



Bulletin of Scientific Contribution GEOLOGY

Fakultas Teknik Geologi
UNIVERSITAS PADJADJARAN

homepage: <http://jurnal.unpad.ac.id/bsc>
p-ISSN: 1693-4873; e-ISSN: 2541-514X



Volume 19, No.2
Agustus 2021

GEOSTATISTIK DALAM PEMODELAN TEMPERATUR BAWAH PERMUKAAN DENGAN RADIAL BASIS FUNCTIONS DI TAMBANG EMAS TOGURACI, INDONESIA

Dharma Irwanda^{1,2}, Andi Agus Nur¹, Denny Lesmana²

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

²PT.Nusa Halmahera Minerals, Halmahera, Maluku Utara, Indonesia

Email: dharma20002@mail.unpad.ac.id

ABSTRACT

Geostatistics has become a highly developed science and has been widely used in the mining industry. The need to apply geostatistics in estimation and geological modeling is also supported by software developers who continue to improve their software capabilities by using geostatistics as mandatory in their algorithms, to help simplify and speed up spatial data processing work. One of the methods that will be used in this research is radial basis functions, which have advantages in global interpolation and extrapolation methods. This article aims to apply geostatistical concepts for modeling subsurface temperatures in Toguraci with the use of Leapfrog™ software using the radial basis functions method. The model created by this method shows the potential for heat sources in the southwest and south of the Toguraci underground mine, with an isovalue temperature model of $\geq 60^\circ\text{C}$ at a relative distance of 500-600m from the current mine. The resulting model is expected to help provide a better understanding for the safety of underground mining operations regarding the presence of heat source or hot water. Also, sharing information and enriching insights about the development of geostatistical applications and the use of software in the mining industry to the academic environment, especially the earth sciences, and ultimately encouraging further research with a more in-depth geological study point of view.

Keywords: Geostatistic, radial basis functions, Toguraci, temperature modelling

ABSTRAK

Geostatistik telah menjadi ilmu yang sangat berkembang dan telah secara luas digunakan di industri pertambangan. Kebutuhan untuk mengaplikasikan geostatistik dalam estimasi maupun pemodelan geologi juga didukung oleh para pengembang perangkat lunak (*software*) yang terus melakukan peningkatan kemampuan *software*-nya dengan menggunakan geostatistik sebagai hal yang wajib dalam algoritma yang mereka buat, untuk membantu mempermudah dan mempercepat pekerjaan pengolahan data spasial. Salah satu metode yang akan digunakan pada penelitian ini adalah radial basis functions yang mempunyai keunggulan pada metode interpolasi dan ekstrapolasinya yang bersifat global. Penulisan artikel ini bertujuan untuk mengaplikasikan konsep geostatistik untuk pemodelan temperature bawah permukaan di Toguraci dengan bantuan *software* Leapfrog™ menggunakan metode radial basis functions. Model yang dibuat dengan metode ini memperlihatkan adanya potensi sumber panas di sebelah baratdaya dan selatan tambang bawah tanah toguraci, dengan model *isovalue* temperatur $\geq 60^\circ\text{C}$ berjarak relatif 500-600m dari tambang saat ini. Model yang dihasilkan diharapkan dapat membantu memberikan pemahaman yang lebih baik bagi kepentingan keselamatan operasi penambangan bawah tanah terkait keberadaan sumber panas atau air panas. Juga, berbagi informasi dan memperkaya wawasan tentang perkembangan aplikasi geostatistik dan penggunaan *software* di industri pertambangan kepada lingkungan akademis, terutama lingkup ilmu kebumih, dan pada akhirnya mendorong adanya penelitian lanjutan dengan sudut pandang kajian geologi yang lebih mendalam.

Kata kunci: Geostatistik, radial basis functions, Toguraci, pemodelan temperatur

PENDAHULUAN

Geostatistik sebenarnya sudah di perkenalkan pertama kali oleh Danie G. Krige pada tahun 1952, yang merupakan seorang *statistician* dan *mining engineer*, yang

membuat valuasi data pada tambang emas Witwatersrand di Afrika Selatan dengan pendekatan statistik, penggunaan istilah krigging diambil dari namanya. Kemudian, metode ini dikembangkan lagi oleh Georges

Matheron pada tahun 1963 yang melanjutkan ide sebelumnya yang kemudian dikenal secara luas sebagai metode geostatistik. Saat ini ilmu geostatistik sudah sangat berkembang dan juga digunakan untuk berbagai macam keperluan estimasi (tidak terbatas hanya emas). Beberapa pengembang perangkat lunak (*software*) yang mendukung kegiatan pertambangan juga terus melakukan peningkatan kemampuan *software*-nya dengan menggunakan geostatistik sebagai hal yang wajib dalam algoritma yang mereka buat, untuk membantu mempermudah dan mempercepat pekerjaan pengolahan data spasial. Metode yang tersedia juga beragam mulai dari yang konvensional seperti *polygon*, *nearest neighbour*, *inverse distance*, maupun yang sudah menggunakan variogram seperti *kriging* dan *radial basis functions* (RBF). Namun, perlu dipahami bahwa geostatistik dan perangkat lunak tersebut hanya alat, pemahaman yang baik terhadap data adalah kunci dalam pemilihan metode yang tepat. Konsep dasar geostatistik dan pemahaman terhadap data tetap menjadi kunci pada proses estimasi, walaupun bukan berarti kita harus melakukan perhitungan secara manual, yang akan memakan waktu yang lama dan tidak efektif pada kondisi operasional yang berjalan cepat dan dinamis. Kita membutuhkan bantuan *software* yang dapat melakukan estimasi atau membuat model dengan cepat dan tetap menerapkan konsep geostatistik yang tepat. Salah satu *software* yang dapat membantu mempermudah proses estimasi dan pemodelan data spasial adalah Leapfrog™. Tidak hanya mempunyai fungsi geostatistik untuk mengolah data spasial, namun lebih dari itu, *software* ini juga mampu membangun model 3 dimensi, sehingga data data spasial tersebut lebih mudah dipahami secara visual.

Toguraci merupakan salah satu tambang emas yang terdapat di Gosowong, berada dalam area Kontrak Karya PT. Nusa Halmahera Minerals di Halmahera Utara, Maluku Utara. Tipe mineralisasi yang berkembang di area Toguraci adalah porphyry Cu-Au yang lemah, yang di *overprint* oleh mineralisasi epithermal sulfida rendah Au-Ag (Olberg, 1999, Richards dan Priyono, 2004). Toguraci epithermal deposit mulai dieksplorasi dengan metode tambang terbuka (*open pit*) pada tahun 2003 sampai 2006, kemudian dilanjutkan dengan penambangan bawah tanah (*underground*) yang dimulai sejak 2011 dan masih berlanjut sampai saat ini. Dalam tiap proses penambangannya, Toguraci selalu menghadapi tantangan dengan adanya air panas yang keluar kepermukaan melalui bidang lemah berupa struktur sesar maupun

kontak antar batuan. Hal ini menjadi salah satu faktor resiko yang dipertimbangkan dalam kajian keselamatan pada proses penambangannya.

