

**ESTIMASI SUMBER DAYA BAUKSIT MENGGUNAKAN METODE *ORDINARY KRIGING*  
DI KECAMATAN MELIAU, KALIMANTAN BARAT**

***ESTIMATION OF BAUXITE RESOURCES  
BASED ON ORDINARY KRIGING METHODS AT KECAMATAN MELIAU,  
WEST KALIMANTAN***

**Westia Alifah Surya Pratiwi<sup>1</sup>, Denny Lumban Raja<sup>1</sup>, Priatna<sup>1</sup>, Sarah Mutia<sup>2</sup>,  
dan Dedi Sunjaya<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Politeknik Energi dan Pertambangan Bandung

<sup>2</sup>Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi

<sup>3</sup>Unit Geomin, PT. Aneka Tambang

alifahw21@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v19i2.492>

**ABSTRAK**

Estimasi sumber daya mineral sangat penting dalam pertambangan khususnya dalam menentukan target produksi, *design pit* tambang, dan keputusan dalam investasi. Hasil estimasi sumber daya yang akurat akan memudahkan perencanaan tambang yang optimal. Objek pada penelitian ini ialah penerapan teknik estimasi yang memperhatikan geostatistik yaitu *ordinary kriging* dalam melakukan estimasi sumber daya endapan bauksit. Lokasi penelitian berada di busur laterit Kalimantan Barat. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui litologi pembentuk endapan bauksit, sebaran kadar, dan estimasi sumber daya bauksit serta jarak spasi sumur uji yang optimal sebagai dasar klasifikasi sumber daya di daerah penelitian. Data yang digunakan dalam melakukan estimasi berupa data eksplorasi dari 212 titik lokasi sumuran uji. Untuk mengetahui jenis litologi dilakukan analisis petrografi terhadap 4 empat sampel. Dari hasil penelitian diketahui litologi pembentuk endapan bauksit terdiri atas granodiorit, diorit kuarsa, dan granit. Endapan bauksit daerah penelitian dominan berasal dari granodiorit dengan kadar  $Al_2O_3$  tinggi, oleh karena itu karakteristik bauksit merupakan *kaolinitic bauxite*. Hasil estimasi sumber daya bauksit berdasarkan *cut-off grade*  $Al_2O_3 >35\%$ ,  $RSiO_2 <8\%$ , dan  $TSiO_2 \leq 30\%$  sebesar 722.720 ton *washed bauxite*, dengan kadar rerata 39,78%  $Al_2O_3$ , 3,73%  $RSiO_2$  dan 25,05%  $TSiO_2$ , dengan faktor kongresi (*concretion factor*) 48,44%. Sumber daya *washed bauxite* dengan status tereka sebesar 146.962 ton, sumber daya tertunjuk sebesar 550.482 ton, dan sumber daya terukur 221.643 ton Berdasarkan perhitungan *sill* variogram diperoleh spasi jarak optimum sumur uji untuk eksplorasi bauksit di daerah penelitian dengan klasifikasi sumber daya tereka 100 m, tertunjuk 50 m dan terukur 25 m.

**Kata kunci:** Geostatistik, *Ordinary Kriging*, Bauksit, Estimasi Sumber Daya, *Cutoff Grade*

**ABSTRACT**

*The estimation of mineral resources is crucial in mining, particularly in determining production targets, pit design, and investment decisions. Accurate resource estimation results will facilitate optimal mine planning. The objective of this study is the application of estimation techniques that consider geostatistics, namely ordinary kriging, in estimating bauxite deposit resources. The research location is in the laterite arc of West Kalimantan. The data used for estimation are exploration data from 212 test pit locations. The aim of this study is to identify the lithology of the bauxite deposit, distribution of grades, and estimate bauxite resources as*

well as determine the optimal spacing of test pits as a basis for resource classification in the study area. Petrographic analysis was conducted on four samples to determine the lithology. The study results indicate that the lithology forming the bauxite deposit consists of granodiorite, quartz diorite, and granite. The bauxite deposits in the study area are predominantly derived from granodiorite with high  $Al_2O_3$  content, thus characterizing the bauxite as kaolinitic bauxite. The bauxite resource estimation results, based on a cut-off grade of  $Al_2O_3 > 35\%$ ,  $RSiO_2 < 8\%$ , dan  $TSiO_2 \leq 30\%$ , amounted to 722,720 tons of washed bauxite, with an average grade of 39,78%  $Al_2O_3$ , 3,73%  $RSiO_2$  dan 25,05%  $TSiO_2$ , with a concretion factor of 48.44%. The inferred washed bauxite resources are 146,962 tons, the indicated resources are 550,482 tons, and the measured resources are 221,643 tons. Based on the sill variogram calculation, the optimal spacing for test pits for bauxite exploration in the study area with resource classification is 100 m for inferred, 50 m for indicated, and 25 m for measured resources.

**Keywords:** Geostatistic, Ordinary Kriging, Bauxite, Resources estimate, Cutoff Grade

## PENDAHULUAN

Pemodelan sumber daya adalah kegiatan yang harus dilakukan sebelum lanjut ke tahap penambangan. Perlu estimasi sumber daya dengan metode yang tepat untuk komoditas mineral tertentu. Hasil estimasi sumber daya yang akurat akan memudahkan perencanaan tambang yang optimal. Prinsip estimasi sumber daya adalah berdasarkan pendekatan dari kondisi yang sebenarnya yang dihasilkan dari kegiatan eksplorasi (Balfas dkk., 2021). Untuk mengetahui hal ini tentunya diperlukan estimasi sumber daya terukur pada suatu wilayah.

Eksplorasi dilakukan untuk mendapatkan data endapan bauksit dengan kualitas tinggi. Eksplorasi bauksit dilakukan di Kalimantan Barat, dimana merupakan daerah potensial terbentuknya sumber daya bauksit.

Tujuan penelitian adalah mengetahui sumber daya endapan laterit bauksit dengan metode *ordinary kriging*, serta mendapatkan jarak spasi titik lokasi sumur uji yang optimal dalam penentuan klasifikasi status sumber daya bauksit di lokasi penelitian.

