

ANALISIS KORELASI GEOSPASIAL DATA TITIK BOR BERDASARKAN METODE GEOSTATISTIK VARIOGRAM

GEOSPATIAL CORRELATION ANALYSIS OF DRILL HOLES DATA BASED ON VARIOGRAM GEOSTATISTICAL METHOD

Y. A. Yulanda^{*1}, R. Arafat², H. Rahmi³

^{1,3}Teknik Pertambangan, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi

²Teknik Geologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi

¹⁻³Jalan Raya Jambi- Ma. Bulian KM 15 Mendalo Indah, Kode Pos 36361

e-mail: ^{*1}yudiarista@unja.ac.id, ²rahmatul.arafat@unja.ac.id, ³hisnirahmi@unja.ac.id

ABSTRAK

Ketidakpastian kondisi bawah permukaan merupakan tantangan dalam bidang pertambangan. Ketidakpastian ini muncul karena kompleksitas tatanan geologi, yang membuat lapisan bawah permukaan bervariasi antara lokasi. Dengan demikian, pemodelan geologi yang akurat sangat diperlukan untuk estimasi sumber daya yang efisien. Namun, jarak antar lubang bor yang tidak tepat dapat meningkatkan biaya eksplorasi dan risiko kesalahan estimasi. Estimasi sumberdaya dengan menggunakan metode geostatistik mempunyai keunggulan dibanding metode lain karena mampu memperhitungkan variabilitas spasial data secara kuantitatif, sehingga menghasilkan estimasi yang lebih akurat. Parameter yang mempengaruhi adalah nilai variogramnya, dimana analisis variogram yang baik akan mempengaruhi model endapan yang terbentuk. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis korelasi geospasial data titik bor berdasarkan metode geostatistik variogram. Metode yang digunakan merupakan metode kuantitatif dengan pendekatan geostatistik meliputi pemahaman anisotropi, penentuan arah utama, perhitungan variogram eksperimental, dan pemodelan variogram. Studi ini dilakukan pada data titik bor dengan parameter kualitas kalori, kandungan ash, dan sulfur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variogram *omnidirectional* memberikan gambaran umum distribusi spasial, sementara variogram *directional* mengungkap adanya anisotropi, terutama pada arah *strike* endapan dengan *range* terjauh 230 meter dan 150 meter pada arah *dip*. Jarak pengeboran optimal berdasarkan variogram ini meningkatkan akurasi estimasi sumber daya. Korelasi spasial yang lebih kuat ditemukan pada jarak pengeboran yang lebih pendek, yang penting untuk mengurangi kesalahan estimasi. Studi ini memberikan panduan penting untuk menentukan jarak pengeboran optimal dalam eksplorasi, meningkatkan efisiensi biaya sambil mempertahankan kepercayaan tinggi dalam estimasi geologi.

Kata kunci: korelasi, geospasial, titik bor, geostatistik, variogram

ABSTRACT

Subsurface uncertainty presents a significant challenge in the mining industry. This uncertainty arises due to the complexity of geological formations, resulting in variations in subsurface layers across different locations. Consequently, accurate geological modeling is essential for efficient resource estimation. However, improper spacing between drill holes can increase exploration costs and the risk of estimation errors. Resource estimation using geostatistical methods offers advantages over other approaches as it quantitatively accounts for spatial variability in data, leading to more accurate estimations. A key influencing parameter is the variogram value, where a well-conducted variogram analysis significantly impacts the resulting deposit model. This study aims to analyze the geospatial correlation of borehole data using the geostatistical variogram method. A quantitative approach is employed, incorporating geostatistical techniques such as anisotropy analysis, determination of principal directions, computation of experimental variograms, and variogram modeling. The study utilizes borehole data with parameters including calorific value, ash content, and sulfur content. The results indicate that the omnidirectional variogram provides a general representation of spatial distribution, whereas the directional variogram reveals anisotropy, particularly along the deposit strike direction, with the longest range recorded at 230 meters and 150 meters along the dip direction. The optimal drilling spacing, determined based on the variogram, enhances the accuracy of resource estimation. A stronger spatial correlation is observed at shorter drilling distances, which is crucial in minimizing estimation errors. This study provides valuable guidance for optimizing drilling spacing in exploration, improving cost efficiency while maintaining high confidence in geological estimations.

Keywords: correlation, geospatial, borehole, geostatistics, variogram

PENDAHULUAN

Industri pertambangan mempunyai karakter yang khas yaitu berhubungan dengan ketidakpastian yang tinggi. Salah satu bentuk ketidakpastian adalah ketidakpastian geologi yang disebabkan oleh keberagaman tatanan geologi sehingga lapisan batuan di bawah permukaan dapat berbeda antara suatu lokasi dengan lokasi lainnya. Batuan dapat mengalami penipisan, terpotong atau tidak menerus. Aspek-aspek seperti tatanan tektonik dan proses selama pengendapan batuan mempengaruhi kompleksitas geologi bawah permukaan. Kondisi ini dapat dikelompokkan menjadi tingkat kompleksitas geologi sederhana, moderat, dan kompleks [1]. Tingkat kompleksitas geologi akan sangat berpengaruh dalam mengestimasi sumber daya batubara [2]. Ketidakpastian geologi dipengaruhi pula oleh banyak atau sedikitnya data dan informasi bawah permukaan yang tersedia. Semakin kompleks kondisi geologi maka semakin banyak data bawah permukaan yang diperlukan untuk mendapatkan informasi yang lebih terperinci.

