

GEOLOGI DAN ESTIMASI SUMBERDAYA NIKEL LATERIT MENGGUNAKAN METODE ORDINARY KRIGING DI PT. ANEKA TAMBANG, Tbk

Muhammad Amril Asy'ari⁽¹⁾, Rachmat Hidayatullah⁽¹⁾ dan Aflan Zulfadli⁽²⁾

⁽¹⁾ Program Studi Teknik Pertambangan Politeknik Negeri Banjarmasin

⁽²⁾ Magister Geologi Pertambangan Universitas Gajah Mada

Ringkasan

Endapan nikel laterit merupakan hasil pelapukan dari batuan ultramafik berupa peridotit atau dunit sebagai pembawa unsur Ni, umumnya terjadi di daerah tropis sampai sub-tropis. Pembentukan endapan nikel laterit secara umum dikendalikan oleh beberapa faktor yakni; morfologi, litologi dan struktur geologi. Penelitian ini difokuskan pada geologi dan estimasi cadangan dengan metode ordinary kriging pada endapan nikel laterit. Daerah penelitian terletak di daerah Tambang Tengah Bukit TLC4 Pomalaa, wilayah konsesi penambangan PT. Aneka Tambang, Tbk. Kondisi daerah berupa perbukitan dengan ketinggian 205 m sampai 235 m dari permukaan laut. Secara megaskopis maupun petrografis satuan ini didominasi oleh batuan beku ultramafik berupa dunit dan peridotit dari jenis harzburgite. Daerah penelitian seluas 300 x 325 m telah dibor secara reguler dengan spasi 25 m terdapat 112 blok, diantaranya ada 101 blok yang tersampel dan 11 blok tidak tersampel. Dengan menggunakan salah satu tools pada program ArcGIS 9.3, yakni geostatistical analyst, data titik bor tersebut diestimasi menggunakan metode ordinary kriging yang bertujuan untuk mengoreksi kadar-kadar conto sampel titik bor, dan memprediksi nilai titik bor pada blok yang tidak tersampel. Hasil semivariogram kadar nikel menghasilkan anisotropi geometri yang menggambarkan daerah pengaruh (range) sebaran endapan nikel sepanjang 197, 6 m berarah N 296,4°, searah dengan struktur kekar pada lokasi penelitian yang berarah Tenggara-Barat Laut. Untuk ketebalan memiliki daerah pengaruh atau range sepanjang 172, 5 m berarah N 135° E. Kadar nikel mula-mula yang masuk dalam kategori cut off grade sebanyak 56 blok, namun setelah melalui estimasi dengan metode ordinary kriging jumlah blok yang masuk kategori cut off grade sebanyak 71 blok. Dalam hal ini nilai cut off grade yang ditetapkan adalah 1,4 %. Nilai simpangan baku dari data sampel titik bor sebesar 0,39, setelah proses kriging diperoleh simpangan baku sebesar 0,24. Sedangkan koefisien variasi dari sampel data titik bor sebelum proses kriging sebesar 0,26 dan setelah proses kriging sebesar 0,17. Jumlah cadangan atau tonase nikel yang diperoleh sebelum dilakukan kriging sebesar 4.279,006 ton dan setelah dilakukan kriging diperoleh tonase nikel sebesar 4.267,280 ton. Estimasi kriging merupakan metode pendekatan dari nilai sebenarnya dengan tujuan utama untuk menghindari kesalahan sistimatis dalam estimasi yang terlalu besar atau terlalu kecil dalam memaksir cadangan.

Kata Kunci : Geologi, Nikel laterit, geostatistik, ordinary kriging, semivariogram, estimasi cadangan

1. PENDAHULUAN

Dalam setiap kegiatan pertambangan yang menjadi persoalan utama dalam pembahasan metode estimasi cadangan adalah, bahwa endapan bahan galian harus dipertimbangkan sebagai suatu gambaran cadangan yang utuh. Dalam hal ini faktor penting dalam menggambarkan suatu endapan bahan galian adalah bagaimana pengelompokannya atau pengklasifikasiannya yang didasarkan atas keadaan geologi, bentuk geometri, besarnya cut off grade, batas endapan dan sistim penambangannya.

Secara umum endapan bahan galian dapat dikategorikan atas sederhana atau kompleks, tergantung dari distribusi kadar dan bentuk geometrinya. Kriteria untuk mengkategorikan endapan bahan galian ini didasarkan atas pendekatan geologi.

Perhitungan cadangan merupakan salah satu hal penting dalam kegiatan eksplorasi. Perhitungan yang dimaksud disini mulai dari sumber daya sampai pada cadangan tertambang yang merupakan tahap akhir dari proses eksplorasi. Hasil perhitungan cadangan tertambang kemudian akan digunakan untuk mengevaluasi apa-

kah sebuah kegiatan penam-bangan layak atau tidak.

Metode yang sering digunakan dalam perhitungan cadangan adalah metode konvensional, namun untuk estimasi cadangan bijih metode ini dianggap kurang teliti sehingga banyak yang beralih ke metode geostatistik yang memiliki tingkat presisi yang lebih tinggi.

Kriging adalah estimator geostatistik yang dirancang untuk melakukan penaksiran kadar blok sebagai kombinasi linear dari contoh-contoh yang ada di dalam / sekitar blok. Faktor bobot dipilih sedemikian rupa sehingga diperoleh varians estimasi yang minimum. Proses kriging ini memberikan harga-harga pengestimasi kadar-kadar blok berdasarkan kadar-kadar contoh yang sudah dikoreksi. Penelitian ini dilakukan untuk menambah wawasan keilmuan tentang kontrol geologi terhadap pembentukan endapan nikel laterit, dan ikut andil memberikan alternatif dalam perhitungan cadangan secara geostatistik dengan metode ordinary kriging.

