaya akan

oksida, dengan hanya sedikit mineralisasi silika (contohnya pada bagian barat Sorowako, Indonesia). Pada serpentinisasi lemah sampai serpentinisasi moderat, zona silika lebih tebal dan sebagian besar terdiri dari garnierit yang baru terbentuk sebagai urat. Namun, Ni juga terbentuk dari lizardit primer yang teralterasi, dimana Ni telah digantikan dengan Mg (Manceau dan Calas, 1985).

## 2. Iklim

Pada umumnya Ni laterit banyak terbentuk pada daerah tropis yang lembab (lihat gambar 2.1). Banyak endapan nikel laterit di Indonesia (seperti Soroako, Weda Bay) dan beberapa di Afrika Barat (Sipolou, Conakry) dan Amerika Selatan (Onca, Puma, Vermelho, Cerro Matoso) memiliki iklim hutan hujan yang dicirikan dengan >1800 mm hujan per tahun dan musim kering kurang dari 2 bulan. Endapan [ada umumnya, seperti di Kaledonia Baru, Filipina, Australia bagian utara, Karibia, Burundi dan Brazil, memiliki lingkungan pembentukan Savana basah (curah hujan pada musim panas berkisar 900-1800 mm dan 2-5 bulan musim kemarau dan musim dingin) Nikel laterit terbentuk Ketika curah hujan melebihi 1000 mm/tahun dan rata-rata suhu bulanan berkisar 22-31<sup>0</sup>C (musim panas) dan 15-27<sup>0</sup>C (musim dingin).

## 3. Derajat Pelapukan

Dikarenakan endapan nikel laterit pada umumnya terbentuk pada bentang alam dengan proses yang panjang di bawah cuaca serta intensitas pelapukan yang berbeda-beda, kita hanya dapat memperkirakan periode dari intensitas pelapukan yang paling tinggi. Penanggalan regolit secara langsung hanya dilakukan di beberapa daerah dan jarang pada laterit Ni sendiri.

## 4. Geomorfologi

Nikel laterit terbentuk pada daerah regolit yang mengalami pelapukan secara kuat. Ini menyebabkan (1) formasi di medan dengan stabilitas tektonik yang cukup dan relief rendah sehingga laju pelapukan melebihi erosi, dan (2) Pengendapan dikarenakan relief permukaan bumi yang rendah dan terlindung dari erosi dan longsor. Pergerakan air dan reagen lainnya akan sangat dipengaruhi oleh topografi setempat. Air akan bergerak lambat di daerah yang berlereng sehingga memungkinkan masuk lebih dalam ke pori-pori atau retakan batuan.

Ketebalan pelapukan ditentukan oleh bentuk batuan, topografi, karena akumulasi endapan biasanya terjadi di lokasi berlereng hingga agak miring. Secara teoritis, jumlah air yang keluar dari medan terjal lebih besar daripada yang merembes, sehingga memungkinkan pelapukan yang kurang intens.

#### 5. Struktur

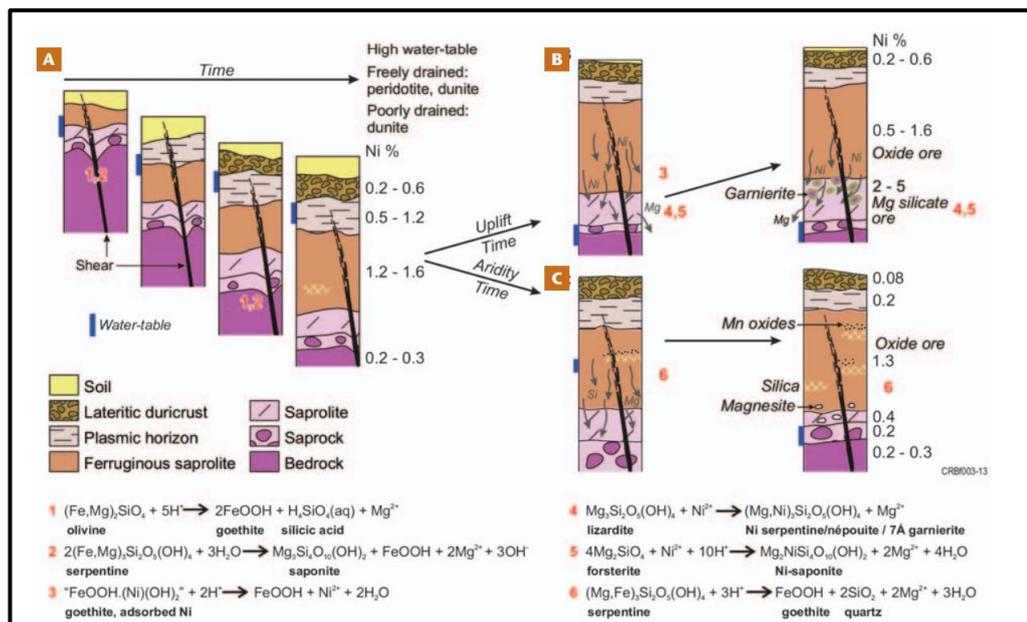
Rekahan (juga dikenal sebagai *joint*) dan sesar (juga dikenal sebagai *fault*) adalah struktur geologi yang memainkan peran penting dalam pembentukan endapan laterit. Pelapukan batuan induk akan dipercepat oleh rekahan dan patahan ini, yang akan memudahkan untuk air agar meresap ke dalam tanah. Selain itu, larutan seperti urat yang mengandung nikel (Ni) dapat terendapkan pada rekahan dan rekahan. Karena jenis batuan beku diketahui memiliki porositas dan permeabilitas yang sangat kecil, sehingga sulit bagi air untuk menembusnya, adanya rekahan ini akan mempermudah masuknya air sehingga memperparah proses pelapukan.