Tujuan dari penelitian ini secara umum adalah mengaplikasikan konsep geostatistik untuk pemodelan temperature bawah permukaan di Toguraci dengan bantuan *software* Leapfrog™, dan secara lebih terperinci tujuan tersebut dapat di jabarkan sebagai berikut:

- Membangun model temperature bawah permukaan dengan pendekatan geostatistik menggunakan metode *radial basis functions* (RBF), untuk membantu memberikan pemahaman yang lebih baik bagi kepentingan keselamatan operasi penambangan bawah tanah terkait dengan keberadaan sumber panas atau air panas.
- Berbagi informasi dan memperkaya wawasan tentang perkembangan aplikasi geostatistik dan penggunaan *software* di industri pertambangan pada lingkungan akademis, terutama lingkup ilmu kebumihan.
- Mendorong adanya penelitian lanjutan dengan sudut pandang kajian geologi yang lebih mendalam, dalam upaya mengetahui apakah temperature tinggi pada tambang bawah tanah Toguraci ini adalah semata mata bahaya atau ada potensi terpendam.

DATA DAN METODE

Penelitian sebelumnya telah dilakukan terkait dengan pemodelan jalur fluida hidrothermal dan interpretasi sistem panasbumi pada tambang toguraci. Menggunakan data sampel air panas dari 8 titik lokasi *dewatering hole*, dan diperoleh data temperatur air panas pada kisaran 68.6 – 72.7 °C. Pemodelan gradien temperatur juga telah dibuat dengan menggunakan data dari 39 lubang pengeboran inti, dan diperoleh kesimpulan bahwa besarnya gradien temperatur bawah permukaan pada lokasi penelitian yaitu 54°C/Km (Evelyn, 2017).

Penelitian saat ini dilakukan sebagai bagian dari pengembangan model yang telah dibuat, karena fokus area dan data yang digunakan sebelumnya sangat terbatas. Penelitian kali ini juga lebih berfokus pada penerapan metode geostatistik dalam pemodelan temperatur di Toguraci, dan dengan menggunakan data yang lebih banyak dengan cakupan area yang lebih luas, sekitar 1942 lubang pengeboran inti akan digunakan, yang berada dalam area 9000N-10500N, 2100E-3700E, dan elevasi sampai pada kedalaman minus 800m di bawah muka air laut atau 4200mRL dalam koordinat lokal (elevasi selalu ditambah 5000 agar tidak

muncul angka negatif pada perhitungan tambang).

Data temperatur yang digunakan merupakan hasil pengukuran menggunakan alat survey untuk pengukuran arah orientasi lubang pengeboran yaitu REFLEX EZ-TRAC™. Alat ini dapat mengukur data-data berupa azimuth, dip, temperatur dan magnetik pada kedalaman yang disepakati pada suatu lubang pengeboran, pada contoh kasus di Gosowong yaitu kedalaman 15/18m, 30m, 60m, 90m, dan seterusnya pada kelipatan 30m.

Data temperatur tersebut akan digunakan untuk membuat model konseptual dengan metode *Radial Basis Functions* (RBF), yang merupakan salah satu metode interpolasi untuk membuat estimasi nilai pada titik tertentu yang tidak memiliki data, berdasarkan data di sekitarnya. Secara singkat, meskipun metode ini tidak dirumuskan dalam bahasa statistik spasial, namun interpolasinya secara aktual dihitung dengan cara yang identik dengan *Dual Kriging* (Horowitz et al., 1996), atau dikenal juga sebagai *Global Kriging* (Seequent.com, 2021). Metode interpolasi yang biasa digunakan pada industri pertambangan mineral atau batubara umumnya bersifat lokal seperti metode *polygon*, *inverse distance weighting*, maupun *kriging*. Sedangkan RBF menggunakan metode interpolasi secara global, artinya interpolan bergantung pada semua titik data yang ada. Perkembangan dari perangkat lunak memungkinkan diterapkannya metode RBF sebagai sebuah algoritma untuk tujuan interpolasi maupun ekstrapolasi data numerik maupun kategori seperti data geologi. Leapfrog™ merupakan perangkat lunak yang menggunakan RBF sebagai interpolasi dan ekstrapolasinya, memanfaatkan fungsi perhitungan *global neighbourhood* yang membuat pemodelan menjadi ideal dan *smooth* bahkan dari data yang sedikit dan berjauhan. Perbedaan dan persamaan prinsip estimasi dari RBF dengan metode lainnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada artikel ini, pemodelan temperatur secara 3 dimensi akan dibuat menggunakan *software* Leapfrog™, dengan menggunakan data temperatur yang diukur pada tiap lubang pengeboran. Model yang dihasilkan merupakan model implisit, yang dapat diartikan sebagai pemodelan dengan membentuk permukaan (*surface*) secara cepat dan otomatis langsung dari data spasial/geologi. Berbeda dengan pemodelan eksplisit atau yang dianggap sebagai metode "tradisional" dengan digitasi manual pada penampang saat membuat *wireframe* sebelum dimodelkan (Seequent.com, 2021).

Metode yang ditawarkan oleh *software* ini juga mampu mengakomodasi parameter geologi yang berbeda dan membangun beberapa model dengan cepat, sehingga beberapa skenario dapat dicoba dan dibandingkan segera. Salah satu parameter tersebut adalah orientasi struktur geologi yang akan membentuk *trend* dan mempengaruhi hasil akhir dari interpolasi yang kita buat. Namun, untuk artikel ini akan dibatasi pada pemodelan konseptual saja, yang merupakan model awal yang terbentuk hanya berdasarkan algoritma *radial basis functions* atau pada Leapfrog™ dikenal dengan istilah *First Pass Model*.

Leapfrog™ menyediakan teknik alternatif untuk membuat model geologi dari kumpulan data lubang pengeboran dengan memanfaatkan metode interpolasi 3D dengan cepat. Kelebihan dan keunikan dari metode ini dapat dijelaskan, diantaranya sebagai berikut (Cowan et al., 2002):

- Konstruksi *wireframe* geologi dari data lubang bor akan dihasilkan secara semi-otomatis dalam hitungan jam langsung dari data komposit.
- Interpretasi geologi kualitatif dapat dengan cepat dimasukkan ke dalam alur kerja. Oleh karena itu, berbagai ide/parameter geologi dapat digunakan untuk menghasilkan berbagai skenario "bagaimana jika?" untuk pengujian terhadap model yang dihasilkan.