2. DASAR TEORI

Menurut Atmadja (dalam Suratman, 2000) batuan ultramafik yang menyusun daerah Pomalaa merupakan bagian dari kompleks ultramafik yang terdapat di Busur Timur Sulawesi. Pulau Sulawesi dicirikan dengan 2 busur yang berbeda, sebelah barat dicirikan oleh batuan granit dan granodiorit, sedangkan busur timur 15 dicirikan dengan batuan mafik dan ultramafik (Gambar 2.1). Komplek batuan ultramafik yang luas terdapat pada lengan timur dan lengan tenggara. Tektonik setting batuan ultramafik di Busur Timur Sulawesi sama dengan tipe Alpin. Menurut Soeria-Atmadja et al. (1972) jalur batuan ultramafik di Busur Timur Sulawesi memperlihatkan kenampakan yang sama dengan peridotit Tipe Alpin, dengan ciri-ciri bentuk dan distribusi yang tidak teratur, mineral olivin lebih dominan dibandingkan dengan piroksen dalam tubuh ultramafik. Batas intrusi ultramafik umumnya mengalami serpentinisasi dan pensesaran pada batuan yang menutupinya dan adanya pembentukan kromit dengan tekstur nodul dan orbicular dalam dunit yang merupakan bagian dari ultramafik. Komplek ultramafik yang terdapat di Sulawesi Timur dan Tenggara merupakan suatu jalur yang terputus – putus dan dapat diikuti dari bagian paling timur Sulawesi Timur kearah Barat kemudian membelok mengikuti arah struktur Sulawesi Tenggara. Jalur batuan ultramafik di Sulawesi Tenggara dapat dibagi menjadi dua kelompok. Kelompok pertama didapatkan mulai dari Sua-sua sampai Pomalaa lalu menyebar kearah timur melalui Androwengga, Mekelulu dan Benua sampai Kendari. Kelompok kedua menyebar ke arah tenggara me-

lalui Gunung Watumohai dan Bombaea sampai ke Torobulu. Kedua kelompok tersebut kemudian bergabung lagi di ujung tenggara Sulawesi Tenggara (sekitar Teluk Wawonii).

Jalur batuan ultramafik tersusun oleh harzburgit, dunit, serpentin dan piroksenit. Pada beberapa bagian dalam kompleks tersebut, batuan-batuan ultramafik menunjukkan adanya korok-korok dan intrusi kecil yang bersusunan gabro dan diorite. Menurut Hasanuddin (1992), batuan peridotit yang tersingkap di daerah Pomalaa umumnya telah mengalami proses serpentinisasi dan mineralisasi yang kemudian mengalami pelapukan yang cukup kuat dengan warna lapukannya kuning, kecoklatan berbintik hitam atau abu-abu putih dengan warna kehijauan pada bagian luarnya.



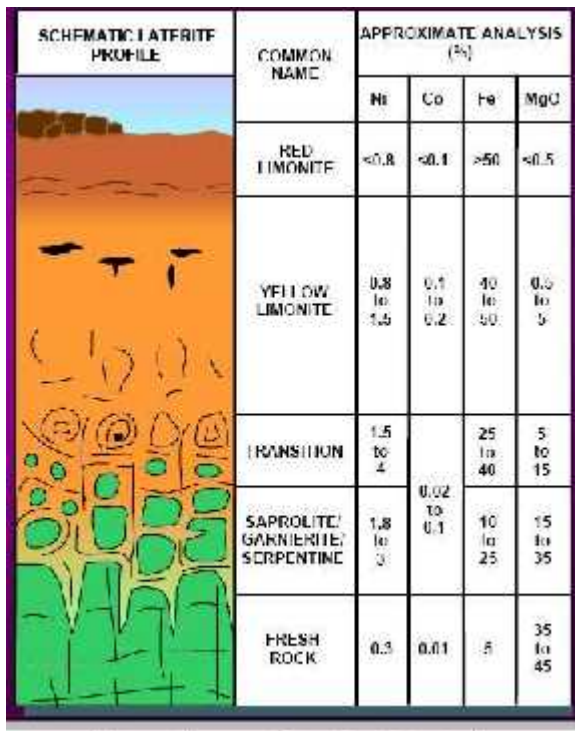
Gambar 1 : Peta lokasi penelitian, terletak di Kab. Kolaka, Sulawesi Tenggara.

Laterit merupakan produk dari hasil pelapukan yang terjadi dalam kondisi lembab, hangat dan terjadi di daerah tropis yang dicirikan oleh melimpahnya unsur besi dan aluminium (Robb, 2005). Pelapukan merupakan proses rusaknya material-material batuan yang dekat permukaan bumi dan membentuk produk yang baru (Ollier, 1969). Lingkungan dekat permukaan dicirikan oleh suhu dan tekanan yang rendah, konsentrasi air, oksigen bebas dan karbon dioksida yang tinggi. Pada lingkungan tersebut pelapukan kimia akan lebih intensif daripada pelapukan fisika.

Prijono (1977) menyatakan bahwa pencucian pada batuan yang tidak resisten mengakibatkan terjadinya pengkayaan *in-situ* pada Fe, Al, Cr, Ni dan Co pada peridotit. Proses pencucian silika dan mineral yang mudah larut dari profil soil pada lingkungan yang bersifat asam, hangat dan lembab disebut sebagai laterisasi.

Proses laterisasi berawal dari infiltrasi air hujan yang bersifat asam yang masuk ke dalam zone retakan, kemudian melarutkan mineral-mineral yang mudah larut pada batuan dasar. Mineral dengan berat jenis yang tinggi akan tertinggal di permukaan membentuk pengkayaan residual, sedangkan mineral yang mudah larut akan turun ke bawah membentuk zona akumulasi dengan pengkayaan supergene.