Bauksit adalah suatu endapan laterit yang terdiri dari aluminium hidroksida murni yang merupakan bijih utama dari aluminium (Schellman, 1986). Bauksit akan terbentuk pada batuan yang

terlapukkan. Batuan mengalami pelapukan dapat disebabkan oleh pengaruh sifat fisik, kimia ataupun organisme. Faktor-faktor yang mempengaruhi pembentukan bauksit (Valeton, 1972):

1. Kandungan batuan induk yang kaya akan Al, rendah Fe, dan rendah  $SiO_2$ . Contohnya ialah anortosit, fonolit, basalt, andesit, diabas, gabro, hornfels, sabak, sekis, batu lanau, dan batu serpih. Selain itu batuan induk dengan kandungan feldspar yang tinggi seperti granit dan riolit.
2. Permeabilitas batuan yang memungkinkan terjadinya pergerakan air tanah sehingga mudah terjadi desilikasi.
3. Daerah subtropis-tropis, dengan intensitas penguapan yang tinggi dan kondisi iklim dengan curah hujan yang tinggi.
4. Topografi bergelombang yang mendukung terjadinya pergerakan muka air tanah.
5. Tingkat erosi lebih rendah dibandingkan tingkat pelapukan kimia.
6. Benua yang stabil secara tektonik (benua tua) sehingga mendapatkan waktu yang cukup dalam mengakumulasi material hasil pelapukan.
7. Pelapukan organisme atau vegetasi yang membantu proses pelapukan kimia.

Penelitian ini dilaksanakan di Kecamatan Meliau dengan luas daerah penelitian 723.456 m (Gambar 1). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pemodelan sumber daya endapan bauksit dengan metode *ordinary kriging*, serta mendapatkan jarak spasi titik lokasi sumur uji yang optimal dalam penentuan klasifikasi status sumber daya bauksit di lokasi penelitian.

**Geologi Regional**

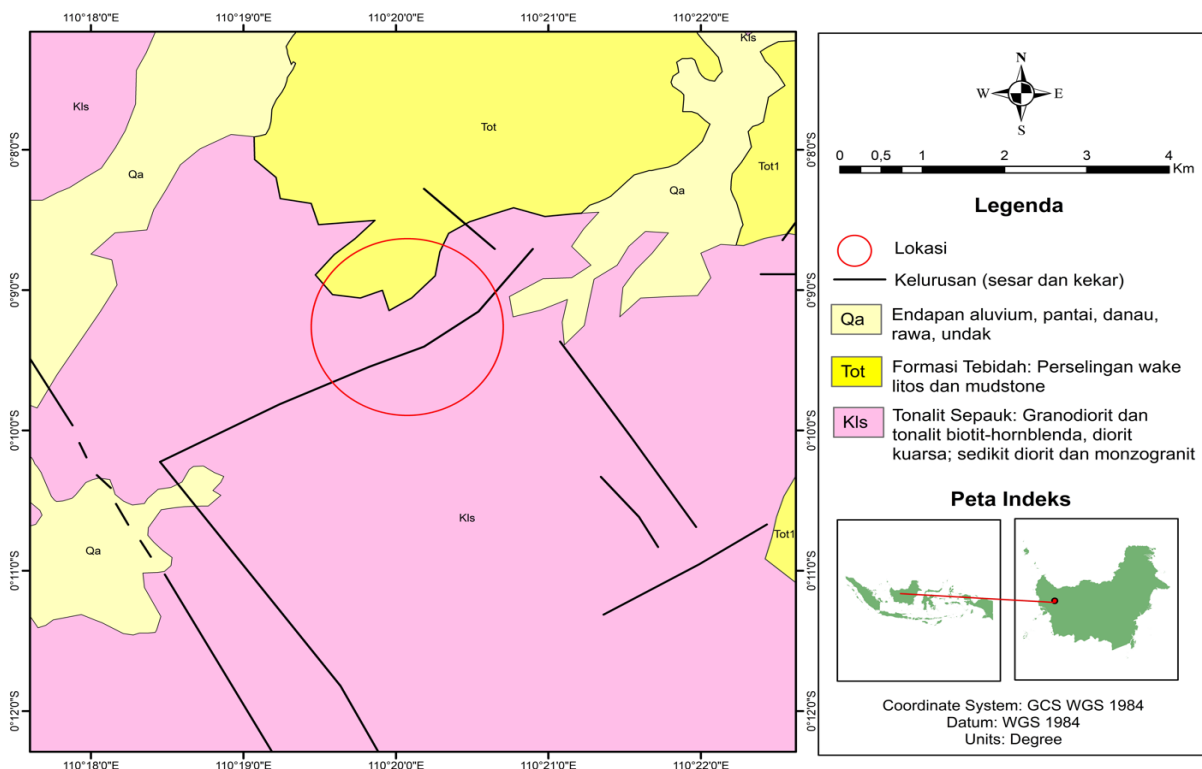
Kalimantan Barat merupakan bagian dari pertumbuhan *Sundaland* yang pada Kapur Akhir membentuk tanjung dari Lempeng Eurasia dan dipisahkan oleh lautan dalam dari India dan Australia, saat pada bagian barat dibatasi oleh zona subduksi dan kolisi (Hall dan Morley, 2004) dalam Sunjaya, 2022). Batolit Schwaner sebagai Tonalit Sepauk di daerah penelitian terjadi karena subduksi antara batas tenggara Sundaland dan Southwest Banda dengan lempeng Paleo-Pasifik pada Kapur Awal, sehingga menyebabkan peristiwa magmatisme. Setelah subduksi berhenti pada Kapur

Akhir, terjadi kolisi antara blok Argo dengan batas Sundaland sehingga terjadi pensesaran ekstensional yang menyebabkan magmatisme di sepanjang tepi benua aktif sisa subduksi (Hennig dkk., 2017).

Berdasarkan peta geologi regional Lembar Pontianak, Kalimantan, skala 1:250.000 (Sanyoto, dkk.,1993), stratigrafi daerah penelitian terdiri atas kelompok batuan Malihan Pinoh (PzTRp), Tonalit Sepauk (Kls), Formasi Tebidah (Tot), dan Endapan Alluvial (Qa) (Gambar 1).

**Ordinary Kriging**

*Ordinary Kriging* merupakan metode interpolasi dari metode geostatistik. Teori geostatistik memberikan dasar untuk mengoptimalkan estimasi sesuai dengan kriteria yang diterima dengan baik (misalnya, kuadrat terkecil) dan menghasilkan ukuran kualitas (variansi kesalahan) dari estimasi tersebut (Sinclair dkk., 2006).