#### 2.1.3. Pembentukan endapan nikel laterit

Ada beberapa proses pembentukan endapan nikel laterit. Tipe-tipe pembentukan endapan nikel laterit antara lain:

- a. *Direct formation* banyak endapan yang terbentuk sejak proses pelapukan yang intens dan berlanjut dibawah lingkungan atau iklim savana basah. Kondisi ini adalah tipe laterisasi pada kraton. Tingginya permukaan air, cuaca yang berubah-ubah pada iklim savana, dan proses erosi yang rendah memungkinkan terjadinya pelapukan mulai dari 50 – 80 meter. Pada lingkungan yang bebas pengeringan, Ni dilepaskan oleh proses hidrolisis pada olivine dan serpentinisasi olivin. Magnesia dan silika terlindungi, menyebabkan porositas untuk meningkat dan densitas berkurang, dengan total massa yang hilang di atas 70%. Hal ini sendiri secara residual dapat mengurangi konsentrasi Ni didalam zona besi oksida ditasa ketidakselarasan 0,6 – 1%, dimana secara dominan diserap oleh goetit. Kadar yang lebih tinggi, leboh dari 1,5% disebabkan pengayaan absolut pencucian nikel dari permukaan.

b. *Multi stage formation*: pengangkatan tektonik telah memainkan peran penting dalam pembentukan beberapa endapan di daerah dengan relief yang semula rendah dengan mengubah topografi dan menurunkan muka air tanah yang sebelumnya tinggi. Di daerah tropis lembap, ini biasanya menyebabkan pencucian Ni dari zona oksida dan akumulasinya dalam silikat Mg hidrat lebih dalam di saprolit. (dapat dilihat pada gambar 2.6).



Gambar 2. 6 Proses pembentukan endapan nikel laterit (Butt dan Cluzel, 2013)

## 2.2 Klasifikasi Sumberdaya

Sumberdaya mineral adalah konsentrasi bahan galian dengan prospek yang wajar untuk ekstraksi ekonomi pada akhirnya pada atau bahan galian yang terletak di atas kerak bumi dalam bentuk, kualitas, atau kuantitas tertentu. Sumberdaya mineral bukanlah daftar semua mineralisasi yang telah diambil sampelnya atau dibor, terlepas daricut *off grade*, dimensi, lokasi, atau kontinuitas penambangan potensial. Inventarisasi mineralisasi realistis yang dapat diekstraksi secara ekonomis secara keseluruhan atau sebagian dengan asumsi ekonomi dan teknik yang masuk akal dikenal sebagai sumber daya mineral (Issaks, 1993)

Salah satu parameter untuk penentuan tingkat sumberdaya adalah jarak antar titik bor. Pengelompokan sumberdaya berdasarkan jarak antar titik bor dapat dilihat pada Table 2.1

Tabel 2. 1 Pengelompokan sumberdaya berdasarkan spasi bor (SNI, 2011)

Tipe Sumberdaya	Spasi Bor
Tereka	Max 200 meter
Tertunjuk	Max 100 meter
Terukur	Max 50 meter

Untuk mengetahui, memperkirakan, atau menginterpretasikan lokasi, jumlah, kadar, sifat geologi, dan kontinuitas sumber daya mineral perlu dilakukan berdasarkan data dan pengetahuan geologi tertentu, termasuk pengambilan sampel. Menurut tingkat kepercayaan geologi, sumber daya mineral dibagi lagi ke dalam kategori tereka, terindikasi, dan terukur. Klasifikasi Sumberdaya Mineral dan Cadangan diklasifikasikan sebagai berikut (KCMI, 2017):

a. Sumberdaya Mineral Tereka

Jumlah dan kualitas kadar diperkirakan untuk sumber daya mineral tereka, yang merupakan bagian dari sumber daya mineral, menggunakan data geologi dan pengambilan sampel yang jarang. Data geologis cukup untuk menunjukkan kejadiannya, tetapi tidak dapat memastikan kesinambungan kadar atau kualitasnya.

Sumber daya mineral tereka tidak dapat dikonversi menjadi cadangan mineral dan memiliki tingkat kepastian aplikasi yang lebih rendah daripada sumber daya mineral tertunjuk. Seiring berjalannya eksplorasi, adalah wajar untuk mengantisipasi bahwa sebagian besar sumber daya mineral tereka akan menjadi sumber daya mineral terindikasi.

Kategori tereka disimpulkan untuk mengatasi contoh di mana konsentrasi dan kemunculan mineral dapat ditentukan, pengukuran dan pengambilan sampel terbatas telah dilakukan, tetapi data yang diperoleh tidak cukup untuk memberikan penilaian yang pasti tentang kontinuitas dan/atau kadar geologis. Secara umum, adalah realistis untuk mengantisipasi bahwa seiring dengan kemajuan eksplorasi, sebagian besar sumber daya mineral tereka dapat ditingkatkan ke sumber daya yang

ditentukan. Namun, perluasan kategori sumber daya tidak akan selalu terjadi karena ketidakpastian sumber daya mineral tereka.

b. Sumberdaya Mineral Tertunjuk

Sumber daya mineral terindikasi adalah bagian dari sumber daya mineral yang kuantitas, kadar atau kualitasnya, kerapatan, bentuk, dan fitur fisiknya dapat dihitung dengan cukup percaya diri untuk memfasilitasi desain tambang dan penilaian kelayakan ekonomi deposit. Kontinuitas dan kadar atau kualitas geologi antara tempat pengamatan dapat diasumsikan berdasarkan informasi geologi yang tepat dan dapat dipercaya yang dikumpulkan melalui eksplorasi, pengambilan sampel, dan pengujian.

c. Sumberdaya Mineral Terukur

Sumberdaya mineral terukur adalah bagian dari sumberdaya mineral di mana kuantitas, kadar atau kualitas, kepadatan, bentuk, dan fitur fisik dapat dihitung dengan cukup percaya diri untuk memungkinkan desain tambang yang menyeluruh dan penilaian akhir kelayakan ekonomi deposit. Untuk memastikan kesinambungan dan kadar atau kualitas geologi di seluruh tempat pengamatan, bukti geologi yang dikumpulkan melalui eksplorasi, pengambilan sampel, dan pengujian adalah menyeluruh, dapat dipercaya, dan memadai.