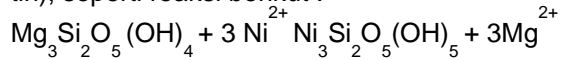
Menurut Prijono (1985), asal mula pembentukan endapan nikel laterit berasal dari batuan peridotit yang mengalami serpentinisasi kemudian terekspos ke permukaan, pada kondisi iklim tropis dengan musim panas dan hujan berganti-ganti kemudian mengalami pelapukan secara terus menerus yang mengakibatkan batuan menjadi rentan terhadap proses pencucian (leaching). Sirkulasi air permukaan yang mengabsorpsi CO₂ dari atmosfer mempercepat proses pelapukan dan pencucian menjadi lebih intensif.



Gambar 2. : Profil endapan nikel laterit (Elias, 1979)

Alkali tanah, Mg dan Ca berubah menjadi bikarbonat oleh air permukaan yang asam, sementara silika (SiO₂) akan larut dan tertransport sebagai larutan koloid, karena mengalami perpindahan oleh alkali tanah dan silika, logam-logam primer yang terdapat pada batuan peridotit seperti Fe, Al, Cr, Ni, dan Co larut dan mengalami pengayaan in situ, zona ini dinamakan zona limonit. Dalam proses laterisasi, pelapukan lebih lanjut, Ni akan larut dan terbawa oleh air tanah kemudian mengalami pro-

ses presipitasi (pertukaran unsur Mg dengan unsur Ni diantara air tanah dan mineral serpentin), seperti reaksi berikut :



Kemudian membentuk mineral Ni-magnesium hidrosilikat yang disebut garnierite (NiMg) SiO₃nH₂O dan mengisi kekar-kekar atau retakan-retakan pada batuan dasar peridotit, oleh pengayaan sekunder atau *supergene*, pengayaan zona biji silikat (bijih saprolit) akan terbentuk diantara zona saprolit dan batuan peridotit segar.

Profil laterit dapat dibagi menjadi beberapa zone yang dikontrol oleh tingkat kelarutan mineral-mineral penyusun laterit (Gambar 2.). Go-lightly (1979) dan Elias (2003), secara umum membagi profil laterit menjadi 4 zonasi, yaitu:

1. Zone *Limonite Overburden (LO)*
2. Zone *Medium Grade Limonite (MGL)*
3. Zone *Saprolite*
4. Zone *Bedrock*

3. METODE PENELITIAN

Metode Geostatistik

Saat ini dikenal dua cara dalam menganalisa karakteristik cebakan mineral secara statistik, yaitu statistik klasik dan statistik spasial. Penggunaan statistik klasik untuk menyatakan sifat suatu nilai contoh mengambil asumsi bahwa nilai contoh merupakan realisasi peubah acak, komposisi contoh secara relatif diabaikan dan diasumsikan bahwa semua nilai contoh di dalam cebakan mineral mempunyai kemungkinan sama untuk dipilih. Hadirnya kecenderungan-kecenderungan, zona pengkayaan dan *pay shoot* pada mineralisasi akan diabaikan. Kenyataan pada ilmu kebumihan menunjukkan bahwa dua contoh yang diambil saling berdekatan seharusnya mempunyai nilai yang mirip jika dibandingkan contoh lain yang berjauhan.

Pada statistik spasial, nilai contoh merupakan realisasi fungsi acak. Nilai contoh merupakan suatu fungsi dari posisinya dalam cebakan, dan posisi relatif contoh dimasukkan dalam pertimbangan. Kesamaan nilai-nilai contoh yang merupakan fungsi jarak contoh serta yang saling berhubungan ini merupakan dasar teori statistik spasial.

Untuk mengetahui sejauh mana hubungan spasial antara titik-titik di dalam cebakan, maka harus diketahui fungsi strukturalnya yang dicerminkan oleh model semivariogram. Menetapkan model semivariogram merupakan langkah awal dalam perhitungan geostatistik, disusul dengan perhitungan varians estimasi, varians dispersi dan varians kriging (Darijanto, 1999).

Semivariogram menggambarkan selisih rata-rata antara harga titik percontoh yang ter-

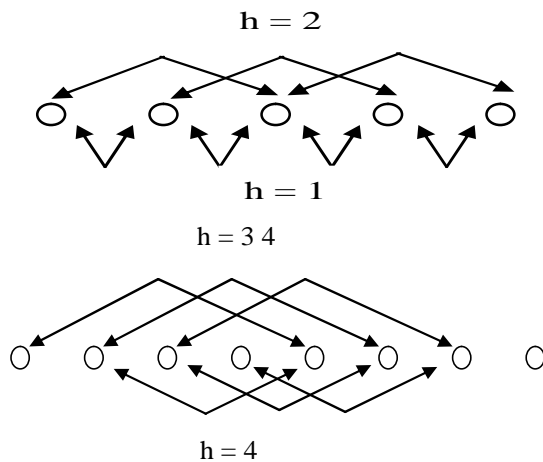
pisah oleh jarak pada arah tertentu atau titik-titik yang dipisahkan oleh *lag* tertentu. Menurut Armstrong (1998) Semivariogram eksperimental dinyatakan dalam rumus sebagai berikut :

$$(h) = \frac{\sum_{i=1}^N [z(x_i) - z(x_i + h)]^2}{2N(h)} \quad \text{Pers. (1)}$$

dimana :

- (h) = semivariogram untuk arah tertentu dari jarak h
- h = jarak antara contoh atau lag semivariogram
- z(x_i) = nilai variable z(x_i + h) = nilai variabel yang terpisah sejauh h
- N(h) = jumlah pasangan data

Hubungan antara z(x_i) dan z(x_i + h) dapat ditunjukkan dengan gambar sebagai berikut :



Gambar 3. Hubungan nilai perconto pada semivariogram (Davis, 2002)

Kriging

Secara umum teknik kriging dibedakan menjadi dua, yaitu kriging linear dan kriging non linear. Kriging biasa (*Ordinary Kriging*, disingkat OK) merupakan salah satu contoh kriging linear, sedangkan salah satu contoh kriging non linear adalah kriging indikator (*Indicator Kriging*, disingkat IK). Penaksiran kadar dengan teknik *Ordinary Kriging* banyak digunakan karena sederhana dan mudah di pahami (Sulistiyana, 1998).