Sebaliknya, metode pemodelan tradisional memerlukan interpretasi geologi saat proses digitasi dalam tiap bagian penampang. Selain memakan waktu, kelemahan utama dari metode tradisional adalah kenyataan bahwa model yang dihasilkan unik dan sangat tergantung pada interpretasi masing-masing ahli geologi, dan mungkin tidak mudah direplikasi oleh orang lain. Kelemahan utama dari metode tradisional ini adalah sebagai berikut (Cowan et al., 2002):

- Fakta bahwa intuisi seorang ahli geologi tidak dapat dengan mudah dimasukkan ke dalam proses pemodelan, dan
- Proses interpolasi mungkin memerlukan studi geostatistik untuk data *assay* (yaitu variografi), dan langkah ini saja bisa sangat memakan waktu.

Adapun tahapan pengolahan data yang akan dilakukan untuk membangun model temperatur secara 3 dimensi dengan menggunakan *software* Leapfrog™, dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Preparasi data dalam bentuk tabel file .csv
- Import data ke dalam *software* Leapfrog™
- Validasi data untuk menemukan pencilan, dan atau kemungkinan data yang tidak valid (*error*), jika diperlukan penyesuaian

pada data, maka proses diulang kembali ke poin pertama.

- Interpolasi data menggunakan *software* dengan metode *radial basis functions*.
- Visualisasi konseptual model temperatur pada infrastruktur tambang bawah tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Preparasi data

Preparasi data wajib dilakukan sebelum memasukkan data kedalam *software*, kebutuhan tiap *software* berbeda beda dalam hal tipe *file*, format data, data wajib (*mandatory*) dan lainnya. Leapfrog™ dapat membaca (*import*) beberapa macam tipe *file* salah satunya .csv yang akan digunakan pada proses pemodelan kali ini. Dibutuhkan, minimal 3 file data yang masing masing berisi informasi titik koordinat dan orientasi awal arah dan kemiringan lubang bor (Collar.csv), perubahan arah dan kemiringan lubang bor seiring dengan bertambahnya kedalaman (Survey.csv), dan minimal 1 data interval (Lithology.csv). Yang dimaksud dengan data interval adalah data yang memiliki ukuran panjang sampel dengan nilai/kategori tertentu, misalnya kedalaman 0-100m: Basalt, atau contoh lainnya kedalaman 98-100m: kadar emas 2 g/t. Contoh format tabel pada tiap file dapat dilihat pada tabel 2. Dalam artikel ini data *lithology* dimasukkan hanya untuk memenuhi syarat wajib (*mandatory*), agar data bisa diterima oleh *software*, namun data ini tidak akan kita gunakan untuk pemodelan kali ini. Selain 3 data wajib tersebut diatas, di persiapkan juga data utama berupa temperatur dalam bentuk *point data* yang akan kita gunakan untuk pemodelan (Tabel 3).

Import data dan validasi

Ketiga file yang sudah dipersiapkan (*collar*, *survey*, *lithology*) lalu di *import* ke dalam Leapfrog™, kemudian data temperatur juga di *import* sebagai data *point*, selain itu kita juga dapat menambahkan topografi agar tampilan model lebih aktual. Tahapan selanjutnya adalah menampilkan semua data secara visual, dan menampilkan statistik data. Validasi perlu dilakukan baik secara visual (melibatkan intuisi geologi) dan juga validasi statistik. Jika ditemukan pencilan atau *error* maka diperlukan penyesuaian data agar model yang di buat lebih valid. Pencilan dan atau *error* dapat diidentifikasi dengan berbagai macam metode statistik, dalam artikel ini akan digunakan salah satu yang cukup sederhana yaitu dengan histogram dan *Box Plot* (Gambar 1 dan 2). Dari statistik yang ditampilkan oleh histogram, secara umum dapat dilihat 2 kluster anomali data temperatur, yang pertama pada data temperatur terendah

yaitu 0.2 °C, 3 °C, 3.4 °C dan bahkan ada nilai temperatur dibawah 0 °C, dapat dipastikan bahwa data ini *error*, karena tidak sesuai dengan kondisi lapangan, dimana temperatur tersebut menggambarkan area yang sangat dingin, mendekati/relatif pada titik beku air. Data anomali kedua adalah pada data temperatur tertinggi yaitu 333 °C, juga dapat dipastikan merupakan *error* pembacaan alat ukur, karena terlalu ekstrim dan tidak sesuai dengan kondisi di lapangan. Total sebanyak 19 data dari kedua kumpulan data anomali (*error*) tersebut tidak akan digunakan dalam pemodelan.

Setelah proses validasi data selesai, semua data di *import* kembali, kemudian data ditampilkan lagi dalam bentuk histogram untuk melihat perubahan perhitungan statistik *univariate* nya. Pada gambar 3, hasil *plotting* distribusi data terlihat relatif lebih normal daripada sebelumnya. Walaupun masih terlihat adanya pencilan pada temperatur tinggi, yang didefinisikan dengan formula $Q3 + 1.5 \cdot IQR$, dimana IQR atau *Interquartile Range* didapatkan dengan formula $Q3 - Q1$. Berdasarkan statistik *univariate* ini, maka data temperatur diatas 53 °C masuk kedalam kategori pencilan (*outliers*). Dalam pemodelan ini, pencilan pada temperatur tinggi diasumsikan akan memberi gambaran posisi dan dimensi anomali yang menjadi sumber panas, namun data harus ditampilkan secara visual 3 dimensi untuk memastikan apakah pencilan adalah sumber panas atau merupakan kumpulan data tidak valid lainnya yang secara geologi tidak dapat diterima (Gambar 4).

Interpolasi data dan pemodelan dengan metode radial basis functions

Interpolasi data dengan metode *radial basis function* pada Leapfrog™ memberikan 2 pilihan jenis *interpolant* yaitu *Linear* dan *Spheroidal*, dan masing masing mempunyai parameter tersendiri yang dapat di ubah disesuaikan dengan jenis data. Pemahaman tentang data sangat menentukan dalam pemilihan *interpolant* dan parameter yang tepat. Dalam ilmu statistik, terdapat 4 jenis data berdasarkan skala pengukurannya yaitu data nominal, ordinal, interval, dan rasio. Temperatur merupakan jenis data interval, yang secara sederhana dapat diartikan sebagai data yang memiliki perbedaan, urutan, dan jarak perbedaan yang sama di tiap urutan nilai nya, namun tidak mempunyai titik nol absolut atau mutlak. Temperatur 0 °C tidak bisa diartikan tidak mempunyai nilai.