## **2.3 Analisis Statistik**

Statistik adalah metode yang digunakan untuk analisis data. Statistik saat ini pada semua bidang ilmu telah dikembangkan untuk pengumpulan, penanganan, dan pengurutan data, diberikan wawasan tentang fenomena tertentu dan kemungkinan bahwa, dari pengetahuan itu, menyimpulkan kemungkinan hasil baru. Salah satu tujuan dengan statistik adalah untuk mengekstrak informasi dari data untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang situasi yang mereka wakili. Dengan demikian, statistika dapat dianggap sebagai ilmu belajar dari data.

### **2.3.1 Analisis Deskriptif**

Statistik deskriptif digunakan untuk menggambarkan fitur penting dari data pada suatu penelitian. Statistik menyajikan gambaran yang sederhana tentang sampel dan pengukuran. Bersamaan dengan itu dilakukan analisis grafik, terbentuk dari dasar dari hampir setiap analisis kuantitatif data.

#### 2.3.1.1 Distribusi frekuensi

Distribusi frekuensi secara visual menampilkan serta dan mengatur dan menyajikan jumlah frekuensi ( $n$ ) sehingga informasi itu dapat diinterpretasikan secara lebih mudah. Sepanjang perhitungan frekuensi, hal ini dapat termasuk frekuensi relatif, kumulatif, dan frekuensi kumulatif relatif.

1. Frekuensi ( $n$ ) adalah jumlah variabel tertentu mengasumsikan nilai itu.
2. Frekuensi kumulatif ( $N$ ) adalah jumlah akhir (atau jumlah terbaru) semua frekuensi sampai batas tertentu dalam sebuah kumpulan data.
3. Frekuensi relatif ( $f$ ) adalah persentase dari frekuensi.
4. Frekuensi relatif kumulatif ( $F$ ) adalah persentase dari frekuensi kumulatif.

#### 2.3.1.2 Kadar rata-rata

Kadar rata-rata ukuran tendensi sentral yang paling banyak. Hal ini dapat digunakan untuk data diskrit dan kontinu. Nilai rata-rata adalah angka representasi atau biasa juga disebut sebagai *mean* dari suatu kelompok data yang mewakili. Rumus dari nilai kadar rata-rata adalah:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

#### 2.3.1.3 Median

*Median* adalah nilai tengah atau rata-rata aritmetika dari dua nilai tengah variabel yang berurut dari nilai terkecil ke nilai yang terbesar. Sehingga, 50% nilai observasi lebih besar atau sama dengan nilai median, dan 50% kurang atau sama dengan nilai median.

#### 2.3.1.4 Modus

Modus adalah nilai yang paling sering muncul dari suatu variabel. Variabel dimana setiap data memiliki jumlah yang sama dan tidak memiliki modus. Jika hanya satu nilai yang muncul dengan frekuensi terbesar, variabel bersifat *unimodal*, dan memiliki satu nilai modus. Jika ada dua nilai yang memiliki frekuensi yang sama, variabelnya bersifat *bimodal*, dan memiliki dua nilai modus. Jika lebih dari dua nilai yang memiliki frekuensi yang sama, variabelnya bersifat multimodal, dan memiliki lebih dari dua nilai modus (McCune, 2009)

### 2.3.1.5 Persentil dan Kuartil

Cara paling umum untuk melaporkan kedudukan relatif suatu angka dalam kumpulan data adalah dengan menggunakan persentil (Rumsey, 2010). Nilai persentil secara matematis dinyatakan sebagai berikut (Maroco, 2011):

$$P_p = \begin{cases} X_{int(i+1)} & \text{if } i = \frac{np}{100} \text{ is not integer} \\ \frac{X_i + X_{i+1}}{2} & \text{if } i = \frac{np}{100} \text{ is integer} \end{cases}$$

dimana n adalah banyaknya sampel dan  $int(i + 1)$  adalah bagian integer dari  $i + 1$ .

### 2.3.1.6 Standar deviasi dan varians

Varians dan standar deviasi secara luas digunakan untuk mengukur variabilitas. Standar deviasi dan memberikan ukuran variabilitas dari suatu variabel. Jika tidak ada variabilitas pada suatu variabel, setiap nilai datanya sama dengan nilai kadar rata-rata, sehingga baik varians dan standar deviasi variabelnya 0. Semakin jauh nilai variabel dari nilai kadar rata-rata, semakin tinggi nilai varians dan standar deviasinya.

Rumus dalam menentukan nilai varians dan standar deviasi (untuk suatu sampel dan populasi) adalah:

1. Populasi nilai varians:  $\sigma^2 = \frac{\sum (x_i - \mu)^2}{N}$ , dimana  $x_i$  adalah nilai data dari populasi,  $\mu$  adalah nilai rata-rata dari populasi, dan N adalah banyaknya jumlah populasi.

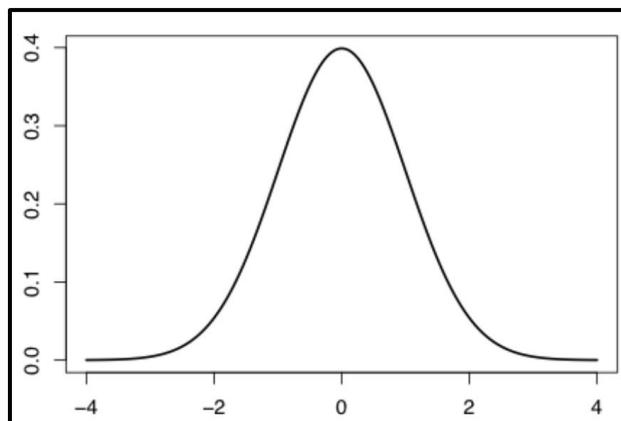
2. Sampel varians:  $s^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$  , dimana  $x_i$  adalah nilai dari sampel, dimana adalah  $n\bar{x}$  rata-rata dari sampel dan  $n$  adalah banyaknya sampel.
3. Standar deviasi populasi:
4. Standar deviasi sampel:  $s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$