Ordinary kriging dapat digunakan sebagai penaksir cadangan global, tak bias dengan variansi minimum dan merupakan kombinasi linear sehingga ordinary kriging terkenal sebagai BLUE yaitu *Best Linear Unbiased Estimator*. Penerapan teknik ordinary kriging di lapangan telah membuktikan bahwa hasil taksiran sumberdaya dan cadangan akan akurat apabila dilakukan pada nilai koefisien variansi mendekati satu, contoh cebakan seperti sedimenter dan porfiri (Sulistiyana, 1998).

Dalam pengolahan data dengan menggunakan metode *ordinary kriging* (OK) beberapa hal yang perlu diketahui antara lain :

1. Mencari nilai rata-rata diseluruh blok. Harga taksiran terhadap suatu kadar Z dari volume B dipilih Z_x* taksiran kadar dapat dihitung melalui pembobotan rata-rata tertimbang (*weighted average*) kadar-kadar conto Z(x_i).

$$Z_b^* = \sum_{i=1}^n \{ \}_i \cdot Z(x_i) \quad i = 1 \dots n$$

2. Adanya penaksir linear

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \{ \}_i \cdot Z_i \quad \text{Pers. (2)}$$

3. Mempertimbangkan kondisi tak bias, dimana jumlah faktor pembobot _i dibuat sama dengan satu

$$\sum_{i=1}^n \{ \}_i = 1 \quad \text{Pers. (3)}$$

Dimana : Z* = Nilai estimasi
Z = Nilai suatu blok
i = Faktor pembobot

Harga yang diharapkan untuk perbedaan antara Z dan Z_b* adalah nol (Z_b* - Z) = 0

Estimasi Sumberdaya Tonase Bijih

Dalam mengestimasi cadangan ada tiga bagian yang dihitung.

- Estimasi kadar dan variansi kesalahan. Estimasi kadar dan varian kesalahan diperoleh dari hasil perhitungan pada program kriging
- Estimasi ketebalan dan varian kesalahan. Estimasi ketebalan dan varian kesalahannya diperoleh dari hasil perhitungan pada program kriging.
- Estimasi cadangan dan rata-rata global kadar serta ketebalan

1. Untuk menghitung tonase pada suatu badan bijih atau endapan diperlukan :

- a. Luas Blok (A)
- b. Ketebalan Blok (t)
- c. Berat Jenis (d)
- d. Kadar (g)

$$\text{Tonase} = A \times t \times d \times g \quad \text{Pers. (4)}$$

2. Untuk menghitung kadar rata-rata global digunakan formula (Rauf, 1998) :

$$g = \frac{\sum_{i=1}^n V_i g_i}{\sum_{i=1}^n V_i} \quad \text{Pers. (5)}$$

Dimana : $\sum_{i=1}^n V_i g_i = \text{Volume cadangan}$
 $\sum_{i=1}^n V_i = \text{Volume Blok}$

3. Untuk menghitung ketebalan rata-rata global digunakan formula (Rauf, 1998) :

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{Pers. (6)}$$

Dimana : $\sum_{i=1}^n t_i = \text{Jumlah ketebalan}$
 $N = \text{Jumlah Titik Bor}$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Morfologi / Topografi

Daerah penelitian terletak di Tambang Tengah Bukit TLC 4 Pomalaa. Secara umum morfologi daerah penelitian terdiri dari kelerengan landai dan sedang dengan kondisi relief berupa perbukitan dengan ketinggian 205 – 235 m dari permukaan laut (Gambar 4.).



Gambar 4. Morfologi daerah pomalaa

Litologi

Batuan penyusun daerah Pomalaa dan sekitarnya adalah batuan ultramafik yang terdiri dari peridotit (harzbrugit, wehrlite, dan lherzolite), dunit, dan serpentine. Batuan serpentin terbentuk dari hasil alterasi mineral feromagnesian seperti olivin, pyroxene dan amphibol. Berdasarkan data analisa hasil pengambilan sampel titik bor, batuan yang menyusun daerah bukit TLC4, merupakan batuan ultramafik dengan tingkat pelapukan (laterisasi) yang relatif sedang – tinggi. Batuan peridotit yang terdapat pada bukit TLC4 Pomalaa, merupakan bagian dari kompleks batuan ultramafik yang terdapat di Sulawesi Tenggara.

Dari hasil deskripsi petrografi, litologi daerah penelitian di dominasi oleh batuan dunit dan peridotit dengan komposisi mineral terdiri dari olivin, piroksen, serpentin, magnetit, kromit dan garnet.

Struktur Geologi

Secara umum pada daerah penelitian di Bukit TLC 4 sulit ditemukan struktur yang masih ideal karena proses laterisasi yang intensif, sehingga batuan laterit yang terbentuk menutupi batuan dasarnya. Pada beberapa bagian daerah penelitian ditemukan adanya rekahan-rekahan yang terisi oleh mineral sekunder berupa garnierit, krisopras dan kuarsa (Gambar 5.). Terdapat dua kelompok utama dari struktur rekahan ini, yaitu kelompok struktur kekar yang berarah Timur laut – Barat Daya dan kelompok yang berarah Tenggara – Barat Laut.