**Gambar 1.** Peta lokasi dan geologi regional daerah penelitian (modifikasi dari Sanyoto dkk.,1993)

**Variogram**

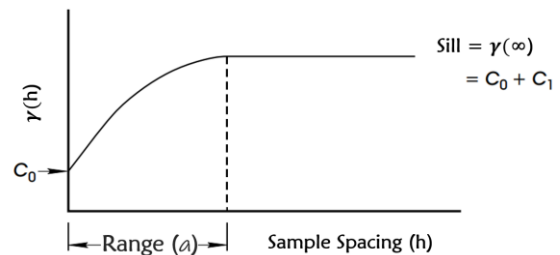
Instrumen penting dalam analisis geostatistik adalah variogram, yang tidak hanya digunakan untuk estimasi variansi (*mean squared error*) antara nilai  $Z(x+h)$  dan  $Z(x)$ , tetapi juga dapat mengukur variansi dalam estimasi tersebut. Variogram oleh Journel and Hujibreight (1978) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

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

Dimana:

- $\gamma(h)$  = Nilai variogram untuk arah tertentu dan jarak h
- h = 1d, 2d, 3d, 4d, (d=jarak k antar conto)
- $Z(x_i)$  = harga (data) pada titik xi
- $Z(x_i + h)$  = data pada titik yang berjarak h dari xi
- N(h) : jumlah pasangan data

Variogram (atau dikenal sebagai semi-variogram) adalah plot perbedaan khas dalam kelas yang diplot terhadap jarak yang memisahkan sampel. Terdapat tiga model semivariogram teoritis yang sering digunakan sebagai pembanding dengan semivariogram eksperimental, yaitu model *spherical*, model gaussian, dan model eksponensial. Variogram memiliki tiga parameter yaitu *nugget* ( $C_0$ ), *sill* ( $C_0+C_1$ ), dan *range* (a) (Gambar 2) *Nugget* merupakan perbedaan nilai suatu karakteristik sampel pada jarak=0. *Sill* adalah ketika pemisahan antara sampel meningkat, maka perbedaan di antara mereka meningkat, sampai kita mencapai jarak di mana perbedaan antara nilai sampel tidak tergantung pada pemisahan mereka, tetapi sama dengan variabilitas latar belakang atau varians populasi. Dataran tinggi ini dalam nilai variogram disebut ambang. Sedangkan *range* adalah hubungan variansi spasial antar data, rentang adalah jarak di mana sampel tidak lagi berkorelasi secara spasial. *Range* adalah jarak di mana sill total tercapai. (Coombes, 2008).



**Gambar 2.** Variogram model *spherical* (Sinclair dkk, 2006)

**Estimasi Ordinary Kriging**

*Kriging* memberikan bobot lebih pada sampel dengan jarak terdekat dibandingkan sampel dengan jarak yang lebih jauh, Persamaan umum fungsi kriging (Armstrong, 1998):

$$Z(v) = \sum \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

Dimana:

- $Z(v)$  = Nilai estimasi pada blok v
- $\lambda_i$  = Bobot pada lokasi i
- $Z(x_i)$  = Nilai data pada lokasi i

Dengan:

$$\sum \lambda_i = 1$$

Dalam *Ordinary kriging* untuk mendapatkan bobot  $x_i$  ditentukan persamaan matriks dalam persamaan matriks dari variogram antar titik dan variogram titik ke blok estimasi:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_i \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{n1} \\ 1 \end{bmatrix}$$

**Analisis Statistik**

Statistik dalam bahasa artinya catatan angka-angka yang disajikan untuk memberikan informasi yang berarti. Analisis statistik berfungsi untuk menjelaskan hubungan antar data dan kecenderungan data sebelum memilih metode penaksiran. Statistik univarian adalah teknik analisis statistik yang hanya melibatkan satu variabel *dependent*. Berguna dalam menganalisis hubungan dari masing-masing data atau variabel dari

suatu populasi dengan tanpa memperlihatkan lokasi dari data-data yang ada. Parameter statistik untuk menggambarkan letak data antara lain rata-rata (mean), nilai tengah (median), nilai yang sering muncul (modus), nilai maksimum dan minimum, variansi, standar deviasi, *skewness*, *kurtosis*, koefisien variansi, dan *range*.

**Cross Validation**

Validasi berguna untuk menguji ketepatan hasil estimasi, kecocokan antara parameter estimasi dan variogram yang telah dibuat. Hal ini dilihat dalam regresi linear antara dua variabel yang mana terdapat parameter koefisien determinasi dan koefisien korelasi. Nilai koefisien determinasi ( $r^2$ ) adalah ukuran statistik yang menunjukkan seberapa baik data yang dapat diamati oleh model regresi. Sedangkan koefisien korelasi ( $r$ ) ialah mengukur kekuatan dan arah hubungan linear antara dua variabel. Jika nilai  $r < 0$  menunjukkan hubungan negatif antar dua variabel. Jika  $r$  mendekati 1 maka hasil estimasi dikatakan cukup baik karena menunjukkan hubungan positif antar dua variabel. Selain itu dalam estimasi tak hanya melihat validasi silang dengan *scatter plot*, tetapi juga tingkat kepercayaan seperti *kriging variance*. *Kriging variance* mengukur tingkat keyakinan dari masing-masing blok model. Apabila didapati nilai *kriging variance* yang rendah maka artinya kualitas estimasinya baik.

**Estimasi Sumber Daya**

Tingkat sumber daya mineral terdiri dari sumber daya mineral tereka, sumber daya mineral tertunjuk, dan sumber daya mineral terukur (SNI 4726:2019). Sumber daya mineral tereka ialah estimasi berdasarkan bukti geologi dan sampel terbatas dan pengambilan sampel dengan spasi >50m. Sumber daya mineral tertunjuk ialah estimasi dengan sampel pada spasi 25-50m pada bijih tebal atau struktur jelas. Sumber daya mineral terukur adalah estimasi dengan sampel pada spasi 12.5-

25m, memungkinkan perencanaan tambang dan evaluasi ekonomi cebakan.