### 2.3.2 Fungsi Distribusi Inferensi

Proses analisis statistik inferensi membutuhkan fungsi distribusi kerapatan data (fungsi yang memberikan nilai probabilitas pada setiap observasi sampel) diketahui, oleh karena itu, distribusi sampel dapat diestimasi. Sehingga, prosedur umum yang digunakan pada analisis statistik untuk menguji dimana saja observasi sampel yang paling tepat berdasarkan teori distribusi. Beberapa pengujian statistik (seperti pengujian Kolmogorov-Smirnov atau pengujian Shapiro-Wilk) dapat digunakan untuk mengecek distribusi sampel untuk menentukan teori tertentu. Berikut beberapa distribusi fungsi probabilitas yang umum digunakan untuk analisis statistik:

#### 1. Distribusi normal

Distribusi normal atau distribusi Gaussian adalah fungsi probabilitas kerapatan yang paling penting dalam statistik inferensi. Persyaratan untuk suatu data dikatakan terdistribusi normal adalah tuntutan beberapa metodologi statistik yang sering digunakan (disebut metode parametrik) (Maroko, 2011). Model dari distribusi normal dapat dilihat pada Gambar 2.7



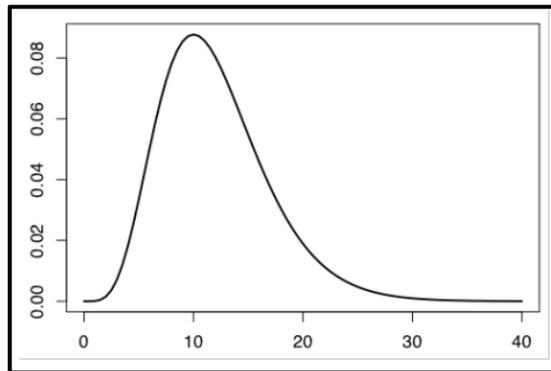
Gambar 2. 7 Distribusi normal (Kerns, 2010)

## 2. Distribusi *Chi-Square*

Variabel *random*  $X$  mengandung penjumlahan dari  $n$  jumlah variabel acak  $Z_i \sim N(0,1)$  memiliki distribusi *Chi-Square* dengan nilai derajat  $n$  bebas. Persamaan distribusi *Chi-Square* dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$f_X(x) = \frac{1}{2^{\frac{n}{2}} \cdot \int_0^{+\infty} x^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-x} \cdot dX} \cdot x^{\frac{n}{2}-1} \cdot e^{-\frac{x}{2}}$$

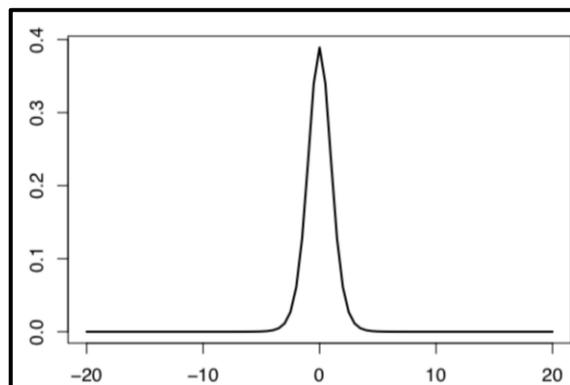
Dengan nilai  $n > 0$  dan  $x > 0$ . Gambar 2.8 menunjukkan distribusi *chi-square*.



Gambar 2. 8 Contoh distribusi *Chi-square* (Kerns, 2010)

## 3. *Student's distribution*

*Student t-distribution* adalah distribusi probabilitas yang digunakan untuk mengestimasi parameter dari populasi Ketika ukuran sampel dan/atau ketika populasi varians tidak diketahui. Ilustrasi *student 't distribution* dapat dilihat pada gambar 2.9.

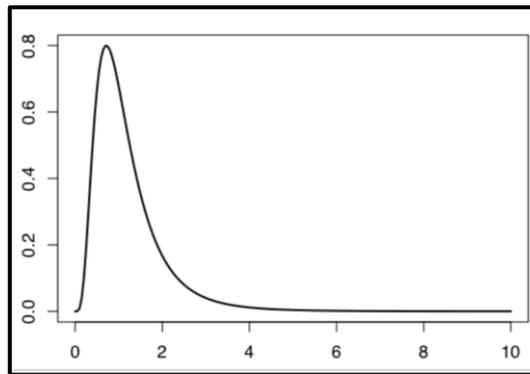


Gambar 2. 9 Student t distbution (Kerns, 2010)

## 4. *Snedecor's F-distribution*

*Snedecor's F-distribution* adalah distribusi statistik yang berlanjut dimana peningkatan observasi atau tes dimana 2 variabel memiliki varians yang sama. Ilustrasi *Snedecor's F-distribution* dapat dilihat pada gambar 2.10. Fungsi distribusi dari variabel ini dinyatakan dengan (Kerns, 2010):

$$f_X(x) = \frac{\tau\left(\frac{m+n}{2}\right)}{\tau\left(\frac{m}{2}\right) \cdot \tau\left(\frac{n}{2}\right)} \cdot \left(\frac{m}{n}\right)^{\frac{m}{2}} \cdot x^{\frac{m}{2}-1} \cdot \left(1 + \frac{m}{n}x\right)^{-\frac{m+n}{2}}, x > 0$$



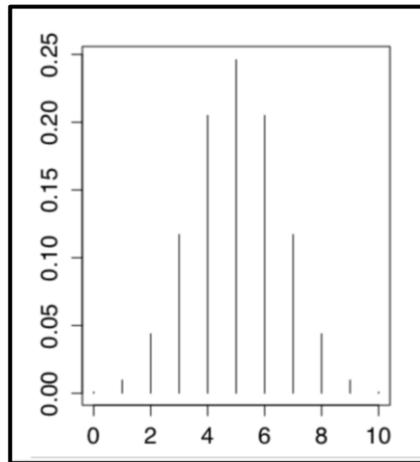
Gambar 2. 10 Snedecor's F-distribution (Kerns, 2010)