Kegiatan eksplorasi bertujuan untuk mendapatkan data geologi yang akan digunakan dalam klasifikasi sumber daya dan cadangan. Informasi bawah permukaan didapatkan melalui metode pengeboran. Pengeboran adalah tahap eksplorasi yang paling mahal, sehingga diperlukan metode untuk mengoptimalkan jumlah dan jarak lubang bor guna meningkatkan efisiensi biaya sambil mempertahankan tingkat kepercayaan yang tinggi dalam estimasi sumber daya. Semakin rapat titik bor maka akan semakin bagus dalam melakukan pemodelan geologi, namun tentunya memerlukan biaya yang banyak. Sebaliknya semakin jarang titik bor maka informasi bawah permukaan yang didapatkan akan semakin minimal sehingga pemodelan geologi mempunyai potensi kesalahan yang besar.

Informasi bawah permukaan dari daerah-daerah yang belum dilakukan pengeboran dapat dilakukan dengan pendekatan metode geostatistik variogram. Metode ini merupakan fungsi vektor yang dapat digunakan untuk mengkuantifikasikan tingkat kemiripan atau variabilitas antara dua contoh yang terpisah oleh jarak tertentu dengan grafik $x - y$ yang dihasilkan dari plot jarak dan varians dari data yang berpasangan [2]. Dengan demikian distribusi spasial data dapat dipetakan dengan lebih akurat sehingga mengurangi ketidakpastian geologi yang muncul dari ketidakteraturan atau keterbatasan data.

Pemodelan geologi dengan menggunakan data titik bor dan dibantu dengan pendekatan metode geostatistik telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Yulanda, et al. (2022) melakukan penaksiran sumberdaya batubara dengan data titik bor sebanyak 60 titik dengan membandingkan metode *inverse distance weight* dan *ordinary kriging* dimana memperoleh volume hasil perhitungan yang tidak jauh berbeda untuk kedua metode tersebut [3]. Selain itu, Wulandari, et al. (2020) juga

melakukan estimasi endapan batubara dengan analisis *variography ordinary kriging* dengan 15 titik bor [4]. Anggara, et al. (2021) juga melakukan estimasi sumberdaya nikel laterit dengan menentukan model variogram berdasarkan *cross validation* dan *root mean square error* (RMSE) menggunakan metode *ordinary kriging* [5]. Ramadhan, et al. (2021) menganalisis jarak lubang bor untuk estimasi dan klasifikasi sumber daya batubara di Bengkulu berdasarkan variogram dan kriging dengan jumlah lubang bor sebanyak 57 lubang dan spasi antar lubang ± 100 meter [6]. Penelitian-penelitian tersebut menggunakan variogram sebagai dasar analisis namun umumnya tidak spesifik pada jarak titik bor pada arah *strike* dan *dip* sementara *strike* dan *dip* mempunyai korelasi spasial yang berbeda. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis korelasi geospasial data titik bor berdasarkan metode geostatistik variogram pada arah korelasi *strike* dan *dip*.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan geostatistik. Tahapan penelitian dimulai dengan studi pustaka dan pengumpulan data. Data pada penelitian ini menggunakan data bor dari lokasi tertentu. Data tersebut merupakan data spasial yang bersifat sekunder. Tahapan selanjutnya untuk mengidentifikasi dan memodelkan sifat anisotropi dalam data spasial tersebut, yang melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Memahami Anisotropi: Anisotropi terjadi ketika kontinuitas spasial dari variabel yang ter regionalisasi bervariasi tergantung pada arah [7]. Arah utama kontinuitas (mayor, minor, dan tersier) harus diidentifikasi karena ini berperan penting dalam pemodelan variogram.
2. Penentuan Arah Utama: Berbagai metode seperti inspeksi visual data geologi, bola variogram dan variogram *map* digunakan untuk menentukan arah utama anisotropi. Setiap metode ini membantu dalam memvisualisasikan dan menghitung variogram arah dengan lebih akurat.
3. Perhitungan Variogram Eksperimental: Setelah arah utama ditentukan, variogram eksperimental dihitung di setiap arah. Faktor-faktor seperti kualitas data, konteks geologi, dan parameter toleransi (misalnya, jarak lag dan toleransi sudut) mempengaruhi akurasi variogram ini.
4. Pemodelan Variogram: Model linier regionalisasi digunakan untuk membuat model variogram anisotropi. Anisotropi diperkenalkan melalui penskalaan jarak spesifik arah dalam arah utama, berdasarkan interpretasi geologi. Model ini memungkinkan estimasi hubungan spasial yang akurat di berbagai arah.

Berdasarkan model variogram tersebut, selanjutnya ditentukan *range* maksimum yang mewakili korelasi geospasial antar titik bor. Korelasi dianalisis secara *strike* dan *dip* untuk menentukan jarak titik bor maksimum.

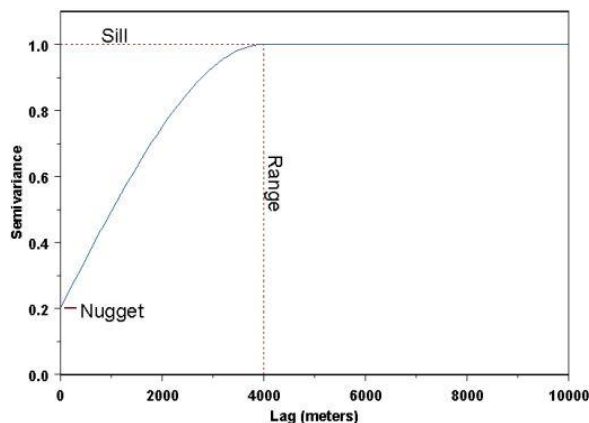
Dalam pembuatan variogram eksperimental menggunakan persamaan (1):

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

Dimana:

- $\gamma(h)$: fungsi variogram
- $n(h)$: jumlah pasangan data
- $Z(x_i)$: nilai kadar pada lokasi (x_i)
- $Z(x_{i+h})$: nilai kadar pada lokasi (x_{i+h})
- h : jarak antar dua titik

Nilai variogram dihitung pada interval jarak tertentu yang disebut sebagai *lag*. Hasil *plotting* nilai tersebut membentuk eksperimental variogram yang kemudian di *fitting* sesuai dengan model variogram teoritis untuk menentukan nilai *range*, *sill* dan *nugget* (Gambar 1).