Seperti telah dijelaskan diawal bahwa *radial basis functions* merupakan *global estimator* yang menggunakan variogram pada

pemodelan spasialnya. Variogram dibuat untuk memperoleh parameter estimasi berupa *nugget*, *sill*, *range*. Namun, sebelumnya harus ditentukan apakah data yang akan digunakan bersifat stasioner atau tidak. Stasioner secara bahasa berarti seimbang atau tidak bergerak, data yang stasioner adalah data yang distribusinya tetap, homogen dan berulang dalam ruang/spasial, atau mempunyai *mean* dan *covariance* yang konstan. Dengan kata lain, nilai harapan (atau *mean*) dari sebuah variabel random $Z(x)$ harus konstan pada tiap titik data x (Armstrong, 1998).

Secara sederhana, data temperatur dapat di tampilkan dalam bentuk *Box Plot*, untuk dapat melihat ada atau tidaknya perubahan nilai rata rata pada tiap rentang kedalaman. Pada gambar 5 terlihat adanya kenaikan nilai rata rata temperatur dengan bertambahnya kedalaman, pada diagram *box plot* tersebut di tampilkan distribusi data dan rata-rata nilainya pada rentang kedalaman tiap 50meter kearah vertikal, dapat disimpulkan bahwa data ini tidak stasioner terhadap perubahan kedalaman.

Temperatur bersifat linear terhadap kedalaman, sesuai prinsip *gradient geothermal* semakin dalam maka temperatur akan naik. Dari sifat data yang telah dijelaskan, maka *interpolant* yang digunakan untuk pemodelan adalah *Linear Interpolant*. Berdasarkan sifat data ini juga maka parameter variogram berupa *sill* dan *range* tidak akan mempengaruhi interpolasi. Merujuk juga kepada Armstrong (1998) yang menyatakan bahwa tidak semua variogram mencapai *sill* (*variance* maksimum), dan nilai terus meningkat dengan bertambahnya jarak, atau dapat diasumsikan juga bahwa daerah pengaruh (*range*) seperti tidak terbatas. *Nugget* juga dapat diasumsikan bernilai 0 atau mendekati, karena sifat temperatur yang merambat melalui media, sehingga pada titik terdekat nilai temperatur tidak signifikan berbeda.

Berdasarkan ada atau tidaknya *sill* dan *range*, model variogram dibagi menjadi 2 yaitu model dengan *sill* dan model tanpa *sill*, atau dikenal juga dengan nama *Bounded* dan *Unbounded Model* (Armstrong, 1998). Yang paling cocok digunakan pada pemodelan temperatur di Toguraci ini adalah *Unbounded*, dengan jenis *Linear Model* atau juga dikenal dengan nama *Power Model*: $\gamma(h)=p|h|^\lambda$, dimana p adalah konstan dan proporsional terhadap nilai absolut h , dan $0 < \lambda < 2$ (Gambar 6.a). Atau dapat ditemukan juga dalam notasi $\gamma(h)=C|h|^\alpha$, dengan $0 < \alpha \leq 2$ (Gambar 6.b).

Merujuk pada panduan yang dibuat oleh *software Leapfrog™* ini dalam website nya *seequent.com*, juga menjelaskan kriteria

yang serupa tentang variogram dan parameter terbaik yang digunakan sebagai *interpolant* untuk pemodelan temperatur, yaitu *Linear* dengan parameter yang digunakan untuk *Nugget* adalah 0, dengan *Drift* yang *linear*, sedangkan untuk *Base Range* dan *Total Sill* tidak akan berpengaruh pada hasil interpolasi. Model yang dihasilkan dari interpolasi data pada *software* ini menghasilkan *isosurface*; berupa permukaan yang memiliki nilai temperatur yang sama, dan *isovalue*; berupa *volume solid* bentukan 3 dimensi yang menggambarkan rentang nilai temperatur tertentu. Pada artikel ini, temperatur akan dimodelkan dalam 5 *isovalue* dengan rentang temperatur $<30^\circ\text{C}$, $30-40^\circ\text{C}$, $40-50^\circ\text{C}$, $50-60^\circ\text{C}$, dan $\geq 60^\circ\text{C}$. Yang dibatasi oleh 5 *isosurface* yang menggambarkan terperatur terendah di tiap model *isovalue* nya yaitu pada 60°C , 50°C , 40°C , 30°C , dan nilai terendah yang direpresentasikan oleh aktual topografi permukaan (Gambar 7).

Pemodelan temperatur yang telah dibuat menunjukkan adanya sumber panas di sebelah baratdaya dan selatan tambang Toguraci dan juga relatif ke arah yang lebih dalam (Gambar 8 dan 9). Pada penampang 9500N terlihat puncak dari *isosurface* temperature $\geq 60^\circ\text{C}$ berada pada elevasi ~ 4961 mRL. Pada elevasi yang relatif sama, temperatur mulai turun ke arah utara pada penampang 10000N dan 10500N maupun ke selatan pada penampang 9000N.

Proses penambangan emas di toguraci yang dilakukan dengan metode tambang bawah tanah, saat ini telah mulai menghadapi tantangan dengan banyaknya sumber air panas $\geq 60^\circ\text{C}$ yang keluar pada zona zona lemah berupa struktur geologi maupun vein sistem yang ada. Pemodelan temperatur yang telah dibuat juga menggambarkan adanya potensi sumber panas di sebelah baratdaya dan selatan Toguraci. Hal ini dapat menjadi bahan pertimbangan untuk analisa potensi resiko penambangan ke arah yang semakin dalam, mengingat dari model *isovalue* temperatur $\geq 60^\circ\text{C}$ hanya berjarak $\sim 500-600\text{m}$ dari infrastruktur tambang saat ini (Gambar 10).

Diskusi

Seperti hal nya semua metode pemodelan, metode ini juga memiliki keterbatasan dan kekurangan. Beberapa model yang dibangun menggunakan metode implisit tidak optimal, karena model yang dihasilkan lebih mencerminkan hasil bentukan fungsi matematika daripada bentuk geologi. Model temperatur yang dihasilkan dari metode RBF ini masih bersifat konseptual, artinya *isosurface* atau *isovalue* yang terbentuk benar benar dari hasil kalkulasi rumus

geostatistik saja, atau pada *software* ini dikenal dengan istilah *First Pass Model*, masih perlu disempurnakan dengan tambahan parameter geologi lainnya. Keterbatasan dan kekurangan dari model ini yang diharapkan dapat menjadi bahan diskusi selanjutnya, diantaranya (namun tidak terbatas pada):

- Geometri bentukan RBF
Pada area yang mempunyai data relatif banyak dengan jarak data yang cukup dekat, dan menunjukkan temperatur yang naik-turun terhadap elevasi, ditemukan beberapa data yang berada diluar *isovalue*, dan atau melewati batas *isosurface*-nya (Gambar 11a). Dibutuhkan validasi dan kemampuan *editing* menggunakan *software* ini, dan "intuisi" dari pengalaman *modelling* untuk menghasilkan geometri yang optimal dan realistis.
- Parameter geologi
Model yang dihasilkan tidak secara otomatis merepresentasikan keadaan geologi yang ada. Untuk pemodelan temperatur seharusnya juga mempertimbangkan keberadaan air panas, dan pergerakannya melalui bidang lemah berupa struktur sesar atau *vein system* yang dilalui lubang bor, yang dapat mempengaruhi nilai temperatur disepanjang lubang bor tersebut (Gambar 11b). Proses penambangan juga dapat menyebabkan perubahan pergerakan air panas dan juga muka air tanah yang perlu dipertimbangkan dalam pemodelan.