*Kriging efficiency (KE)* adalah pengukuran efektifitas estimasi kriging secara akurat pada blok model hasil estimasi. Maka apabila didapatkan nilai KE yang tinggi, artinya efektifitas estimasi lebih baik dan akurat. Dari nilai ini dapat dikategorikan sebagai klasifikasi sumber daya tereka, tertunjuk, terukur (Tabel 1). Semakin dekat jarak antar data pada lokasi spasial maka semakin efektif pemodelan estimasi *kriging*. Rumus *Kriging Efficiency* yang bekerja pada *software* (Krige, 1997).

$$KE = \frac{\text{Between block variance} - \text{kriging variance}}{\text{Between block variance}}$$

**Tabel 1.** Klasifikasi Sumber Daya berdasarkan *Kriging Efficiency* (Krige, 1997)

Klasifikasi	<i>Kriging Efficiency</i>
Terukur	$KE \geq 0,50$
Tertunjuk	$0,30 < KE < 0,50$
Tereka	$KE \leq 0,30$

Dari geostatistik dapat diketahui jarak spasi sumur uji yang optimal untuk klasifikasi sumber daya. Jarak spasi sumur uji yang optimal, ditentukan berdasarkan model variogramnya, yaitu pada ordinatnya (sumbu y) terdapat nilai sill ditarik garis lurus mendatar yang akan memotong kurva variogramnya, kemudian dari titik potong tersebut ditarik garis vertikal ke bawah yang akan memotong absis (sumbu x) di titik h, yang menunjukkan  $a = \text{range variogram}$ , sebagai jarak spasi sumur uji untuk klasifikasi tertunjuk. Untuk nilai  $\gamma(h)$  sama dengan  $2/3$  sill-nya, maka h yang memotongnya sebagai jarak spasi sumur uji untuk klasifikasi sumber daya terukur (Tabel 2).

**Tabel 2.** Klasifikasi Sumber Daya Bauksit berdasarkan *sill* dan *range* variogram (Snowden, 1996)

Klasifikasi	$\gamma(h)$	Jarak Sumur Uji (h)	Spasi
Terukur	2/3 sill	1/2 a	
Tertunjuk	3/3 sill	a	
Tereka	>3/3 sill	2 a	

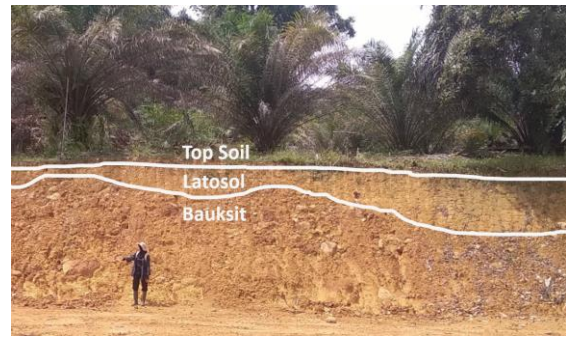
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Morfologi daerah penelitian terdiri atas empat satuan (Sunjaya, D., 2022), yaitu:

1. Satuan morfologi dataran aluvial dan litoral. Satuan ini terletak pada wilayah yang memiliki topografi rendah atau dataran rendah seperti rawa dan danau dangkal.
2. Satuan morfologi rendah dan berbukit tertoreh rapat. Satuan ini tersusun oleh batuan granit dan batuan vulkanik. Satuan ini cukup dominan ditemukan pada daerah penelitian.
3. Satuan morfologi perbukitan dan pegunungan. Satuan ini ditempati oleh kompleks pegunungan Schwaner yang terpotong-potong menjadi perbukitan terisolasi dan tidak menerus akibat sesar. Litologi yang ditemukan pada satuan ini ialah kelompok batuan Tonalit Sepauk dan Gabro Biwa.
4. Satuan morfologi lembah sungai Kapuas, satuan ini terletak di bagian utara dari daerah penelitian dan sekitar Sungai Kapuas yang relatif stabil tanpa perpindahan sistem sungai *meander* dan danau tapal kuda.

Sebagian besar daerah penelitian didominasi oleh kelompok batuan Tonalit Sepauk yang terdiri atas diorit kuarsa, sedikit diorit dan monzogranit, granodiorit, tonalit biotit-hornblenda, granit.

Zona profil laterit bauksit terdiri dari *top soil*, *latosol*, bauksit, dan kong yang terletak pada bagian paling bawah (Gambar 3).



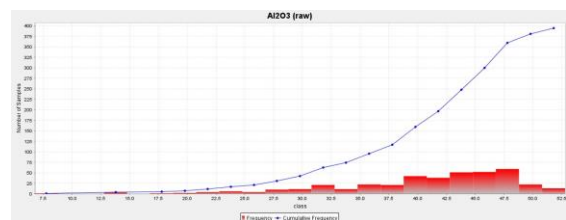
**Gambar 3.** Zona profil bauksit daerah penelitian

**Analisis Statistik Raw Data**

Hasil analisis univarian pada nilai komposit atau *raw data* kadar alumina ( $Al_2O_3$ ) dilakukan terhadap 394 data (Tabel 3) yang menunjukkan bahwa sebaran data terdistribusi secara normal (Gambar 4) dengan adanya pencilon (*outlier*).

**Tabel 3.** Analisis Statistik  $Al_2O_3$

Parameter	$Al_2O_3$
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	6,79
Nilai maksimum	52,68
Mean	40,97
Median	42,82
Variansi	1,79
Standar deviasi	7,62
Skewness	-1,17
Kurtosis	4,60
Koefisien variansi	0,18
Range	45,89



**Gambar 4.** Histogram Data  $Al_2O_3$

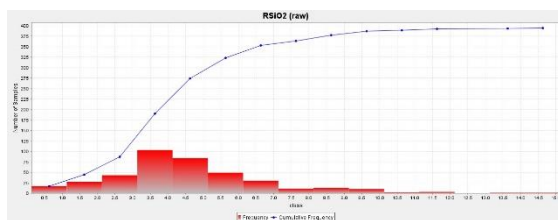
Berdasarkan histogram  $Al_2O_3$  (Gambar 4) dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar -1,17 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George and Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 4,60 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga masih data ini masih dikatakan normal. Namun data

kadar  $Al_2O_3$  ini memiliki standar deviasi yang cukup besar yaitu 7,62 dan koefisien variansi sebesar 0,18. Hal ini berarti bahwa penyebaran data kadar  $Al_2O_3$  cukup bervariasi dan tidak homogen. Terlihat pula *range* data memiliki jangkauan yang cukup jauh, yaitu 45,89 dengan kadar tertinggi 52,68 dan kadar terendah 6,79.