Gambar 5 : Kenampakan kekar yang terisi oleh mineral sekunder berupa garnierit

Geostatistik Dan Estimasi Cadangan

Sebelum memasuki tahap geostatistik, data geokimia hasil pengeboran terlebih dahulu dilakukan pengelompokan. Daerah penelitian seluas 300 x 325 m telah dilakukan pengeboran secara reguler dengan spasi 25 m yang diekspresikan sebagai blok-blok kecil dengan ukuran 25 x 25 m. terdapat 112 blok, diantaranya ada 101 blok yang tersampel dan 11 blok tidak tersampel. Variabel yang akan diperhitungkan adalah kadar nikel dan ketebalan, dalam hal ini kadar nikel yang diperhitungkan adalah kadar nikel yang terdapat pada zona saprolit. Kadar nikel pada zona limonit tidak diperhitungkan karena dianggap tidak ekonomis dengan kadar nikel kecil dan kandungan Fe cukup tinggi. Pada zona saprolit, kadar nikel cukup tinggi, untuk itulah zona ini dianggap ekonomis dan sebagian besar masuk dalam kategori *cut off grade* (COG).

Penentuan zona saprolit berdasarkan data geokimia hasil pengeboran. Adapun parameter

yang dijadikan tolak ukur dalam menentukan zona saprolit antara lain, pertama: perbandingan kadar unsur Fe dan kadar unsur Ni nilainya harus kurang atau sama dengan 7 ($Fe/Ni \leq 7$). Kedua: perbandingan kadar unsur SiO_2 dengan MgO nilainya harus kurang atau sama dengan 2 ($S/M \leq 2$). Ketiga adalah perbandingan antara kadar unsur CaO dan MgO dengan kadar unsur SiO_2 , nilainya kurang atau sama dengan 0,5 ($BC \leq 0,5$).59.

Analisa Data dan Perhitungan

Proses kriging menggunakan program Arc GIS 9.3 dengan memanfaatkan salah satu perangkat pada program ini, yakni *Geostatistical Analyst*, melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

Semivariogram

Menetapkan model semivariogram merupakan langkah awal dalam perhitungan geostatistik. Dalam penelitian ini model semivariogram yang dipilih adalah model *spherical*, karena model ini yang memberikan prediksi paling baik dengan nilai *root-mean-square standardized prediction error* mendekati nilai satu, sebagai syarat bahwa hasil prediksi tidak bias (*unbiased*). Semivariogram bertujuan untuk mengetahui sejauh mana hubungan spasial antara titik-titik di dalam cebakan. Suatu variabel dikatakan terregional jika terdistribusi dalam ruang dan biasanya mencirikan suatu fenomena tertentu.

Secara matematik variabel terregional merupakan penyajian nilai fungsi $f(x)$ yang menempati setiap titik x pada ruang. Prilaku karakteristik atau struktur variabilitas dalam ruang dari variabel terregional dapat dilihat/ dikenali suatu aspek *erratic* secara lokal, yakni adanya zona yang lebih kaya dibandingkan yang lainnya. Dalam penelitian ini data yang diproses secara geostatistik meliputi kadar dan ketebalan nikel. Tahapan geostatistik meliputi:

Semivariogram Kadar Nikel

Dalam perhitungan semivariogram eksperimen, data yang diinput dalam program ArcGIS 9.3 adalah data dari program Ms. Excel yang dilengkapi dengan titik koodinat agar software tersebut dapat membaca data titik bor berdasarkan letak dan jarak yang telah ditentukan. Semivariogram eksperimen dihitung dari empat arah, $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$, dan 135° . Maksud dari perhitungan empat arah adalah untuk mengetahui adanya korelasi spasial dari variabel terregional atau dapat didefinisikan sebagai arah penyebaran kadar nikel.

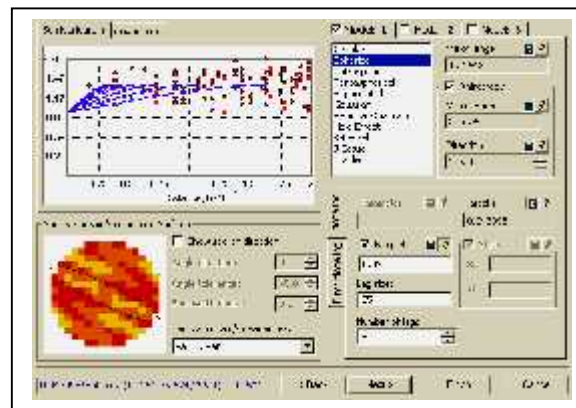
Mengingat h merupakan suatu vektor, maka suatu variogram ditentukan untuk berbagai arah. Suatu penyelidikan perubahan $\gamma(h)$ sesuai

dengan arah orientasinya memungkinkan munculnya anisotropi. Dalam penelitian ini anisotropi yang muncul, yakni $\gamma(h)$ dengan arah yang berbeda tetapi mempunyai harga sill dan nugget variance yang sama, maka anisotropi yang dihasilkan adalah anisotropi geometri.

Ketika program ArcGIS dijalankan, dengan sendirinya bentuk anisotropi akan ditampilkan, namun tampilan tersebut harus diuji dari empat arah untuk mengetahui kondisi yang terbaik dengan patokan yang memiliki nilai *range* (a) terpanjang dan hasil prediksi variabel memberikan nilai eror terkecil

Berdasarkan analisa anisotropi yang dilakukan, hasil yang diperoleh memberikan anisotropi geometri bentuk elips untuk kadar nikel dengan *range* (a) terpanjang 197,642 m dan *range* (a) terpendek 35,674 m, berarah $N 296,4^\circ E$ (Gambar 4.3). Kondisi ini merupakan kondisi terbaik dari keempat arah yang telah diamati.