Sesar-sesar utama perlu dipetakan dan dimasukkan sebagai salah satu *trend* dalam proses interpolasi. Sesar tersebut juga dapat merepresentasikan jalur-jalur utama air panas, sehingga pada model yang dihasilkan akan memberikan gambaran yang lebih baik untuk membuat prediksi tentang perbedaan letak maupun geometri antara sumber panas, dengan panas yang dibawa oleh air.

Litologi juga dapat digunakan sebagai parameter geologi dalam pemodelan temperatur ini. Pada penelitian sebelumnya juga telah disampaikan bahwa, berdasarkan analisis data kimia air panas dengan diagram segitiga Cl-Li-B diperkirakan bahwa fluida mengalami kesetimbangan dengan diorit (Evelyn, 2017). Namun masih perlu dibuktikan pada skala yang lebih luas. Model litologi perlu ditumpangtindihkan dengan model temperatur terbaru untuk dapat melihat hubungan diantara keduanya.

KESIMPULAN

- Pemodelan temperatur di area Toguraci memperlihatkan adanya potensi sumber panas di sebelah baratdaya dan selatan tambang bawah tanah toguraci, dengan model *isovalue* temperatur $\geq 60^{\circ}\text{C}$

berjarak relatif 500-600m dari tambang saat ini.

- Penggunaan *software* dalam pemodelan menggunakan pendekatan geostatistik sangat mudah dilakukan (dalam artikel ini menggunakan *radial basis functions*), namun perlu dipahami bahwa *software* hanyalah sebuah alat bantu, hasil akhir tetap tergantung pada pemahaman kita terhadap data yang kita miliki, dan harus relevan dengan kondisi lapangan sebenarnya.
- Model temperatur yang dihasilkan sangat menarik untuk dikaji lebih lanjut, apakah bentukan *isovalue* temperatur tinggi tersebut berhubungan dengan tubuh intrusi? Bagaimana peran struktur sesar dan *vein system* sebagai permeability sekunder yang kemungkinan menjadi jalan bagi air panas untuk dapat terekspos di infrastruktur tambang? Apakah temperatur tinggi atau air panas di area Toguraci ini adalah potensi bahaya semata ataukah ada potensi lain yang juga dapat dimanfaatkan? Penelitian lanjutan dirasa perlu dilakukan untuk menjawab pertanyaan pertanyaan tersebut.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terimakasih kepada PT. Nusa Halmahera Minerals, atas ijin penggunaan data-data dan lisensi *software* Leapfrog Geo versi 5.1. yang menjadi kunci dalam proses pemodelan temperatur yang telah dibuat dalam artikel ini. Terkhusus, ucapan terimakasih kepada jajaran pimpinan departemen geologi tambang; Bapak Rendra Suryanatadipura (Manajer geologi tambang), Bapak Arif Supriyadi (Superintendent geologi tambang), Bapak Sejati Awang Wibowo (Specialist resource geologist) dan Perwakilan Manajemen; Bapak Denny Lesmana (Deputy GM Production and Planning), yang semuanya merupakan geologist senior yang berpengalaman, yang telah membagi ilmu dan memberikan diskusi yang konstruktif tentang estimasi, pemodelan, dan geostatistik secara umum. Rekan seperjuangan, Benedictus A.T.E, dan Reza Ardiansyah yang selalu mengkritisi sekaligus memberi semangat untuk terus belajar.

DAFTAR PUSTAKA

- Armstrong, M. 1998. *Basic Linear Geostatistics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York. 153 p.
- Cowan, E.J., Beatson, R.K., Fright, W.R., McLennan, T.J., and Mitchell, T.J. 2002. *Rapid geological modelling*. Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining, International Symposium, Kalgoorlie. 23-25.

- Evelyn, C. M. 2017. *Pemodelan jalur fluida hidrotermal dan interpretasi system panasbumi pada tambang emas Toguraci, Halmahera Utara*. (Skripsi, Universitas Trisakti, 2017).
- Horowitz, F. G., Hornby, P., Bone, D., and Craig, M. 1996. *Fast Multidimensional Interpolations*. Proceedings of the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM 26), Ramani R V (ed), (Society Mining Metallurgy and Exploration (SME): Littleton, Colorado), 583 p.
- Olberg, D.J., Rayner, J., Langmead R.P., and Coote, J.A.R. 1999. *Geology of the Gosowong epithermal gold deposit, Halmahera, Indonesia, East Indonesia*. Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series 4, p. 179–186.
- Richards, T.H., and Priyono, B.D. 2004. *Discovery of the Toguraci Epithermal Au-Ag Deposits, Gosowong Goldfield, Halmahera Island, East Indonesia*. Pacrim paper.
- _____. 2021. *Comparing leapfrog radial basis function and kriging*. <https://www.seequent.com/comparing-leapfrog-radial-basis-function-and-kriging/>. Diakses pada 16 April 2021.

Tabel 1. Perbandingan prinsip RBF dengan metode lainnya (modifikasi dari <https://www.seequent.com/comparing-leapfrog-radial-basis-function-and-kriging/>, 2021).

	Nearest Neighbour	Inverse Distance	Simple Krigging	Ordinary Krigging	RBF
Estimator Type	Local	Local	Local	Local	Global
Spatial Model Type	Strict distance-based function	Distance-based function	Data-driven variogram	Data-driven variogram	Data-driven variogram
Spatial Model Sample Weighting	All weight is given to the nearest point	More weight is given to closer points Often biased down hole (unless declustered)	Based on variogram	Based on variogram	Based on variogram
Extrapolation behaviour	It will always have the value of the nearest point	Dependent on the chosen exponent function	Estimator will drift to the specified mean	Estimator will drift to the search neighbourhood mean	Drift behaviour is chosen: specified mean or automatic

Tabel 2. Format tabel yang dibutuhkan (*mandatory*) oleh *software* Leapfrog™, tabel 2(a); Collar, 2(b); Survey, dan 2(c); Interval/Lithologi.