Gambar 1. Model variogram

Model variogram yang digunakan merupakan model spherical. Model ini dimodelkan berdasarkan persamaan (2).

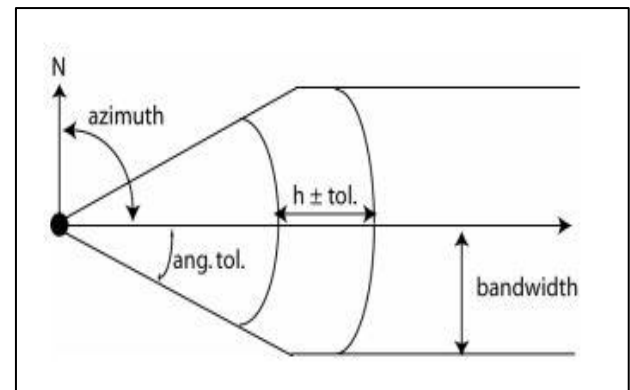
$$\gamma(h) = \begin{cases} C \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] + C_0, & \text{untuk } h < a \\ C + C_0 & \text{untuk } h \geq a \end{cases} \dots\dots(2)$$

Dimana:

- C : *Sill*
- C_0 : *Nugget*
- a : *Range*
- h : *Lagging*

Pertama, model variogram dibuat secara *omnidirectional* atau menyebar mewakili segala arah. Variogram ini penting untuk mengetahui gambaran umum penyebaran data secara global. Sementara untuk melihat pengaruh anisotropis variogram dimodelkan secara *directional* ke beberapa arah. Pada penelitian ini variogram dimodelkan

seperti Gambar 2 dengan 72 arah azimuth dan interval sudut 5 derajat, *angular tolerance* 20 derajat dan *bandwidth* 50 meter.



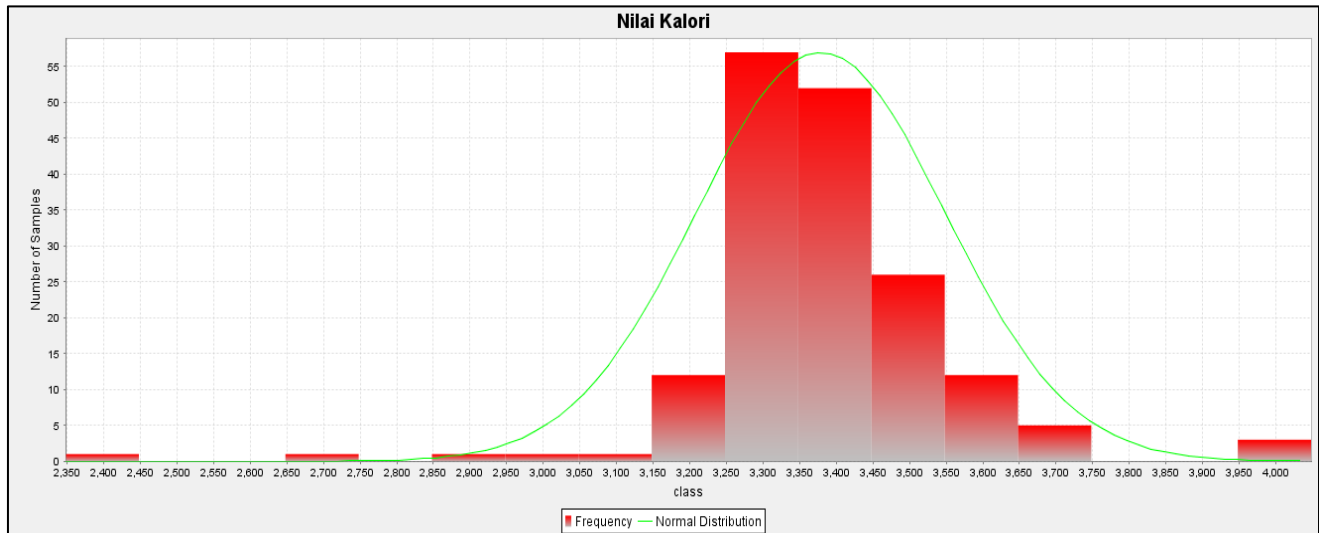
Gambar 2. Visualisasi parameter *directional* variogram

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kompleksitas geologi merupakan suatu hal yang tidak konstan, artinya suatu lokasi dengan lokasi yang lain akan mempunyai kompleksitas geologi yang berbeda walaupun memiliki komoditas yang sama. Meskipun sudah ada panduan dari standar nasional Indonesia (SNI) dan komite cadangan mineral Indonesia (KCM) tentang spasi lubang bor yang optimal namun pendekatan geostatistik masih diperlukan untuk menentukan jarak titik bor yang sesuai dengan kompleksitas geologi.

Variogram adalah alat geostatistik yang digunakan untuk menganalisis distribusi spasial dan korelasi antara sampel geologi dalam suatu area. Dalam konteks menentukan jarak pengeboran, variogram membantu mengukur seberapa jauh hubungan atau korelasi antara nilai sampel geologi (seperti kandungan mineral) pada titik-titik pengeboran yang berbeda mulai berkurang atau hilang.