Analisis statistik data kadar/*raw* data  $RSiO_2$  (Tabel 4) juga penting untuk diperhatikan dalam melakukan estimasi sumber daya untuk komoditas bauksit karena sebagai parameter *cut-off grade* yang dapat diterima. *Cut-off grade* (CoG) adalah batas kadar atau nilai minimum dari logam atau mineral yang terkandung dalam suatu volume batuan. Jika kadar atau nilai logam/mineral tersebut di bawah batas ini, maka nilai ekonomi yang terkandung tidak memenuhi persyaratan ekonomi tertentu yang telah ditetapkan dengan kata lain ekstraksi atau penambangannya tidak dianggap menguntungkan secara ekonomi (Sinclair dkk., 2006). Sehingga perlu dilakukan analisis statistik univarian terhadap nilai kadar komposit  $RSiO_2$ .

**Tabel 4.** Analisis Statistik  $RSiO_2$

Parameter	$RSiO_2$
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	0,13
Nilai maksimum	14,15
Mean	4,58
Median	4,17
Variansi	2,76
Standar deviasi	2,19
Skewness	1,04
Kurtosis	5,14
Koefisien variansi	0,47
Range	14,15



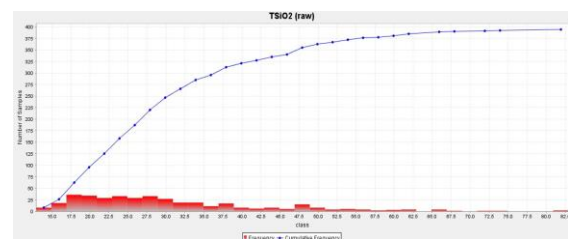
**Gambar 5.** Histogram Data  $RSiO_2$

Berdasarkan data di atas diketahui bahwa nilai minimum dari kadar  $RSiO_2$  ialah 0,13 dan maksimumnya 14,15 dengan nilai rata-rata 4,58. Hal ini menandakan terdapat lokasi yang cukup jauh dengan nilai rata-rata atau disebut sebagai *outlier*. Kemudian dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar 1,04 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George and Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 5,14 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga data ini masih dikatakan terdistribusi normal. Data kadar  $RSiO_2$  ini memiliki standar deviasi yaitu 2,19 dan koefisien variansi sebesar 0,47. Hal ini merupakan nilai yang kecil sehingga penyebaran data kadar  $RSiO_2$  homogen. Nilai median yaitu 4,17 lebih kecil daripada nilai mean yaitu 4,58. Hal ini menjelaskan histogram memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan atau data cenderung condong ke kanan (Gambar 5)

Dari 394 jumlah data kadar  $TSiO_2$  diketahui bahwa memiliki nilai minimum dan maksimum yang cukup jauh. Nilai minimum bernilai 12,91 sedangkan nilai maksimum bernilai 82,57 dengan rata-rata 30,63 sehingga hal ini menunjukkan adanya pencilan (Tabel 5).

**Tabel 5.** Analisis Statistik  $TSiO_2$

Parameter	$TSiO_2$
Jumlah data sampel	394
Nilai minimum	12,91
Nilai maksimum	82,57
Mean	30,63
Median	27,30
Variansi	3,57
Standar deviasi	12,74
Skewness	1,26
Kurtosis	4,51
Koefisien variansi	0,41
Range	69,66



**Gambar 6.** Histogram Data  $TSiO_2$

Dapat diketahui bahwa nilai *skewness* sebesar 1,26 yang masih tergolong normal karena berada di antara -2 hingga +2 (George dan Mallery, 2010) dengan nilai kurtosis sebesar 4,51 yang tergolong normal karena berada di antara -7 hingga +7 (Byrne, 2010). Sehingga masih data ini masih dikatakan terdistribusi normal. Data kadar  $TSiO_2$  ini memiliki standar deviasi yaitu 12,74 dan koefisien variansi yaitu 0,41. Hal ini merupakan nilai yang besar sehingga penyebaran data kadar  $TSiO_2$  tidak homogen. Nilai median yaitu 27,20 lebih kecil daripada nilai mean yaitu 30,36. Hal ini menjelaskan histogram memiliki ekor yang lebih memanjang ke kanan atau data cenderung condong ke kanan (Gambar 6).

**Penanganan Pencilan**

Berdasarkan analisis statistik dasar di atas, dapat terlihat bahwa nilai pada data secara signifikan sangat tinggi atau rendah dari data umumnya. Banyaknya akan menyebabkan variansi yang tinggi atau *noise* pada saat analisis variogram. Hal ini haruslah ditangani karena akan mengakibatkan kesalahan pada saat melakukan proses estimasi dan menghindari nilai yang tidak realistis. Penangan dampak adalah dengan menerapkan *topcut* pada data anomali tinggi. Teknik *topcut* yang dilakukan pada penelitian ini ialah dengan *confidence interval* (CI) atau interval kepercayaan. Perhitungan CI dengan batas atas 95% CI ialah sebagai berikut:

$$95\%CI = \text{Mean} + (1.96 \times \text{Standard Deviation})$$

**Tabel 6.** Nilai *Topcut Data Assay*

Parameter	$TSiO_2$	$RSiO_2$	$Al_2O_3$
Mean	30.63093	4.580198	40.96973
Std Dev	12.74504	2.197243	7.626415
Max Grade	55.61	4.58	40.97

Dari nilai maksimum yang didapatkan berdasarkan 95% CI, merupakan landasan untuk mengubah nilai kadar pada data

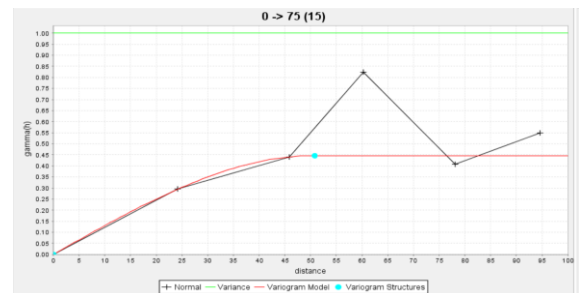
*assay* yang akan dilakukan estimasi. Misalnya pada data kadar  $Al_2O_3$ , apabila nilainya lebih dari 40.97% nilai kadar maka akan diratakan menjadi 40.97%.