#### 5. *Binomial Distribution*

Distribusi binomial adalah distribusi diskrit yang paling banyak digunakan dalam inferensi statistik untuk menguji hipotesis mengenai proporsi variabel nominal dikotomi (contohnya benar atau salah, ada atau tidak ada). Persamaan untuk distribusi *binomial* secara matematis dinyatakan sebagai berikut:

$$f_X(x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, x = 0, 1, 2, \dots, n$$

Gambar 2.11 menunjukkan contoh distribusi *binomial*



Gambar 2. 11 *Binomial distribution (Kerns, 2010)*

### 2.3 Kemiringan Lereng

Kemiringan lereng menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi pembentukan endapan nikel laterit. Secara umum berdasarkan klasifikasi kemiringan lereng Van Zuidam, pembagian kemiringan lereng terdiri dari beberapa kelompok kemiringan lereng. Pembagian kelompok kemiringan lereng terdiri dari beberapa klasifikasi antara lain klasifikasi kemiringan lereng datar, kemiringan lereng agak landai, kemiringan lereng landai, kemiringan lereng agak curam, kelompok kemiringan lereng terjal, dan kemiringan lereng sangat terjal. Klasifikasi kemiringan lereng menurut van zuidam dapat dilihat pada tabel

Tabel 2. 2 Klasifikasi kemiringan lereng (Van Zuidam, 1985)

Klasifikasi	Kemiringan Lereng		Beda Tinggi (m)
	Persen (%)	Derajat (°)	
Datar	0 – 2	0 – 2	<5
Agak Landai	2 - 7	2 – 4	5 – 25
Landai	7 – 15	4 – 8	25 – 75
Agak Curam	15 – 30	8 – 16	75 – 200
Curam	30 – 70	16 – 35	200 – 500
Terjal	70 – 140	35 – 55	500 – 1000
Sangat Terjal	>140	>55	>1000

### **2.3 Geostatistik**

Geostatistik adalah teknik statistik yang digunakan untuk memperkirakan parameter di lokasi yang tidak diketahui dengan cara menguji hubungan antara variabel yang tercatat di satu lokasi dan variabel yang sama yang diukur pada posisi lain yang jaraknya tetap dari titik pertama (data spasial) (Oliver dan Carol, 2005).

Data spasial ini unik karena bersifat independen dan heterogen. Hasil yang dianalisis di satu tempat dipengaruhi oleh lokasi lain dalam sistem, dan perbedaan geografis menjadi penyebab heterogenitas. Independensi disebabkan oleh ketidakakuratan komputasi pengamatan (Cressie, 1993).

### **2.4 Estimasi Sumberdaya dan Analisis Sebaran Kadar**

Untuk menentukan apakah layak untuk melanjutkan ke tahap penambangan berikutnya, perhitungan cadangan, estimasi sumberdaya memperkirakan potensi deposit mineral bijih yang ditemukan di permukaan tanah. Ada banyak jenis teknik

Memprediksi kualitas dan kuantitas material yang akan ditambang, bagaimanapun, adalah tujuan utama. Saat memperkirakan, Anda harus mempertimbangkan dua situasi berikut:

1. Estimasi sementara yaitu estimasi dengan data bor yang memiliki spasi bor yang lebar. Estimasi dapat dijadikan sebagai acuan untuk menentukan spasi titik bor untuk estimasi yang lebih detail.
2. Estimasi akhir yaitu estimasi yang bertujuan untuk menentukan material *ore* dan material *waste*.

Dengan bantuan estimasi sementara, dimungkinkan untuk memprediksi tonase dan kadar bijih yang akan diproduksi dalam jumlah besar atau dalam jangka waktu tertentu. Perolehan informasi baru di masa depan merupakan komponen tambahan yang signifikan. Sementara memperkirakan nilai yang diharapkan adalah tujuan dari perkiraan akhir, nilai sebenarnya akan cocok dengan nilai perkiraan yang diharapkan.

Untuk deposit nikel laterit, seringkali ada beberapa teknik estimasi dan analisis. Metode IDW (*Inverse Distance Weighting*), metode poligon/metode AOI

(*Area of Influence*), dan metode Kriging adalah pendekatan yang biasanya digunakan.

a) *Inverse Distance Weighting*

IDW adalah metode interpolasi permukaan yang beroperasi di bawah premis bahwa titik input mungkin berbentuk pusat plot yang terdistribusi secara acak atau seragam. Dengan bantuan kombinasi linier dari nilai sampel ini dan dibobot dengan fungsi kebalikan dari jarak antara titik, metode pembobotan jarak terbalik (IDW) memperkirakan nilai atribut pada titik tanpa sampel. (Hayati 2012).

b) *Kriging*

Interpolasi stokastik termasuk dalam kategori interpolasi kriging. Dengan mengasumsikan kesalahan acak, interpolasi stokastik memberikan penilaian kesalahan dengan nilai prediksi. Mirip dengan IDW, yang memperkirakan nilai di seluruh sampel data menggunakan kombinasi bobot linier, pendekatan kriging adalah teknik estimasi stokastik. Untuk menentukan nilai sumber daya penambangan, gunakan Kriging. Model ini membuat asumsi bahwa ada korelasi spasial antara jarak dan orientasi sampel data.

Menurut Lagueche (2006), pendekatan kriging memiliki kelebihan dan kekurangan, dengan kelebihan adalah kemampuan untuk mengkuantifikasi variasi nilai estimasi untuk menentukan tingkat akurat dari temuan estimasi. Meskipun tidak ada korelasi geografis antar data, pendekatan kriging tetap dapat diterapkan. Kelemahan kriging adalah menganggap data terdistribusi normal, padahal sebagian besar data lapangan tidak. Selain itu, semi-variogram yang dihitung untuk satu set data tidak dapat ditransfer ke set data lainnya. Akibatnya, jika titik sampel tidak mencukupi, akan sulit untuk memperkirakan semivariogram.

## 2.5 Metode Kriging

Daniel Gerhardus Krige, seorang peneliti pertambangan, mengembangkan teknik interpolasi untuk memastikan struktur bijih emas pada tahun 1950.