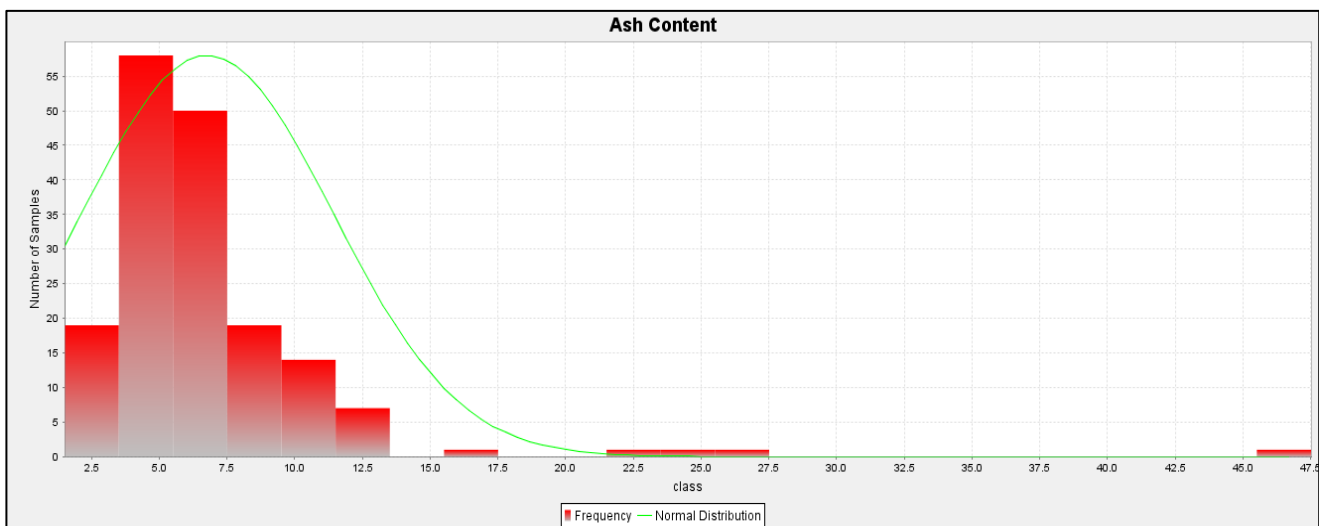
Korelasi spasial merupakan konsep dalam geostatistik yang menggambarkan hubungan atau keterkaitan antara nilai-nilai geologi di lokasi-lokasi berbeda dalam ruang. Dengan kata lain, ini mengukur sejauh mana data di satu titik dipengaruhi oleh data di titik lain yang berdekatan secara geografis. Korelasi geospasial menggunakan prinsip umum dimana area titik yang berdekatan akan mempunyai informasi yang relatif sama dibandingkan dengan titik yang berlokasi lebih jauh. Data pengeboran yang akan dianalisis mempunyai spasi pengeboran yang bervariasi dari jarak kurang dari 100 meter sampai jarak yang lebih dari 200 meter. Analisis dilakukan pada *seam* batubara BL6 dengan parameter kualitas kalori, *ash* dan total sulfur. Analisis geospasial dilakukan pada parameter kualitas kalori, *ash content* dan sulfur untuk mengetahui distribusi data secara statistik.



Gambar 3. Histogram nilai kalori batubara

Distribusi nilai kalori (Gambar 3) terlihat mengikuti pola distribusi normal dengan puncak di sekitar 3.300–3.400 kalori (GAR). Sebagian besar data terkonsentrasi di tengah rentang ini, dan hanya ada sedikit nilai yang menyimpang dari pola tersebut. Nilai kalori di bawah

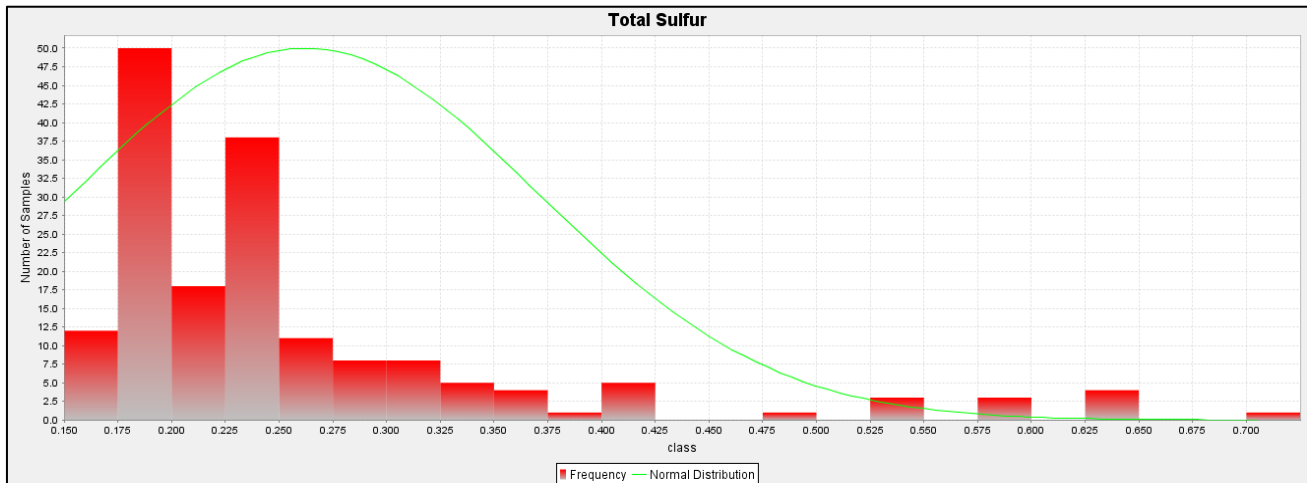
2.500 dan di atas 4.000 bisa saja menjadi *outlier* yang berarti merupakan hasil pengukuran yang tidak akurat atau memang mencerminkan kondisi geologi yang berbeda.