**Analisis Geostatistik**

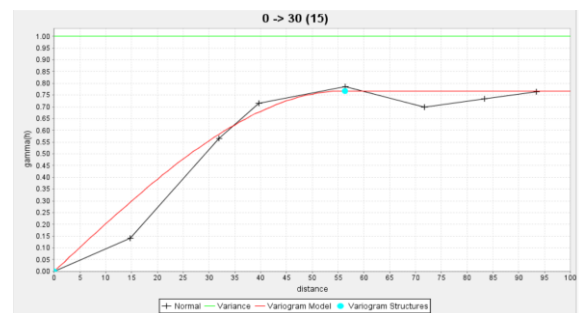
Dalam penelitian ini, maksimum daerah pencarian 100 m karena jarak spasi titik sumur uji paling jauh 100 m. Kemudian jarak *lag* yang digunakan juga 100 m agar mendapatkan grafik perbedaan data dengan jarak yang lebih optimal sehingga diketahui variabilitas suatu data. Dalam komputerisasi, perhitungan variogram dilakukan pada berbagai arah, namun dalam *fitting* variogram dapat memilih hasil variogram yang cocok dengan model yang diinginkan. Adapun hasil parameter-parameter model variogram ditunjukkan pada Tabel 7. Sedangkan model variogram untuk kadar  $Al_2O_3$ ,  $TSiO_2$ , dan  $RSiO_2$  ditunjukkan pada (Gambar 7 s.d 9).

**Tabel 7.** Parameter Model Variogram Kadar  $Al_2O_3$ ,  $RSiO_2$ ,  $TSiO_2$

Variabel	Arah	Nugget	Sill	Range
$Al_2O_3$	75°	0	0.447	50.79
$RSiO_2$	60°	0	0.768	56.32
$TSiO_2$	75°	0	0.686	42.36

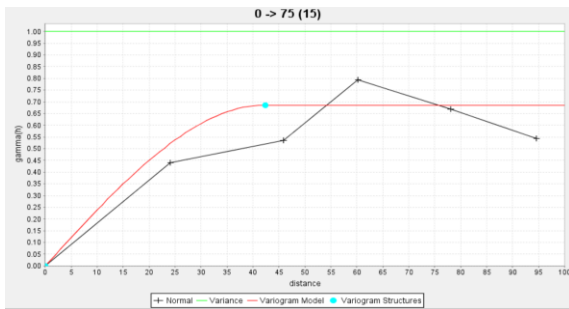


**Gambar 7.** Model Variogram Kadar  $Al_2O_3$



**Gambar 8.** Model Variogram Kadar  $TSiO_2$





Gambar 9. Model Variogram Kadar RSiO<sub>2</sub>

Dalam melakukan *fitting*, ditetapkan nilai *nugget* 0 karena endapan bauksit merupakan komoditas laterit yang nilai karakteristik sampelnya tidak jauh berbeda pada jarak. Berdasarkan hasil analisis statistik univarian, ketiga kadar ini memiliki nilai *coefficient of variation* kurang dari 1 atau dapat dikatakan variabilitas rendah. Nilai *range* ( $\alpha$ ) pada data kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, RSiO<sub>2</sub>, dan TSiO<sub>2</sub> berbeda-beda, hal ini menyatakan seberapa jauh data saling memiliki korelasi. Misalnya pada data kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang memiliki range 50,80 m artinya data memiliki korelasi antar data sejauh 50,80 m. Sehingga dapat dikatakan bahwa kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> memiliki kontinuitas yang tinggi dan variabilitas yang lebih rendah. Sedangkan pada data kadar TSiO<sub>2</sub> memiliki *range* yang lebih rendah artinya variabilitas data lebih tinggi karena jarak korelasi antar data yang lebih rendah.

**Analisis Statistik Data Hasil Estimasi**

Setelah dilakukan estimasi terdapat perubahan pada hasil statistik univarian masing-masing kadar. Perubahan signifikan terjadi pada menurunnya nilai *coefficient of variation* (Tabel 8).

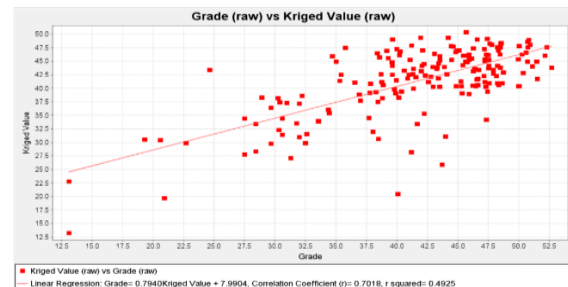
Tabel 8. Analisis Statistik Univarian Data Estimasi Kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, RSiO<sub>2</sub>, TSiO<sub>2</sub>

Parameter	Hasil
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	
Jumlah Blok	6.756
Mean	38
Median	40.97
Coefficient of Variation	0.14
Standar Deviation	5.44
Skewness	0.33
Kurtosis	1.15
<b>RSiO<sub>2</sub></b>	

Jumlah Blok	6.756
Mean	3.78
Median	4.17
Coefficient of Variation	0.28
Standar Deviation	1.93
Skewness	0.42
Kurtosis	1.29
<b>TSiO<sub>2</sub></b>	
Jumlah Blok	6.756
Mean	30.15
Median	27.30
Coefficient of Variation	0.37
Standar Deviation	11.44
Skewness	0.80
Kurtosis	1.60

**Validasi Model**

Validasi hasil estimasi dilakukan dalam berbagai metode yaitu dengan *scatter plot* antara data *assay* dengan hasil interpolasi, dan berdasarkan validasi blok model (Gambar 10).



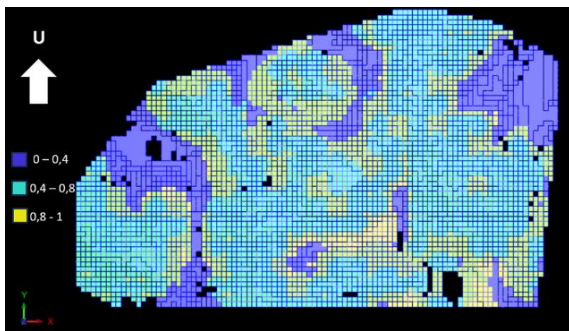
Gambar 10. Scatter Plot Hasil Validasi

Dapat diperoleh bahwa koefisien korelasi ialah 0,70 yang merupakan korelasi positif karena mendekati 1. Hal ini berarti bahwa hasil estimasi memiliki kemiripan dengan hasil titik sumur uji yang ada. Setiap kenaikan variabel kadar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> setiap titik sumur uji akan diikuti dengan kenaikan nilai variabel hasil kriging begitupun sebaliknya. Tampak pada gradien garis yang terbentuk menandakan nilai yang positif. Dalam persamaan grafik yaitu:  $y = 0.7940x + 7.9904$ , nilai *plus* pada variabel *x* memperlihatkan hubungan yang searah. Berdasarkan *scatter plot* di atas, nilai hasil regresi koefisien determinasi  $r^2 = 0,49$  yang menunjukkan korelasi yang sedang.