Berdasarkan data sampel, ia mengekstrapolasi kandungan bijih emas. Sejak saat itu, teknik interpolasi yang dikembangkannya dikenal sebagai kriging.

Untuk menekankan penggunaan unik rata-rata bergerak tertimbang yang mengurangi varians dari hasil yang diproyeksikan, G. Matheron menemukan pendekatan kriging. Kriging menghasilkan estimasi tak bias linier terbaik (BLUE) dari nilai yang diinginkan dari variabel. Pendekatan prediksi kriging menghasilkan temuan yang lebih tepat daripada teknik regresi. Hal ini agar nilai kedekatan dapat diketahui karena metode ini dapat membaca kesalahan-kesalahan yang berkorelasi. (Kleijnen *and* Van Beers, 2004).

*Estimator kriging*  $\hat{Z}(s)$  dapat dirumuskan sebagai berikut (Bohling, 2005):

$$\hat{Z}(s)-m(s)=\sum_{a=1}^n \lambda_a (Z(s_i)-m(s_i))$$

Dengan,

$s_i, s_i$  : lokasi untuk estimasi dan salah satu lokasi dari data yang berdekatan, dinyatakan dengan  $i$

$m(s)$  : nilai ekspektasi dari  $Z(s)$

$m(s_i)$  : nilai ekspektasi dari  $Z(s_i)$

$\lambda_i$  : faktor bobot

$n$  : banyaknya data sampel yang digunakan untuk estimasi.

$Z(s)$  diperlakukan sebagai bidang acak dengan suatu komponen *trend*,  $m(s)$  dan komponen sisa atau error  $e(s) = (Z)(s)-m(s)$ . Estimasi *kriging* yang bersifat sisa pada  $s$  sebagai penjumlahan berbobot dari sisa data di sekitarnya. Nilai  $\lambda_i$  diperoleh dari kovariansi atau *semivariogram*, dengan diperlukan komponen karakteristik sisa (Bohling, 2005).

Tujuan *kriging* adalah untuk menentukan nilai  $\lambda_i$  yang meminimalkan variansi pada estimator, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma^2=\text{var} [\hat{Z}(s)-(Z)(s)]$$

Tiga pokok dalam estimasi *kriging* yang bergantung pada model dengan sifat acak yaitu *simple kriging*, *ordinary kriging*, dan *universal kriging* (Bohling, 2005; Goovaerts, 1998).

1. *Simple Kriging*

*Simple Kriging* adalah bentuk kriging yang membuat asumsi bahwa kadar rata-rata (*mean*) populasi diketahui dan memiliki nilai tetap. Data spasial yang diproyeksikan dibagi menjadi beberapa bagian sebelum diproses menggunakan teknik kriging langsung.

2. *Ordinary kriging*

*Ordinary Kriging* adalah teknik yang beroperasi dengan anggapan bahwa *mean* (rata-rata) populasi tidak diketahui dan tidak ada tren dalam data geografis. Data yang digunakan tidak memiliki tren dan juga tidak ada outlier.

## **2.8 Variogram dan Semivariogram**

Semivariogram adalah setengah ukuran variogram, dan variogram adalah grafik variasi terhadap waktu (*lag*) (Cressie, 1993). Variogram menetapkan ukuran varians, yang kemudian digunakan untuk menghitung pemisahan antara nilai data yang diamati dan kurangnya korelasinya. Menentukan bobot ideal untuk setiap sampel, misalnya, sangat bergantung pada estimasi variogram. Cara yang paling alami untuk membandingkan dua nilai,  $Z(x)$  dan  $Z(x+h)$  pada dua poin  $x$  dan  $x+h$  pada nilai yang mutlak seharusnya mempertimbangkan nilai rata-rata  $[Z(x)-Z(x+h)]$  (Cressie, 1993).

- a) *Komponen Variogram atau Semivariogram*

Berikut ini adalah beberapa elemen yang terdapat pada variogram dan semivariogram:

1. *Range*

*Range* adalah pemisahan dari dataran tinggi variogram atau massa tetap (Isaaks dan Srivastava, 1989). pemisahan antara variogram dan nilai ambang. Menurut sudut pandang yang berbeda, kisaran adalah pemisahan antara situs di mana pengamatan tampaknya tidak terkait, sehingga varians tidak meningkat (Dorsel dan Breche, 1997). Jarak sepanjang sumbu horizontal dari nol ke titik proyeksi transformasi variogram dari miring ke

horizontal diwakili oleh simbol "a" pada grafik variogram. Posisi memiliki dampak pada variabel dalam kisaran ini. Akan ada hubungan antara nilai  $Z(s)$  dan nilai lain dalam batas rentang. Seiring bertambahnya jarak, kekuatan korelasi antara dua nilai juga akan semakin lemah. Korelasi spasial akan dipengaruhi oleh rentang dalam kehidupan nyata.

2. *Sill*

*Sill* adalah periode stabil variogram ketika mencapai jangkauannya (Isaaks dan Srivastava, 1989). *Sill* menunjukkan wilayah variogram di mana ia menjadi datar, yaitu, di mana varians tidak naik. (Dorsel dan Breche, 1997).