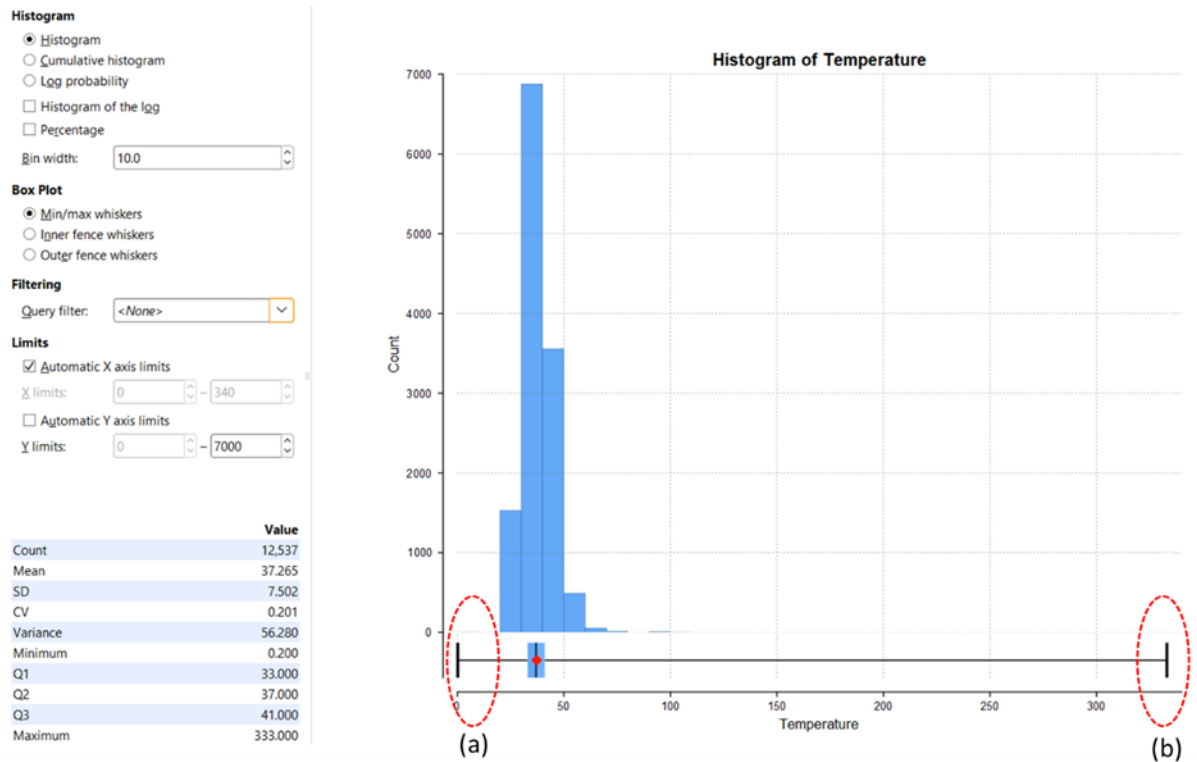
(a)	HOLEID	PROJECTCODE	HOLETYPE	GRIDNAME	EAST	NORTH	RL	DEPTH	KENCANA_CAL_Z	GOS_AZIMUTH_D	GOS_DIP_D	KCN_AZIMUTH_D	KCN_DIP_D
	BRD002	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2160	9639	260	538.4	5260	250.8	-50.2	295.8	-50.2
	NTD001	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2834.718	10444.136	323.338	625.1	5323.338	64.4	-58.9	109.4	-58.9
	NTD002	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2835.034	10443.027	323.308	605.9	5323.308	273.1	-50.7	318.1	-50.7
	NTD051	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	3384	10382	194	710.5	5194	294.9	-60.3	339.9	-60.3
	NTD052	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2834.7	10444.13	323	580.2	5323	96.4	-54.9	141.4	-54.9
	NTD061W	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2835.03	10443.02	323.3	513	5323.3	184.5	-77.8	229.5	-77.8
	NTD065	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2835	10443	323	761.8	5323	225.8	-50.9	270.8	-50.9
	NTD067	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2835	10443	323	498.5	5323	243.4	-73.4	288.4	-73.4
	NTD071	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	2835	10443	323	417.3	5323	255.5	-57.9	300.5	-57.9
	TED008	Gos_Extend	DRILLHOLE	GOSOWONG	3231.806	9273.038	142.834	387.2	5144	84.8	-46.9	129.8	-46.9

(b)	HOLEID	PROJECTCODE	DEPTH	SURVTYPE	AZIMUTH	DIP	PRIORITY	Magnetic_Reading	Temperature
	BRD002	Gos_Extend	18 reflex		250.8	-50.2	1	3897.8	24
	BRD002	Gos_Extend	30 reflex		250.3	-50.8	1	3912.7	24
	BRD002	Gos_Extend	60 reflex		250.6	-50.8	1	3914.8	25
	BRD002	Gos_Extend	90 reflex		250.9	-51	1	3903.3	25
	BRD002	Gos_Extend	120 reflex		250.8	-51.4	1	3888.6	24
	BRD002	Gos_Extend	150 reflex		250.5	-52.1	1	3917.6	25
	BRD002	Gos_Extend	180 reflex		250.3	-52.1	1	3924.2	24
	BRD002	Gos_Extend	210 reflex		250.9	-51.8	1	3969.1	29
	BRD002	Gos_Extend	240 reflex		251.5	-52	1	3911.3	29
	BRD002	Gos_Extend	270 reflex		250.6	-51.2	1	4014.5	28