Dilakukan validasi secara manual yaitu membandingkan antara hasil estimasi

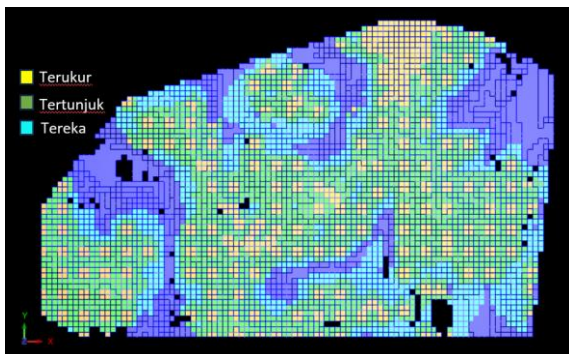
dengan kadar  $Al_2O_3$  di titik sumur uji pada 162 titik yang dilihat dari penampang berarah utara-selatan. Diketahui bahwa rata-rata penyimpangan nilai sebesar 3,21 yang mana tergolong rendah di bawah standar deviasi  $Al_2O_3$  sebelumnya (Tabel 3).

Pada blok model diketahui bahwa nilai *kriging variance* berada pada kisaran 0 - 1. Nilai ini tergolong rendah sehingga dapat dikatakan kualitas estimasinya baik (Gambar 11).



Gambar 11. Hasil *Kriging Variance Block Model*

Pada *kriging efficiency*, nilai yang mendekati 1 maka hasil estimasinya baik. Pada blok model, nilai *kriging efficiency* didominasi oleh nilai 0,80 yang berarti hasil estimasinya baik (Gambar 12).



Gambar 12. *Kriging efficiency pada blok model*

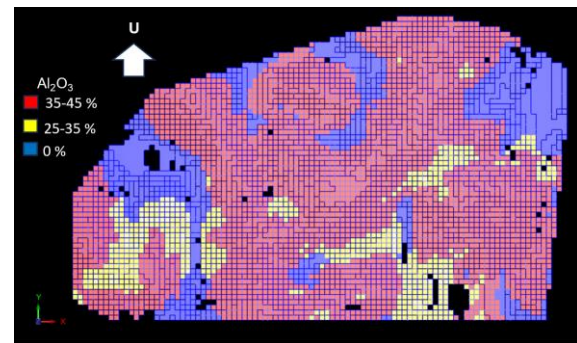
**Estimasi Sumber Daya**

Blok model yang merupakan alat bantu dalam estimasi taksiran kadar dalam penelitian ini berukuran 12,5 x 12,5 x 1 m yang mempertimbangkan 1/2 dari jarak spasi titik sumur uji terkecil. Berikut ialah hasil dari estimasi sumber daya endapan

bauxit yang terklasifikasi *unwashed bauxite* menggunakan metode *ordinary kriging*. Untuk mendapatkan tonnase perhitungannya dikalikan dengan densitas, dalam penelitian ini digunakan asumsi densitas sebesar 1,8 ton/m<sup>3</sup>. Tonnase bauxit berdasarkan Kelas  $Al_2O_3$  dengan interval 10 (Tabel 9). Sedangkan blok model klasifikasi kadar  $Al_2O_3$  ditunjukkan pada Gambar 13.

**Tabel 9.** Sumber Daya Bauxit Berdasarkan Kelas  $Al_2O_3$

Kelas $Al_2O_3$ (%)	Volume (m <sup>3</sup> )	Tonnase (Ton)
15-25	2.671	4.808
25-35	172.190	309.942
35-45	890.188	1.602.338
<b>Total</b>	<b>1.065.049</b>	<b>1.917.088</b>



Gambar 13. Blok model klasifikasi  $Al_2O_3$

Estimasi sumber daya *washed bauxite* dengan rata-rata *concretion factor* 48,44%. Nilai ini didapatkan dari dari hasil perkalian antara tonase *unwashed bauxite* dengan *concretion factor* sehingga menghasilkan nilai tonase *washed bauxite*. Hal ini merupakan representasi apabila sumber daya bauxit di lokasi penelitian tersebut ditambang kemudian dilakukan pencucian maka telah diketahui estimasi tonase bauxit. (Tabel 10)

**Tabel 10.** Sumber Daya *Washed Bauxite*

Kelas $Al_2O_3$ (%)	<i>Unwashed bauxite</i> (Ton)	<i>Washed bauxite</i> (Ton)	<i>Concretion Factor</i>
15-25	4.808	2.328	<b>48,44%</b>
25-35	309.942	150.135	<b>48,44%</b>
35-45	1.602.338	776.172	<b>48,44%</b>
<b>Total</b>	<b>1.917.088</b>	<b>928.635</b>	

Klasifikasi sumber daya berdasarkan hasil *kriging efficiency* digunakan untuk mencari kelas sumber daya berdasarkan data yang ada. Selain itu, dapat digunakan untuk mengetahui seberapa banyak tonase bauksit yang memiliki klasifikasi sumber daya yang dapat dikonversi menjadi cadangan. Apabila menggunakan klasifikasi *kriging efficiency* maka hasil tonase dapat lebih besar atau lebih kecil tergantung banyaknya data titik sumur uji. Semakin banyak data titik sumur uji akan semakin besar nilai tonase berdasarkan *kriging efficiency* (Tabel 11).

**Tabel 11.** Tonnase Bauksit Berdasarkan *Kriging Efficiency*

Klasifikasi	Tonnase unwashed bauxite (Ton)	Tonnase washed bauxite (Ton)
Tereka	303.391	146.962
Tertunjuk	1.136.421	550.482
Terukur	457.563	221.643

Hasil estimasi sumber daya berdasarkan asumsi CoG bahwa  $Al_2O_3 > 35\%$ ,  $RSiO_2 < 8\%$ , dan  $TSiO_2 \leq 30\%$  ditunjukkan pada Tabel 12 dan blok model ditunjukkan pada Gambar 14.