Gambar 4. Histogram *ash content* batubara

Data kadar abu (*ash content*) tidak terdistribusi secara simetris (Gambar 4). Sebagian besar data terkonsentrasi di sekitar nilai yang lebih rendah, dengan sedikit sekali data pada nilai yang lebih tinggi. Ini menunjukkan adanya ketidaksamaan dalam distribusi kadar abu. Bentuk kurva menunjukkan bahwa distribusi ini memiliki "positif skew" atau "*right skew*". Artinya, ekor distribusi lebih panjang ke arah kanan (nilai yang lebih tinggi). Ini

mengindikasikan adanya beberapa sampel dengan kadar abu yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan mayoritas sampel lainnya. Histogram data nyata secara signifikan berbeda dari kurva distribusi normal. Ini menunjukkan bahwa data kadar abu tidak mengikuti pola distribusi normal.

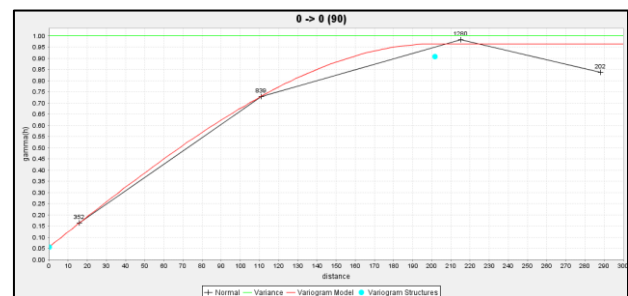


Gambar 5. Histogram total sulfur batubara

Histogram total sulfur secara data juga secara signifikan berbeda dari kurva distribusi normal (Gambar 5). Ini menunjukkan bahwa data kandungan sulfur tidak mengikuti pola distribusi normal. Bentuk kurva juga menunjukkan bahwa distribusi ini memiliki positif *skew*.

Data statistik menunjukkan bahwa parameter *ash content* dan *total sulfur* memiliki positif *skewness* yang berarti data tidak terdistribusi secara normal. Pada dua data tersebut nilai rata-rata sampel dan distribusi data cenderung condong ke arah kiri. Sementara untuk nilai kalori cenderung terdistribusi normal dengan nilai rata-rata dan distribusi data cenderung berada di tengah. Selain itu, kalori juga merupakan parameter yang paling menentukan keekonomisan harga dari batubara. Oleh karena itu analisis korelasi geospasial menitikberatkan hanya pada parameter kalori.

Semua data parameter kualitas kalori kemudian dilakukan analisis *variography*. Variogram dibangun dengan menghitung *semivariance* antara pasangan titik sampel pada jarak tertentu. *Semivariance* sendiri merupakan perbedaan rata-rata kuadrat antara nilai-nilai sampel yang dipisahkan oleh jarak tertentu (*lag*). *Semivariance* ini dihitung untuk berbagai jarak, dari jarak nol (sampel yang sama) hingga jarak maksimal di mana sampel-sampel tidak lagi berkorelasi. *Sill* adalah titik dimana *semivariance* mencapai nilai maksimum dan stabil. Pada titik ini, sampel-sampel tidak lagi saling berkorelasi. *Range* adalah jarak di mana *semivariance* mencapai *sill*, artinya jarak maksimum di mana sampel-sampel masih memiliki korelasi yang berarti. Setelah *range*, sampel dianggap tidak memiliki hubungan spasial. Untuk mendapatkan gambaran umum distribusi dan korelasi geospasial maka dibuatkan variogram *omni directional* terlebih dahulu.



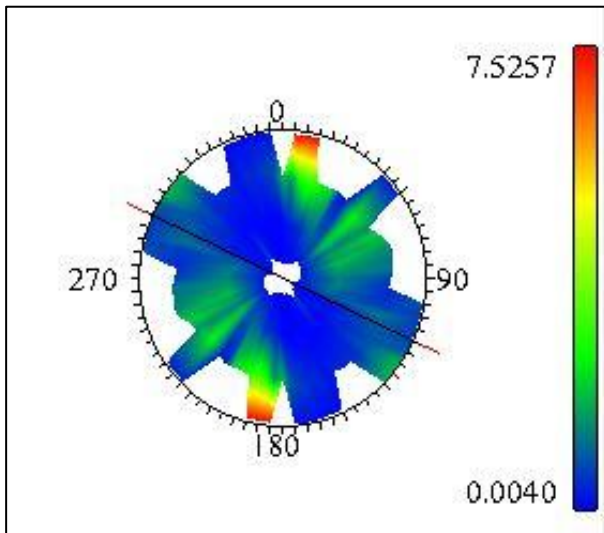
Gambar 6. Variogram *omnidirection* nilai kalori

Tabel 1. Nilai model variogram *omnidirectional*

<i>Nugget</i>	<i>Structure</i>	<i>Sill</i>	<i>Range</i>
0,056848	1	0,907551	201,749

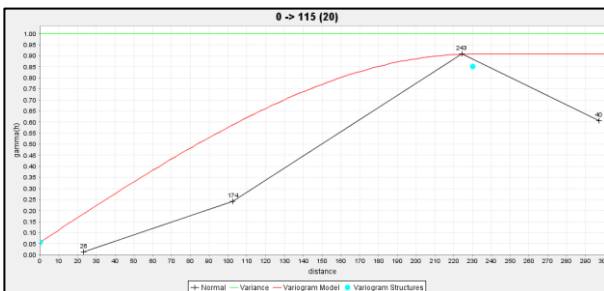
Variogram *omnidirectional* dibuat dengan *direction* ke semua arah untuk mendapatkan gambaran umum model data terutama ada atau tidaknya *nugget effect* [4]. Dari hasil variogram pada Gambar 6 terlihat adanya *nugget* dengan nilai 0,056 seperti pada Tabel 1. Data *nugget* ini akan digunakan pada *directional variogram* secara seragam.