3. *Nugget effect*

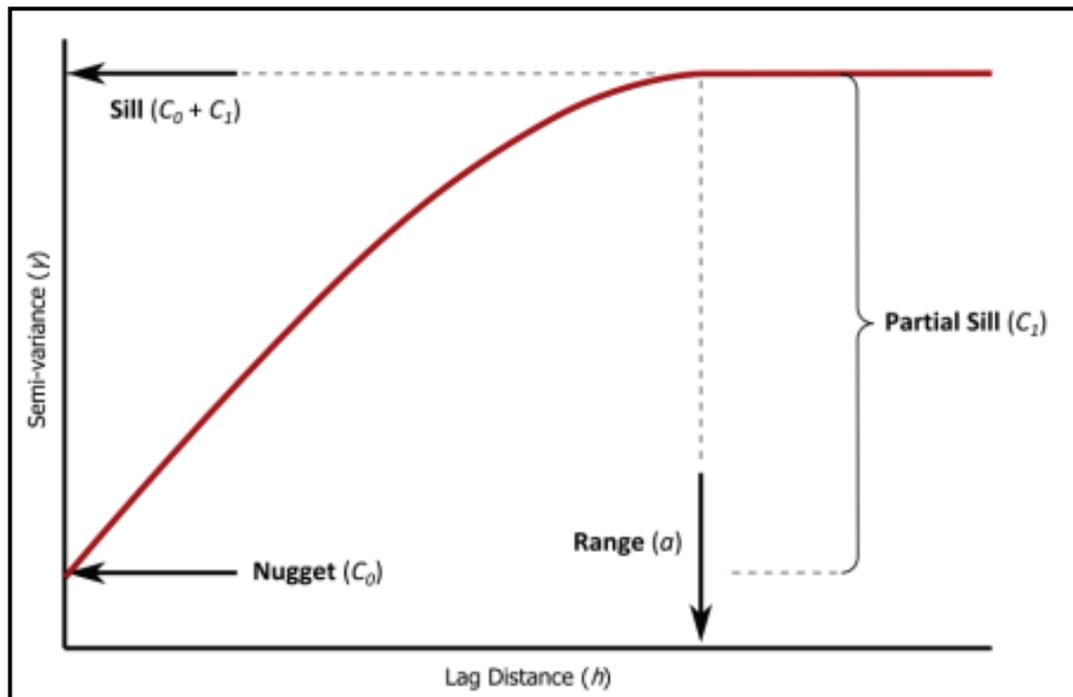
*Nugget effect* mengacu pada diskontinuitas di pusat variogram ke garis vertikal yang melompat dari nilai pusat 0 ke nilai variogram pada jarak terpendek pemisahan. *Relative nugget effect*, yang biasanya dilaporkan dalam %, adalah rasio *nugget effect* terhadap ambang (Isaaks dan Srivastava, 1989). *Nugget effect* mungkin berbentuk kesalahan sistematis, atau biasanya berupa kesalahan manusia, kesalahan alat membaca, kesalahan sampel, dll.

Adapun klasifikasi perbandingan *nugget ratio* (Dominy dkk., 2001), yaitu:

- a. *Low nugget ratio* : <25%
- b. *Medium nugget ratio* : 25% - 50%
- c. *High nugget ratio* : 50% - 75%
- d. *Extreme nugget ratio* : >75%

Rumus *nugget ratio* (Dominy *et al.*, 2003), adalah sebagai berikut:

$$\text{Nugget ratio} = \frac{C_0}{C+C_0} \times 100\%$$



Gambar 2. 12 Model *Semivariogram* (Cressie, 1993).

#### b) *Experimental Variogram*

Variogram eksperimental adalah variogram yang nilai taksirannya didasarkan pada pengambilan sampel. Sumbu jarak antara dua titik dipisahkan menjadi interval berurutan dalam pendekatan biasa memplot variogram eksperimental, seperti histogram. Variogram eksperimental, sebagai alat analisis yang digunakan, memiliki kelemahan bahwa grafiknya tergantung pada pilihan interval dan dipengaruhi oleh prosedur rata-rata. Definisi variogram eksperimental meliputi:

##### 1. *Scale*

Grafik yang disebut variogram eksperimental biasanya digunakan dalam aplikasi geostatistik untuk menguji independensinya. Informasi tentang fluktuasi variabel *scale* disediakan oleh eksperimen ini.

##### 2. *Dekat dengan Pusat*

Cara variogram ditangani pada jarak dekat berdampak pada kelancaran dan kontinuitas fungsi spasial yang muncul. Tingkat kelancaran fungsi diungkapkan oleh perilaku eksperimental variogram di dekat pusat (pada jarak dekat).

### 3. *Large Scale Behaviour*

Kelakuan variogram pada jarak-jarak yang sebanding dengan ukuran daerahnya menentukan apakah fungsi tersebut merupakan fungsi stationary.

Variogram eksperimental akan menstabilkan nilai di dekatnya, yang disebut ambang, sebagai fungsi. Sill yang diperoleh akan menggambarkan panjang skala sebagai fungsi stasioner. (Kitanidis, 1997).

#### c) Model Teoretis *Semivariogram*

Untuk membandingkan nilai antara semivariogram eksperimental dan teoretis, nilai dari semivariogram teoretis akan digunakan. Model mana, selain itu, yang memiliki nilai terendah akan digunakan kemudian untuk memperkirakan data geografis. Model semivariogram teoretis ini disediakan untuk perbandingan (Micromine, 2014):

#### 1. Model *Spherical*

Model *Spherical* adalah model yang paling sering digunakan dalam *variogram*. Bentuk persamaannya adalah sebagai berikut. Model *Spherical (Sph)* adalah bentuk linear dengan kecepatan perubahan *slope* untuk mencapai *sill*. Model *spherical* digunakan dalam estimasi kualitas kadar.

$$y(h) = \begin{cases} C_0+C & \left[ \left( \frac{3h}{2a} \right) - 0,5 \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right] \\ C_0+C & \end{cases} \quad h \leq a \text{ dan untuk } h > a$$

Dengan,

$h$  : jarak lokasi sampel

$C_0+C$  : *sill*, yaitu nilai *semivariogram* untuk jarak pada saat besarnya konstan

$a$  : *range*, yaitu jarak pada saat nilai *semivariogram* mencapai *sill*.

#### 2. Model *exponensial*

Model transisi lain yang biasa digunakan adalah model eksponensial yang memberikan *sill asimtotik*. Bentuk persamaannya adalah sebagai berikut. Model ini memiliki lengkungan lebih besar dibandingkan dengan model *spherical* dan menunjukkan perubahan *slope* secara bertahap hingga mencapai *sill*. Model *exponential* digunakan dalam estimasi kualitas kadar.

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

### 3. Model *Gaussian* (Normal)

Model *Gaussian* adalah model transisi yang sering kali digunakan untuk memodelkan fenomena kontinu yang ekstrim dan juga memberikan *sill asimtotik*. Bentuk persamaannya adalah sebagai berikut.