Bentuk dari anisotropi ini menggambarkan *range* (a) atau daerah pengaruh dimana nilai semivariogram masih memiliki korelasi spasial atau kondisi seperti ini dapat dijabarkan sebagai pola penyebaran kadar nikel yang menempati areal sepanjang 197,642 m yang berarah Tenggara-Barat Laut. Hasil ini juga dapat dijadikan sebagai salah satu acuan untuk memberikan rekomendasi bagi kegiatan eksplorasi selanjutnya.



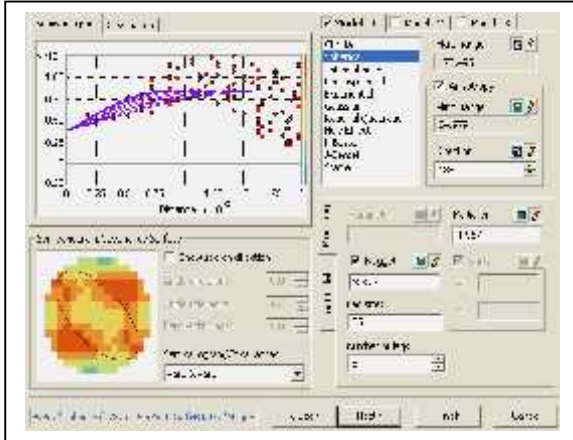
Gambar 6 : Semivariogram kadar nikel pada program ArcGIS 9.3.

Semivariogram Ketebalan Nikel.

Perhitungan semivariogram ketebalan sama dengan cara yang dilakukan pada perhitungan semivariogram kadar nikel. Berdasarkan analisa anisotropi yang dihasilkan dari proses semivariogram diperoleh anisotropi geometri bentuk elips untuk ketebalan nikel dengan *range* (a) terpanjang 172,5 m dan *range* (a) terpendek 84,97 m, berarah $N 135^\circ E$ (Gambar 7).

Model ini merupakan kondisi terbaik dari keempat arah yang telah diamati. Hal ini menggambarkan bahwa daerah pengaruh atau kete-

balan lapisan nikel yang prospek berada pada areal sepanjang 172,5 m yang berarah Tenggara-Barat Laut. Hasil semivariogram ini dapat dijadikan salah satu acuan dalam memberikan rekomendasi pada kegiatan eksplorasi selanjutnya.



Gambar 7 : Semivariogram Tebal nikel pada program ArcGIS 9.3.

Kriging

Ordinary kriging merupakan suatu metode penaksir variabel terregional pada suatu titik atau wilayah dengan kriteria meminimumkan taksiran variansi. Ordinary kriging merupakan suatu metode yang sering dihubungkan dengan sifat BLUE yaitu *Best Linear Unbiased Estimator*, yakni penaksir tak bias linear yang terbaik. Ordinary kriging berbentuk linear karena penaksir-penaksirnya dipengaruhi oleh kombinasi linear data, tak bias karena bertujuan mendapatkan m , varians galat (Amstrong, 1998). R mean galat sama dengan nol dan bertujuan memperkecil $2R$

Proses kriging merupakan kegiatan tahap berikutnya setelah melalui proses semivariogram, model semivariogram yang dipilih akan sangat menentukan hasil kriging dalam mengoreksi dan memprediksi nilai suatu variabel. Salah satu keunggulan dari proses kriging pada program ArcGIS adalah kemampuannya untuk mengoreksi semua nilai yang ada serta dapat memprediksi lokasi yang tidak tersampel. Daerah penelitian seluas 300 m x 325 m, ada 101 blok yang tersampel dan 11 blok tidak tersampel, namun setelah melalui proses kriging semua blok memiliki nilai sehingga jumlah blok menjadi 112.

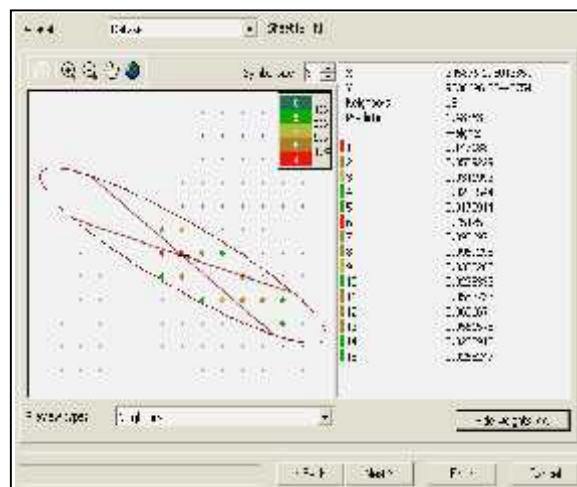
Pihak perusahaan dalam hal ini PT. Aneka Tambang Tbk menetapkan hasil tambang dalam bentuk bijih yang ekonomis untuk diolah/ diproses harus memiliki kandungan nikel minimal sebesar 1,8%. Namun dalam kegiatan penambangan kadar nikel yang masuk dalam kategori

cut off grade adalah 1,4%, untuk mencapai target dari kadar minimal yang ditetapkan maka dilakukan pencampuran atau *blending* dengan bijih yang lebih tinggi. Hasil penambangan bijih dengan kandungan nikel lebih tinggi biasanya didapat dari beberapa blok penambangan yang memiliki kandungan nikel diatas 2%, atau diperoleh dari hasil penambangan bijih dari daerah lain, seperti halmahera yang hasil tambang bijihnya rata-rata mengandung nikel 2 – 3 %.