Selanjutnya variogram *directional* dibangun dengan arah yang spesifik untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan korelasi pada berbagai arah (*anisotropis*). Analisis dilakukan dengan gradasi 5 derajat sehingga terdapat 72 arah variogram yang tergambar dalam variogram map (Gambar 7).



Gambar 7. Variogram *map* multi direction

Berdasarkan variogram *map* terlihat bahwa arah kemenerusan pada N 115° E. Arah kemenerusan dilihat berdasarkan variogram directional dengan *range* terjauh dan varians terkecil. Arah ini menjadi sumbu major dalam pembuatan *ellipsoid* yang dimana arah ini searah dengan kemenerusan *strike* endapan. Hasil dari variogram arah major terlihat sebagai berikut (Gambar 8).

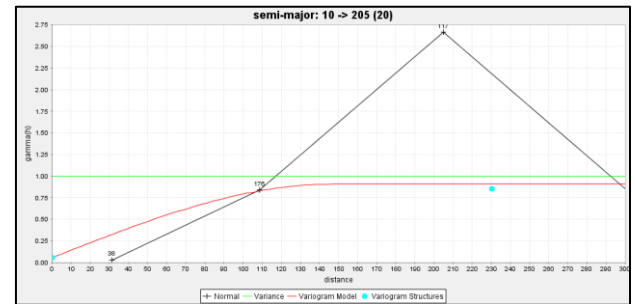


Gambar 8. Variogram arah major

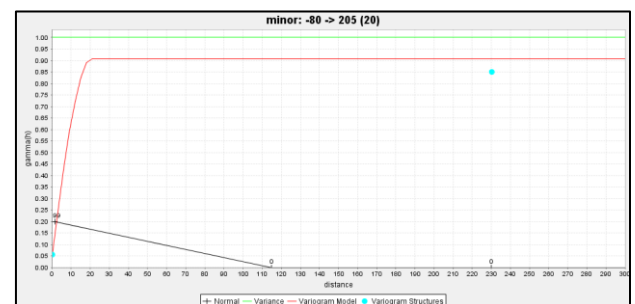
Tabel 2. Nilai model variogram major

Model Type	Nugget	Structure	Sill	Range
Spherical	0,056848	1	0,850765	230,114

Hasil dari variogram major menunjukkan *range* 230 m (Tabel 2). Jarak ini merupakan jarak terjauh dimana data masih berkorelasi secara spasial. Kemudian untuk pembuatan *elipsoid* masih dibutuhkan arah semimajor (Gambar 9) dan arah minor (Gambar 10).

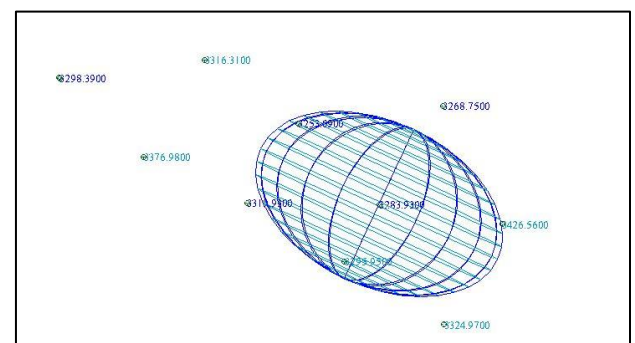


Gambar 9. Variogram arah semi major



Gambar 10. Variogram arah minor

Berdasarkan tiga (3) arah utama variogram terlihat bahwa pada ketiga sumbu tersebut mempunyai bentuk yang berbeda yang berarti kemenerusannya tidak sama ke segala arah (anisotropis) dengan ratio anisotropis pada tabel 4 Visualiasi dari anisotropis tersebut di-generate dalam bentuk *ellipsoid* sebagai berikut (Gambar 11).



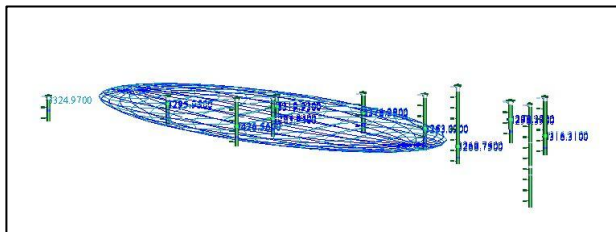
Gambar 11. Visualisasi 3D variogram anisotropis

Tabel 3. Arah elipsoid anisotropis

Parameter	Value
Bearing	115°
Plunge	0°
Dip	10°

Tabel 4. Ratio anisotropis

Parameter	Value
major / semi-major	1,567
major / minor	11,305


Gambar 12. Area influence dari data bor

Hasil dari ellipsoid tersebut menunjukkan korelasi geospasial berdasarkan *range* sebagai berikut:

Arah Strike Maximum Search Radius = 230 m
Arah Down Dip Maximum Radius = 150 m

Hasil analisis *elipsoid* menunjukkan bahwa terdapat perbedaan kemenerusan pada arah *strike* dan *dip*. Kemenerusan arah *strike* terlihat lebih jauh jika dibandingkan dengan kemenerusan ke arah *dip* seperti pada Tabel 3. Visualisasi area pengaruh dari data bor sesuai data elipsoid seperti pada Gambar 12.