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

### 4. Model *linear*

Model *linear* merupakan model yang tidak mencapai *sill*. General Linear digunakan untuk elevasi topografi dan *ketebalan* seam batubara.

## 2.9 Teorema Bayes dalam Statistik

Statistik Bayesian memiliki keunggulan, dibandingkan dengan statistik tradisional, yang tidak didasarkan pada teorema Bayes. Dengan menggunakan teorema Bayes probabilitas munculnya suatu data didasarkan data yang sudah ada sebelumnya. Masalah yang terkait dengan pengujian hipotesis atau estimasi suatu daerah untuk parameter yang tidak diketahui dapat dengan mudah ditangani dengan teorema Bayes. Alasannya adalah bahwa dengan menggunakan teorema Bayes diperoleh fungsi sebaran kepadatan probabilitas untuk parameter yang tidak diketahui. Fungsi kepadatan ini memungkinkan untuk estimasi parameter yang tidak diketahui, pengujian hipotesis dan perhitungan daerah kepercayaan.

Statistik tradisional memperkenalkan probabilitas untuk kejadian acak yang dihasilkan dari eksperimen acak. Probabilitas diinterpretasikan sebagai frekuensi relatif terjadinya suatu peristiwa yang diberikan banyak percobaan berulang. Istilah probabilitas ini harus digeneralisasi untuk statistik Bayesian, karena fungsi

kepadatan probabilitas diperkenalkan untuk parameter yang tidak diketahui, seperti yang telah disebutkan di atas. Parameter ini dapat mewakili konstanta yang tidak dihasilkan dari eksperimen acak. Oleh karena itu, probabilitas tidak hanya terkait dengan peristiwa acak tetapi lebih umum dengan pernyataan atau proposisi, yang merujuk pada parameter yang tidak diketahui ke nilai parameter. Oleh karena itu, probabilitas tidak hanya ditafsirkan sebagai frekuensi, tetapi juga mewakili kemungkinan pernyataan. Keadaan pengetahuan tentang suatu proposisi dinyatakan dengan probabilitas.

Secara matematis teorema Bayes dinyatakan sebagai berikut:

$$P(A/B) = \frac{P(B/A)P(A)}{P(B)}$$

Dimana,  $P(A/B)$  : Peluang kejadian A bila B terjadi.

$P(B/A)$  : Peluang kejadian B bila A terjadi.

$P(A)$  : Peluang kejadian A

$P(B)$  : Peluang kejadian B

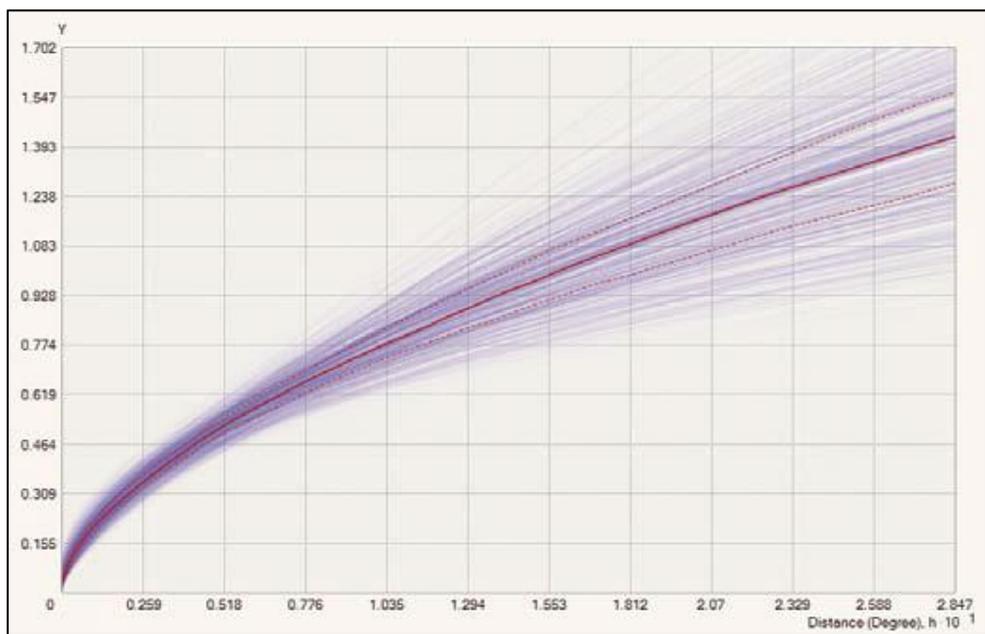
## 2.10 Empirical Bayesian Kriging

Metode *empirical Bayesian kriging* (EBK) metode pengembangan dari metode *kriging*. Metode EBK berbeda dari metode *kriging* pada umumnya dengan memperhitungkan kemungkinan error dari *semivariogram*. Setelah melakukan pemodelan *semivariogram* kemudian terbentuk banyak *semivariogram* yang memiliki bobot tertentu. Langkah-langkah dalam estimasi dengan menggunakan metode EBK adalah sebagai berikut:

1. Estimasi model *semivariogram* dari data yang dimiliki.
2. Menggunakan *semivariogram* untuk mensimulasikan nilai *semivariogram* baru dari setiap data yang diinput.
3. Model *semivariogram* baru diestimasi dari data simulasi. Setiap bobot dari *semivariogram* kemudian dihitung dengan menggunakan teorema

bayes, yang menunjukkan seberapa besar kemungkinan data yang diamati dapat dihasilkan dari *semivariogram*.

Metode EBK dalam proses estimasinya dapat mensimulasikan data yang diinput sampai dengan 10.000 simulasi untuk memperoleh model *semivariogram* yang akurat. Hasil dari *semivariogram* tersebut kemudian membentuk spektrum *semivariogram* yang diperoleh dari ribuan kali hasil simulasi pemodelan *variogram*. Contoh hasil *fitting variogram* dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2. 13 Spektrum model *semivariogram* yang dihasilkan dari metode EBK (Krivoruchko, 2019)