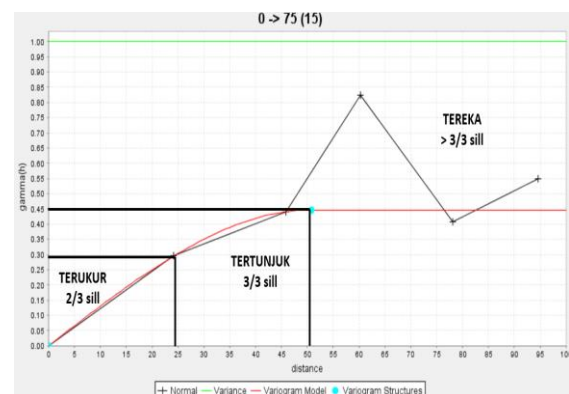
**Gambar 14.** Blok model estimasi sumber daya berdasarkan CoG bauxite  $Al_2O_3 > 35\%$ ,  $RSiO_2 < 8\%$ , dan  $TSiO_2 \leq 30\%$

**Tabel 12.** Sumber Daya Bauksit Berdasarkan CoG

Volume ( $m^3$ )	Tonnase (Ton)	Tonnase washed bauxite (Ton)
828.885	1.491.992	722.720

Dari blok model tersebut dapat diketahui bahwa luas area CoG 498.237  $m^2$  yang merupakan 68% bagian dari total luas daerah penelitian sebesar 723.456  $m^2$ .

Berdasarkan hasil analisis variogram, diperoleh nilai optimal spasi jarak sumur uji dalam eksplorasi komoditas bauksit. Nilai ini didapatkan dengan perhitungan *range* variogram yang ditarik garis berdasarkan *sill*. Pada  $2/3$  *sill*, garis jatuh pada *range* 25 m, artinya pada klasifikasi sumber daya terukur jarak optimum sumur uji 25 meter. Sedangkan untuk klasifikasi tertunjuk 50 m, dan tereka 100 m (Gambar 15).



**Gambar 15.** Klasifikasi sumber daya berdasarkan range variogram

**KESIMPULAN**

Hasil estimasi sumber daya bauksit berdasarkan CoG  $Al_2O_3 > 35\%$ ,  $RSiO_2 < 8\%$ , dan  $TSiO_2 \leq 30\%$ , sebesar 722.720 ton *washed bauxite*, dengan kadar rata-rata 39,78%  $Al_2O_3$ , 3,73%  $RSiO_2$  dan 25,05%  $TSiO_2$ , dan faktor konkresi (*concretion factor*) 48,44%. Sumber daya *washed bauxite* dengan status tereka sebesar 146.962 ton, sumber daya tertunjuk sebesar 550.482 ton, dan sumber daya terukur 221.643 ton.

Berdasarkan perhitungan *range variogram* diperoleh spasi jarak optimum sumur uji untuk eksplorasi bauksit di daerah penelitian dengan klasifikasi sumber daya tereka 100 m, tertunjuk 50 m, dan terukur 25 m.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada tim eksplorasi bauksit Unit Geomin, PT Aneka Tambang yang telah memberikan ilmunya mengenai bauksit dan mengizinkan penulis melakukan penelitian dan menerbitkan dalam jurnal ilmiah. Terima kasih kepada pihak PSDMBP yang membantu proses analisis sampel sayatan tipis sehingga penelitian ini lebih baik lagi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aleva, G. J. (1994). Laterites, Concept, Geology, Morphology, and Chemistry. *ISRIC, Wageningen*.
- Armstrong, M. (1998). *Basic linear geostatistics*. Springer Science & Business Media.
- Balfas, M, D., Anjarwati, R., Sasmito, K., Zaenal, M., Muthadin., Oviandari, Y, G. (2021). Estimasi Sumber Daya Batubara Seam 1 Menggunakan Metode Circular 891 USGS Daerah Tanah Merah, Kota Samarinda Provinsi Kalimantan Timur. *Jurnal Geocelebes Vol. 5 No. 1, April 2021, 63-71*.
- Byrne, B. M. (2010). Structural equation modeling with AMOS: Basic concepts, applications, and programming. *New York: Routledge*.
- Coombes, J. (2008). *The art and science of resource estimation: a practical guide for geologists and engineers*. Coombes Capability.
- George, D. & Mallery, M. (2010). *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference, 17.0 update (10a ed.)*. Boston: Pearson.
- Hall, Robert & Morley, Christopher. (2004). Sundaland Basins. *AGU Geophysical Monograph*. 149. 55-85. 10.1029/149GM04.
- Hennig, J., dkk. (2017). The Mesozoic tectonic-magmatic evolution at the Paleo-Pacific subduction zone in West Borneo. *Gondwana Research, 292-310*.
- Journel, A.G. and Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press, London.
- Krige, D.G. (1997). A Practical Analysis of the Effects of Spatial Structure and of Data Available and Accessed, on Conditional Biases in Ordinary Kriging.
- Matheron, G. (1963). Principle of Geostatistics. *Economic Geology, 58 (8): 1246-1266*.
- Sanyoto, dkk. (1993). Geology of the Pontianak/Nangataman Sheet Area, Kalimantan. Map at 1:250,000 scale. *Bandung, Indonesia: Geological Research and Development Centre*.
- Sinclair, A. J., & Blackwell, G. H. (2006). *Applied mineral inventory estimation*. Cambridge University Press.
- Schellmann, W. (1986). A new definition of laterite; In: Lateritization Processes. (ed.) *Banerjee P K, Geol. Surv. India Memoir 120 1-7*.
- Sunjaya, D. (2022). Studi Petrogenesis Bauksit Dan Mineralisasi Skandium Daerah Tayan, Kalimantan Barat. *Tesis Magister, Institut Teknologi Bandung*.
- SNI 4726-2019. (2019). Pedoman Pelaporan, Sumber daya, dan Cadangan Mineral. *Jakarta: Badan Standarisasi Nasional*.
- Snowden, D.V. (1996). *Practical Interpretation of Resource Classification Guidelines*. Perth: AusIMM
- Valeton, I. (1972). *Bauxite*. London: Elsevier Publishing Company.

Diterima : 6 Mei 2024  
Direvisi : 5 Juni 2024  
Disetujui : 22 Agustus 2024