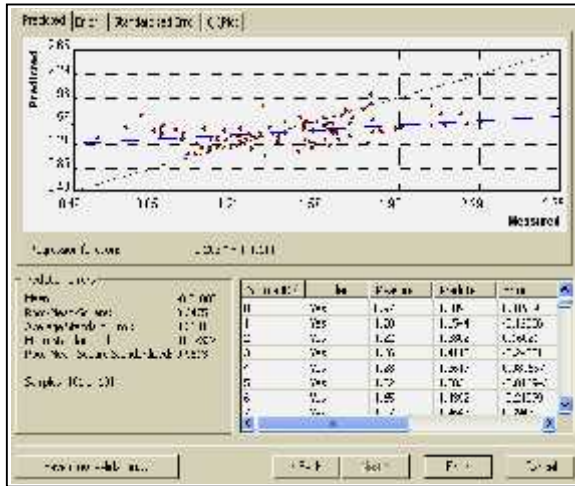
Dari data sampel bijih hasil pengeboran sebanyak 101 sampel yang masuk dalam *cut off grade* (memiliki kandungan nikel diatas 1,4%) sebanyak 56 blok, namun setelah melalui proses kriging data sampel bijih yang masuk dalam kategori *cut off grade* sebanyak 71 blok (Lihat Lampiran H). Disini berarti bahwa contoh bor tersebut bukanlah suatu harga estimasi yang paling baik untuk menaksir blok, sehingga diperlukan suatu koreksi.

Dalam program ArcGIS semua nilai conto dikoreksi dan diberikan harga perkiraan melalui pembobotan nilai-nilai variabel disekitarnya. Harga estimasi dikatakan tidak bias bila jumlah faktor pembobot sama dengan satu (Gambar 8). Parameter lain yang dijadikan indikator kesalahan dalam prediksi adalah hasil estimasi/prediksi dikatakan akurat apabila rata-rata error atau *mean error* mendekati nol dan *average standard error* sekecil mungkin.

Hasil estimasi/prediksi terhadap nilai conto cukup akurat karena nilai perkiraan mendekati nilai yang sebenarnya yang ditandai dengan rata-rata error mendekati nol atau -0,01002 dan nilai *average standard error* yang cukup kecil, yakni 0,360. Demikian halnya dengan hasil prediksi nilai conto tidak bias yang ditandai dengan nilai *root-mean-square standardized prediction error* mendekati satu, yakni 0,961 (Gambar 9).



Gambar 8 : Nilai kadar nikel yang diprediksi dan faktor pembobotnya



Gambar 4.6: Nilai hasil prediksi kadar nikel dan rangkuman statistik

Perhitungan Cadangan Tonnase Nikel

Data kadar dan ketebalan nikel dari sampel contoh hasil pengeboran terlebih dahulu diklasifikasikan dalam zona saprolit. Data yang dijadikan bahan dalam perhitungan cadangan adalah nilai rata-rata kadar nikel zona saprolit dan ketebalan rata-rata zona saprolite. Kemudian data tersebut diolah dengan menggunakan metode ordinary kriging dengan menggunakan program ArcGIS 9.3, nilai prediksi kadar nikel kemudian diklasifikasikan lagi dalam *cut off grade* (COG) atau kadar nikel diatas 1.4%. Kadar nikel pada sampel contoh yang masuk dalam *cut off grade* sebelum melalui proses kriging sebanyak 56 blok, namun setelah melalui proses kriging nilai blok yang masuk dalam kategori *cut off grade* sebanyak 71 blok. Kondisi ini menggambarkan bahwa nilai-nilai blok setelah melalui proses kriging mengalami koreksi secara keseluruhan sehingga variabilitas populasi data semakin kecil, yakni perbedaan signifikan antara data satu dengan data yang lain semakin mengecil. Hal ini dibuktikan dengan kecilnya koefisien variasi dari nilai blok setelah melalui proses kriging.

Koefisien variasi merupakan pendekatan statistik yang memberikan suatu besaran variabilitas alami suatu populasi data, koefisien variasi yang tinggi menunjukkan harga data melebar dan koefisien variasi yang rendah menunjukkan harga data yang sempit atau kecilnya perbedaan data yang satu dengan data yang lain. Perhitungan cadangan dilakukan dengan cara perhitungan endapan per lubang bor, dimana setiap titik lubang bor mempunyai pengaruh sampai setengah jarak dari titik lain didekatnya. Perhitungan seperti ini biasanya dilakukan untuk menghitung cadangan terukur (*measured reserve*) pada endapan yang isotrop atau mineralisasi homogen.

Jumlah cadangan atau tonase nikel yang diperoleh sebelum dilakukan kriging sebesar 4.279,006 ton dan setelah dilakukan kriging diperoleh tonase nikel sebesar 4.267,280 ton. Bila diperhatikan jumlah tonase nikel yang diperoleh sebelum kriging lebih besar daripada yang diperoleh setelah kriging. Hal ini diakibatkan oleh data sampel titik bor sebelum dikoreksi dengan metode kriging terdapat beberapa blok yang sangat tebal dengan kadar tinggi sehingga menghasilkan estimasi yang sangat besar (*over estimated*) sementara beberapa blok yang lain kadar nikelnya rendah dan tipis sehingga estimasi yang dihasilkan rendah (*under estimated*). Sementara nilai blok setelah melalui proses kriging terjadi penyeragaman (*smoothing effect*) dimana tidak terjadi perbedaan yang signifikan antara data yang satu dengan yang lainnya, sehingga hasil estimasi cadangan setelah melalui proses kriging dapat dipandang dengan lebih realistis.