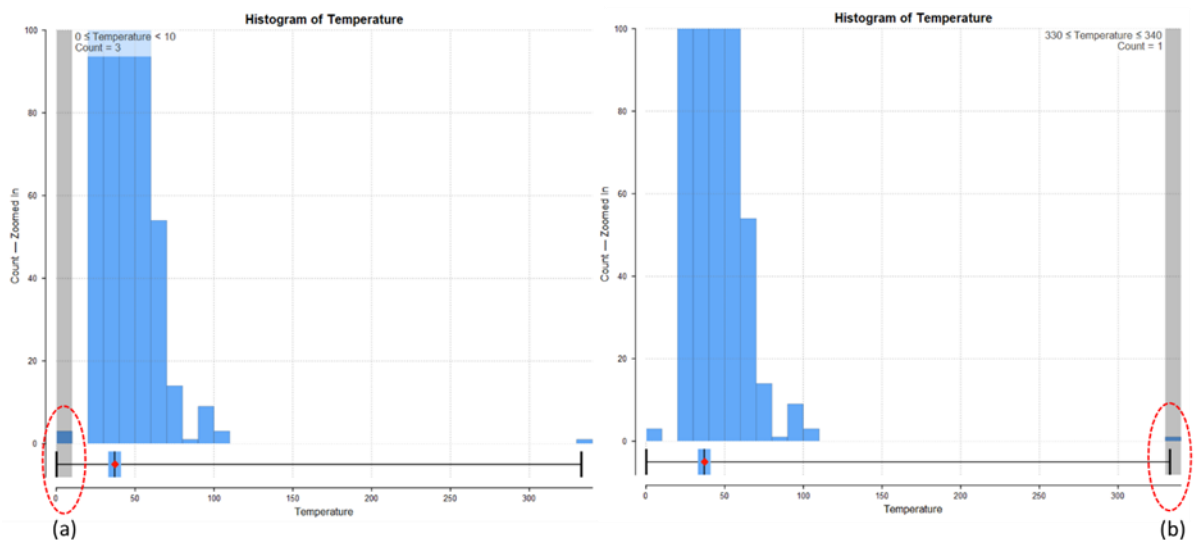
(c)	HOLEID	PROJECTCODE	GEOLFROM	GEOLTO	PRIORITY	Lith1_Code_LT
	BOD068	Toguraci	0	114.7	1	1 Id
	BOD068	Toguraci	114.7	117.4	1	1 Bl
	BOD068	Toguraci	117.4	121.3	1	1 Id
	BOD068	Toguraci	121.3	126.6	1	1 Bl
	BOD068	Toguraci	126.6	131.3	1	1 Id
	BOD068	Toguraci	131.3	137.1	1	1 Bl
	BOD068	Toguraci	137.1	137.6	1	1 Id
	BOD068	Toguraci	137.6	138.9	1	1 Bl
	BOD068	Toguraci	138.9	139.85	1	1 Id
	BOD068	Toguraci	139.85	156.1	1	1 Bl

Tabel 3. Tabel data temperatur dalam bentuk *point data*, sesuai kebutuhan Leapfrog™. HOLEID sebagai kolom kunci yang akan menghubungkan data temperatur ke data *collar* dan *survey*, agar dapat di *plot* secara 3D.

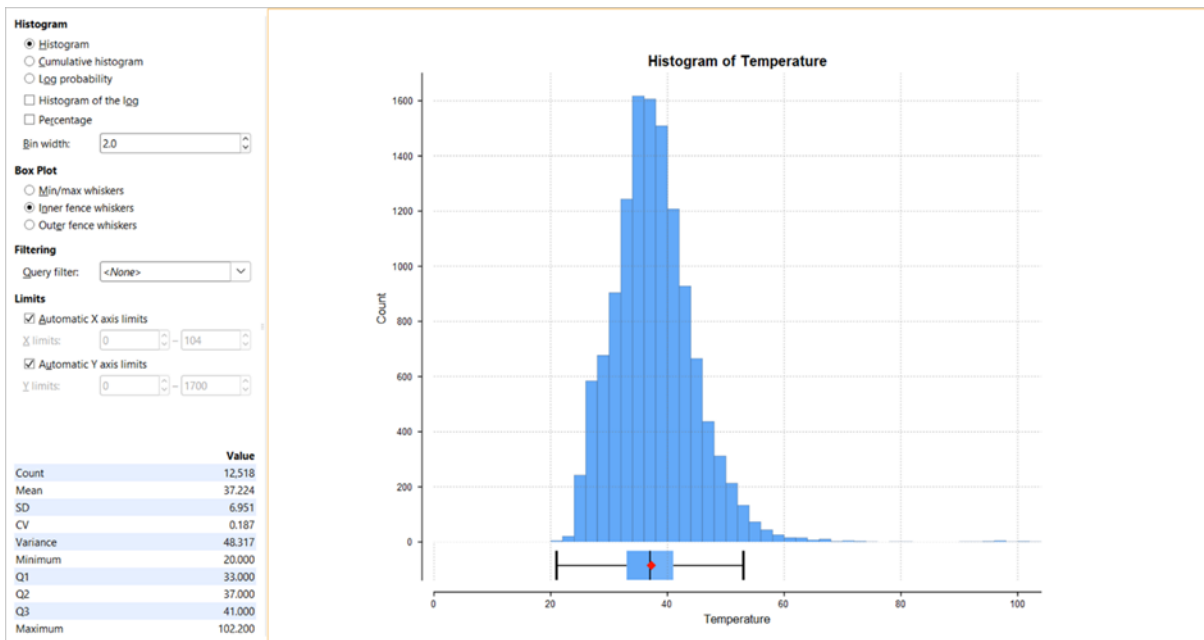
HOLEID	DEPTH	Temperature
BOD068	120	28
BOD068	180	30
BOD068	150	31
BOD068	210	31
BOD068	18	34
BOD068	90	34
BOD068	330	34
BOD068	30	35
BOD068	60	35
BOD068	300	35



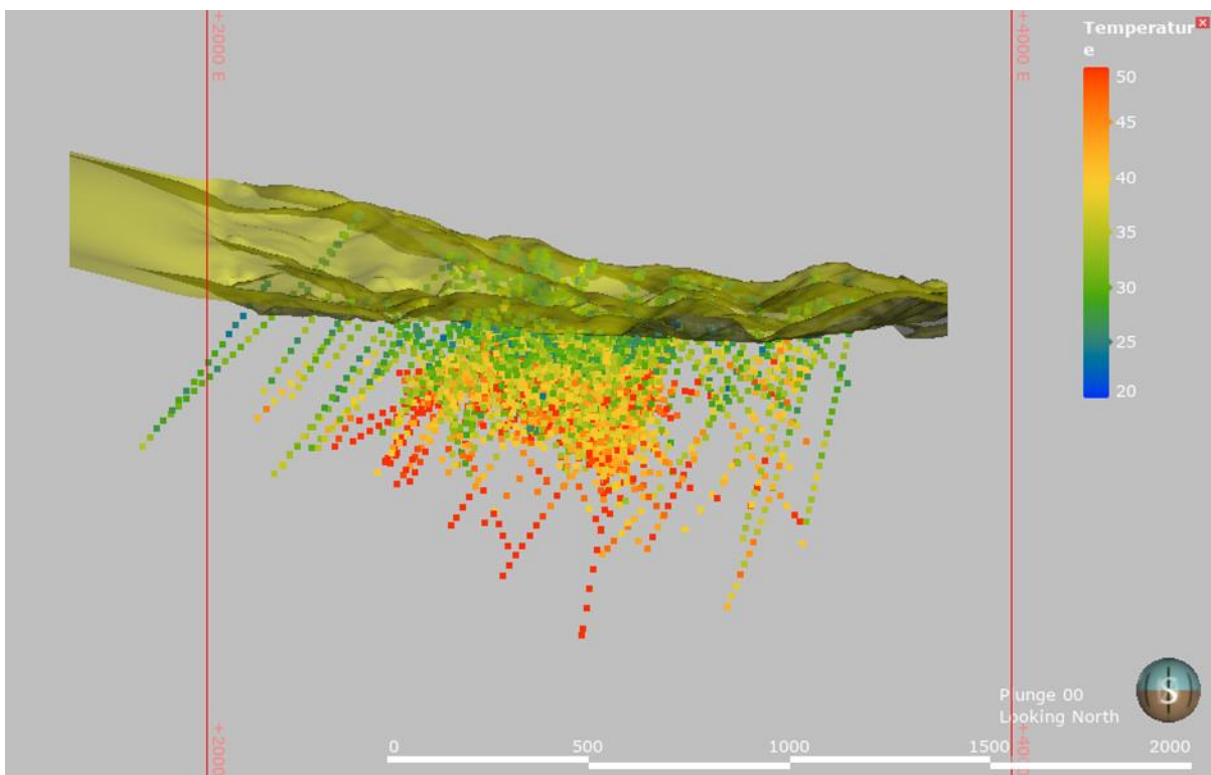
Gambar 1. Histogram data temperatur, memperlihatkan statistik dari seluruh data yang ada (dibuat menggunakan *software* Leapfrog™ versi 5.1).