Range dari variogram digunakan sebagai panduan dalam menentukan jarak antar lubang bor. Jarak pengeboran yang lebih pendek dari *range* akan menghasilkan sampel yang berkorelasi kuat, sedangkan jarak yang lebih panjang akan menghasilkan data yang kurang berkorelasi atau tidak berkorelasi sama sekali. Dengan kata lain, jarak antar lubang bor sebaiknya diatur berdasarkan *range* dari variogram agar setiap sampel dapat merepresentasikan variasi geologi yang ada dengan lebih baik dan memberikan estimasi yang lebih akurat. Jika jarak pengeboran lebih besar dari *range*, maka data bor kemungkinan tidak dapat menangkap variasi geologi

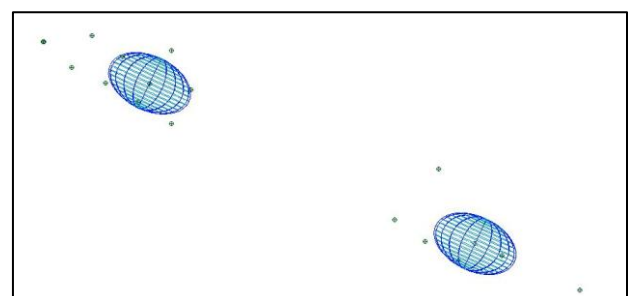
yang ada, sehingga menyebabkan estimasi yang kurang akurat dan peningkatan ketidakpastian sesuai dengan hasil penelitian [8] yang telah dilakukan.

Jarak antar lubang bor yang lebih pendek (1/3 hingga 2/3 dari *range*) umumnya memberikan estimasi yang lebih akurat dan sesuai dengan standar untuk sumber daya terukur. Hal ini sejalan dengan asumsi yang digunakan bahwa nilai hasil interpolasi akan lebih mendekati nilai sebenarnya jika data yang digunakan jaraknya lebih dekat dibandingkan jaraknya lebih jauh [9]. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa data bor memiliki korelasi spasial yang kuat, dan ketidakpastian estimasi dapat dikurangi.

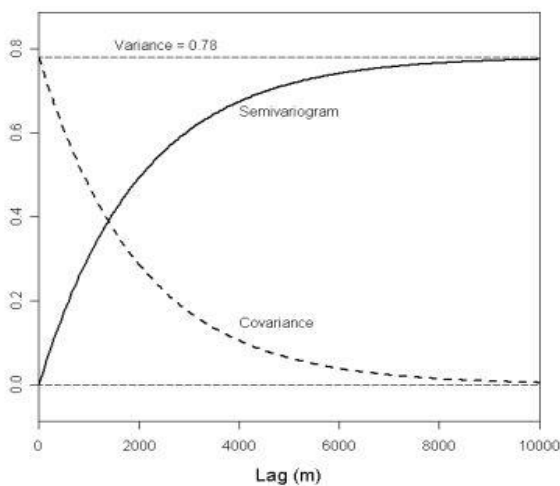
Pengendalian yang lebih ketat diperlukan terhadap kesalahan estimasi, yang dicapai dengan memperpendek jarak pengeboran pada sumber daya terukur yang artinya lubang bor diperbanyak dengan jarak yang dekat [10]. Jarak pengeboran yang lebih dekat dengan sekitar 1/3 hingga 2/3 dari *range* variogram disarankan untuk memastikan hubungan spasial yang cukup kuat antara sampel.

Range variogram sebesar 230 meter menunjukkan bahwa sampel-sampel geologi yang diambil pada jarak lebih dari 230 meter tidak lagi memiliki korelasi spasial yang kuat. Jika jarak pengeboran adalah 500 meter (dua kali dari *range* variogram), maka korelasi antara sampel yang diambil di setiap lubang bor akan sangat kecil atau bahkan tidak ada. Ketika korelasi spasial rendah, ketidakpastian dalam estimasi sumber daya meningkat, sehingga sulit untuk mengklasifikasikan data pengeboran tersebut sebagai sumber daya terukur, yang memerlukan tingkat kepercayaan yang sangat tinggi.

Berdasarkan distribusi data bor (Gambar 13) terlihat ada lokasi yang mempunyai jarak titik bor hingga 1000 m. Kondisi ini mengakibatkan pada lokasi tersebut kemenerusan bawah permukaan tidak dapat dipastikan secara geologi. Terlihat bahwa data bor dengan jarak 1000m di tercover oleh ellipsoid.

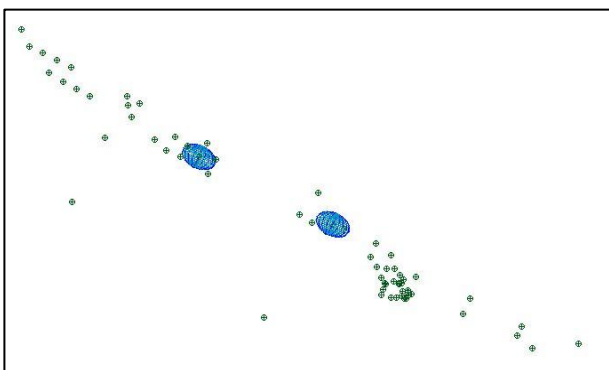

Gambar 13. Distribusi data bor terhadap elipsoid

Korelasi spasial diukur menggunakan variogram, yang menggambarkan bagaimana perbedaan antara nilai geologi (seperti kandungan mineral) meningkat seiring bertambahnya jarak antara dua titik sampel. Ketika jarak antara sampel meningkat hingga mencapai jarak tertentu (disebut *range*), korelasi spasial menurun hingga nol, artinya setelah jarak tersebut, tidak ada lagi hubungan antara nilai-nilai di kedua titik yang tergambar dalam model covariogram (Gambar 14).