5. PENUTUP

Kesimpulan

Secara umum morfologi/ topografi daerah penelitian terdiri dari kelerengan landai dan sedang. Kelerengan landai memiliki slope sekitar 2 - 4° dan kelerengan sedang memiliki slope sekitar 4 - 8°. Salah satu faktor yang berpengaruh pada pembentukan endapan nikel laterit adalah morfologi. Daerah dengan tingkat kelerengan landai sampai sedang cukup ideal sebagai tempat pengkayaan nikel, karena kondisi ini memenuhi syarat untuk terjadinya proses laterisasi, dimana aliran air permukaan atau *run off* tidak begitu besar dan lebih banyak yang meresap ke dalam celah bebatuan dan hal ini ikut menunjang terjadinya proses laterisasi. Sedangkan pada kelerengan curam, erosi mekanik cukup intensif dan aliran air permukaan lebih besar dari pada yang terserap sehingga proses laterisasi berjalan lambat.

Secara megaskopis maupun petrografis satuan litologi pada daerah penelitian didominasi oleh batuan beku ultramafik berupa dunit-peridotit (*harzburgite*). Bagian timur didominasi oleh batuan dunit sedangkan bagian barat didominasi oleh batuan peridotit.

Struktur lokal pada daerah penelitian sangat mempengaruhi distribusi unsur-unsur pada profil kimia daerah tersebut. Dimana pembentukan rekahan-rekahan pada batuan ultramafik yang intensitasnya berbeda-beda ikut berpengaruh pada tingkat pelapukan dan pengkayaan unsur-unsur Ni serta unsur-unsur lain pada profil laterit. Struktur kekar pada daerah penelitian berarah Timur Laut – Barat Daya dan Tenggara – Barat Laut.

Hasil semivariogram pada sampel data bor daerah penelitian diperoleh daerah pengaruh atau *Range* (a) sebaran endapan nikel sepanjang 197,6 m berarah N 296° E. Sedangkan untuk ketebalan mempunyai *range* (a) sepanjang 172, 495 m berarah N 135° E. Kondisi ini searah dengan struktur kekar pada daerah penelitian yang berarah Tenggara-Barat Laut dan sesuai dengan bentuk morfologi daerah penelitian yang memiliki kelerengan sedang sampai landai pada arah tersebut. Kondisi ini menggambarkan, bahwa pada arah tersebut sebaran endapan nikel cenderung lebih homogen sehingga dapat direkomendasikan pengambilan sampel data titik bor dapat dilakukan dengan spasi yang lebih besar.

Koefisien variasi dari sampel data bor sebesar 0,26. Setelah melalui proses kriging diperoleh nilai koefisien variasi yang lebih kecil, yakni 0,17. Sampel data bor hasil proses kriging menghasilkan data yang memiliki variabilitas populasi yang homogen.

Kadar nikel pada sampel conto yang masuk dalam *cut off grade* sebelum proses kriging sebanyak 56 blok, namun setelah melalui proses kriging diperoleh sebanyak 71 blok. Metode ordinary kriging memberikan hasil estimasi yang lebih baik, dimana kadar unsur Ni yang masuk dalam *cut off grade* jumlahnya lebih banyak dan melalui metode ini pula kadar contodikoreksi, dinaikan atau diturunkan sehingga mempersempit elips pencaran data.

Jumlah cadangan atau tonase nikel yang diperoleh sebelum dilakukan kriging sebesar 4.279,006 ton dan setelah dilakukan kriging diperoleh tonase nikel sebesar 4.267,280 ton. Hal ini menggambarkan bahwa estimasi kriging merupakan metode pendekatan dari nilai sebenarnya dengan tujuan utama untuk menghindari kesalahan sistimatis dalam estimasi yang terlalu besar atau terlalu kecil dalam menaksir cadangan.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Armstrong, M, (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York
2. Dariyanto, T, (1998). *Geostatistik*. Jurusan Teknik Pertambangan Fakultas Teknologi Mineral. ITB Bandung.
3. Davis, C.J, (2002). *Statistics and Data Analysis in Geologi*. Third Edition. John Wiley & Sons. New York.
4. Elias, M, (2003). *Nickel Laterite Deposits-Geological Overview, Resources and Exploration*. Special Publication 4 Nickel Elias Asotiation. CSA Australia Pty Ltd, 24p.
5. Hasanuddin, D, Arifin Karim, dan Apud Dja-juli, (1992). *Pemantauan Teknologi Penambangan Bijih Nikel di UPN Pomalaa PT. Aneka Tambang Pomalaa.Kolaka,Sulawesi Tenggara*.
6. Golightly, J.P, (1981). *Nickelferous Laterite Deposit*. Economic Geology 75 th Anniversary Volume 1981
7. Ollier, C, (1969). *Weathering*. T and A Constable Ltd, Great Britain, 304p.
8. Prijono, A., (1977). *Potensial of the Lateritic- Nickel Deposit in Indonesia and Their Succesfull Development Much Depends on The Right Processing Method on The Indonesian Mining Industry, it'spresent and future*. The Indonesian Mining Association. Jakarta 184- 250p.
9. Rauf.A, (1998). *Perhitungan Cadangan Endapan Mineral*. Jurusan Teknik Pertambangan FTM UPN "Veteran" Yogyakarta.
10. Robb, L, (2005). *Introduction to Ore Forming Processes*. Blackwell publishing company. USA
11. Soeria Atmadja, R. Golightly. J.P dan Wahyu. B.N, (1974). *Mafic and Ultramafic Rock Association in The East Arc of Sulawesi*. Proceeding ITB, Vol. 8 No.2 .Bandung
12. Sulistiyana,W, (1998). *Kriging Indikator Sebagai Metode Alternatif Untuk Penaksiran Kadar Bijih Secara Geostatistik*. Prosiding Temu Ilmiah dan Reuni 1998 Jurusan Teknik Pertambangan UPN " Veteran" FTM UPN "Veteran" Yogyakarta
13. Suratman, (2000). *Geology and Nickel Laterit Weathering Deposit in The South East Arm of Sulawesi*. Berita Sedimentologi edisi 14/11/2000. Jakarta