Gambar 14. Covariogram

Data variogram digunakan sebagai dasar dalam melakukan estimasi terutama jika menggunakan metode *kriging*. Dalam metode ini pembobotan dilakukan mengkonversi variogram model menjadi covariogram. Covariogram ini merupakan model terbalik dari variogram. Pada saat nilai variogram melebihi nilai *range* maka nilai *sill* menjadi maksimum ketika dikonversi menjadi covariogram maka nilainya menjadi nol. Nilai ini yang menjadi pembobotan dalam melakukan estimasi *kriging* sehingga pada lokasi bor yang jauh nilai pembobotan menjadi nol atau tidak berkorelasi sama sekali.



Gambar 15. Distribusi data bor

Pada jarak pengeboran 1000 meter yang lebih besar dari *range* variogram, kesalahan estimasi (*estimation error*) akan lebih besar karena informasi dari lubang bor tidak dapat sepenuhnya menggambarkan variasi geologi di antara titik pengeboran. Ini menyebabkan model geologi menjadi kurang akurat dan tidak dapat digunakan untuk klasifikasi yang membutuhkan keyakinan tinggi. Sumber daya terukur memerlukan estimasi yang presisi dengan korelasi yang kuat antar data pengeboran. Jika jarak pengeboran terlalu besar seperti pada lokasi Gambar 15, kesalahan estimasi meningkat, dan data tidak bisa dianggap cukup kuat untuk klasifikasi sumber daya terukur sehingga untuk lokasi tersebut perlu dilakukan penambahan titik bor.

KESIMPULAN

Analisis variogram *omnidirectional* memberikan gambaran umum penyebaran data, sementara variogram *directional* menunjukkan adanya anisotropi dengan *range* terbesar pada arah *strike* sebesar 230 meter dan 150 meter pada arah *dip*. *Range* ini digunakan sebagai panduan dalam menentukan jarak optimal antar lubang bor. Data menunjukkan bahwa jarak pengeboran yang lebih pendek dari *range* variogram menghasilkan korelasi spasial yang kuat, sehingga meningkatkan akurasi estimasi sumber daya. Sebaliknya, jarak pengeboran yang lebih panjang dari *range* menyebabkan berkurangnya korelasi, meningkatkan kesalahan estimasi, dan menambah ketidakpastian dalam pemodelan geologi. Hasil penelitian ini juga menegaskan pentingnya pemilihan jarak pengeboran yang sesuai dengan kondisi geologi setempat untuk meminimalkan biaya eksplorasi dan memaksimalkan akurasi estimasi sumber daya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Standarisasi Nasional, (2019). *SNI 5015:2019 tentang Pedoman pelaporan hasil eksplorasi, sumber daya, dan cadangan batubara*, Badan Standarisasi Nasional.
- [2] Marwanza, I., (2023). *Pendekatan Geologi dan Geostatistik dalam Klasifikasi dan Estimasi Endapan Batubara*, Diva Pustaka.
- [3] Yulanda, Y. A., Hakim, M. E., Arafat, R & Ericson., (2022). Analisis Variasi Penaksiran Sumberdaya Batubara Menggunakan Metode Inverse Distance Weight Dan Ordinary Kriging, *Jurnal Pertambangan*, 6(2), 71-76.
- [4] Wulandari, V., Hakim, N. R., & Fikri, H. N., (2020). Analisis Variography pada Estimasi Ordinary Kriging Endapan Batubara Di Kecamatan Murung Pudak Kabupaten Tabalong Provinsi Kalimantan Selatan, *Jurnal Geomine*, 8(2), 104-113.
- [5] Anggara, B., Marwanza, I., & Azizi, M. A., (2021). Penentuan Model Variogram Berdasarkan Root Mean Square Error di PT X, Sulawesi



Utara, *Indonesian Mining and Energy Journal*, 4(1), 11-21.

- [6] Ramadhan, M. D., Marwanza, I., Nas, C., Azizi, M. A., Dahani, W., & Kurniawati, R., (2021). Drill holes spacing analysis for estimation and classification of coal resources based on variogram and kriging, *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 819, 1, 012026). IOP Publishing.
- [7] Fikri, H., Heriawan, M. N., Muchtadi-Alamsyah, I., & Rachmaputri, G., (2016). *Analisis Daerah Pengaruh Berpola Anisotropi Ellipsoid terhadap Hasil Estimasi Sumberdaya Batubara dengan Pendekatan Geostatistik*, Bandung: ITB.
- [8] Martínez-Vargas, A., (2017). Optimizing grade-control drillhole spacing with conditional simulation, *Minería y Geología*, 33(1), 1-12.
- [9] Syahrul, S., & Kumalasari, R., (2024). Estimasi Cadangan Nikel Laterit Menggunakan Metode Inverse Distance Weight dan Kriging di Blok X pada PT. Tambang Bumi Sulawesi, Kabaena Selatan Kabupaten Bombana, Sulawesi Tenggara, *Mining Science and Technology Journal*, 3(1), 39-50.
- [10] Anggraini, O. P., Heriawan, M. N., & Hede, A. N. H., (2018). Perbandingan Antara Model Blok 3d Dengan Ordinary Kriging Dan Model 2d Dengan Polygonal Untuk Estimasi Sumberdaya Timah Aluvial Di Pulau Bangka. *Prosiding Temu Profesi Tahunan PERHAPI*, 1(1), 325-336.