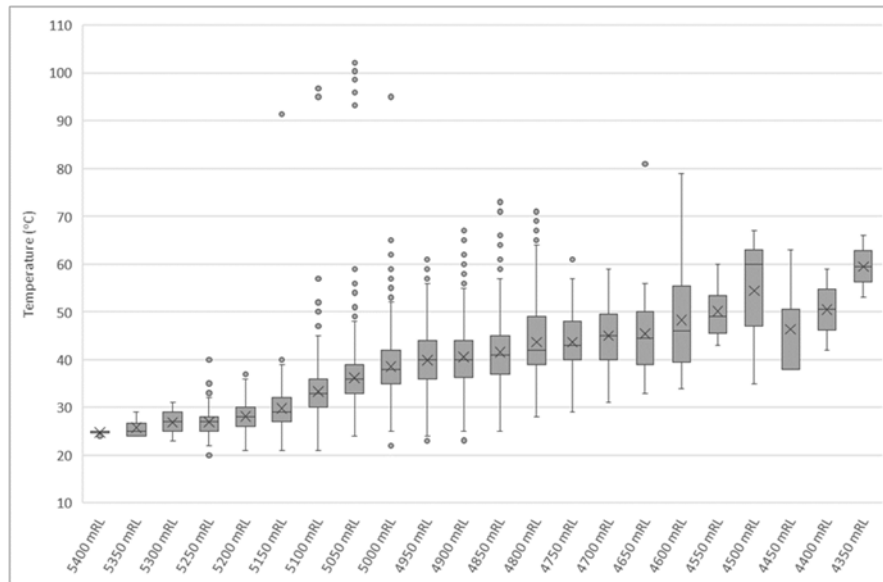
Gambar 2. Histogram data temperatur, memanipulasi interval sumbu Y agar dapat melihat lebih detail pada nilai temperatur yang memiliki frekuensi sangat sedikit. (a) temperatur sangat rendah pada 3 sampel; 0.2 °C, 3 °C, dan 3.4 °C. (b) temperatur sangat tinggi pada 1 sampel; 333 °C (dibuat menggunakan *software* Leapfrog™ versi 5.1).



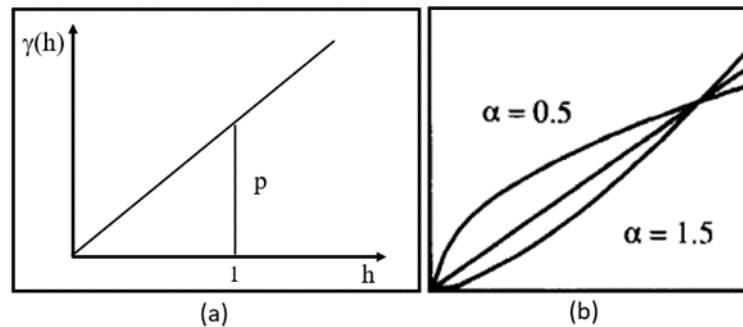
Gambar 3. Histogram data temperatur setelah proses validasi (dibuat menggunakan *software* Leapfrog™ versi 5.1).



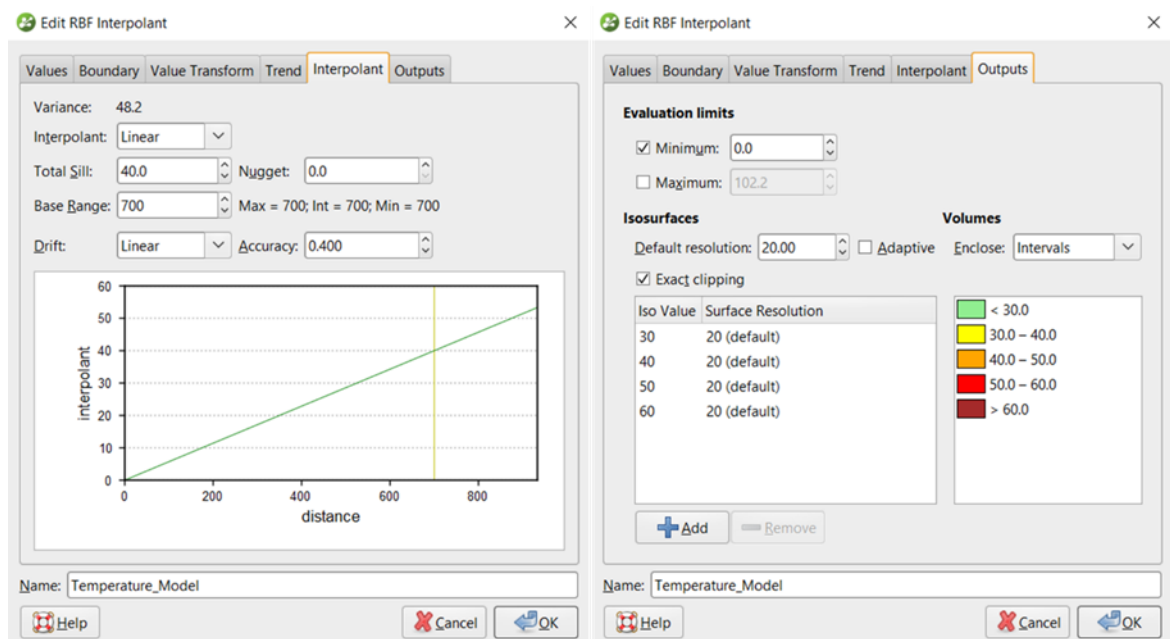
Gambar 4. Penampang menghadap utara (*Looking North*), area toguraci dengan menampilkan semua data temperatur yang telah di plot pada lubang bor (dibuat menggunakan *software* Leapfrog™ versi 5.1).



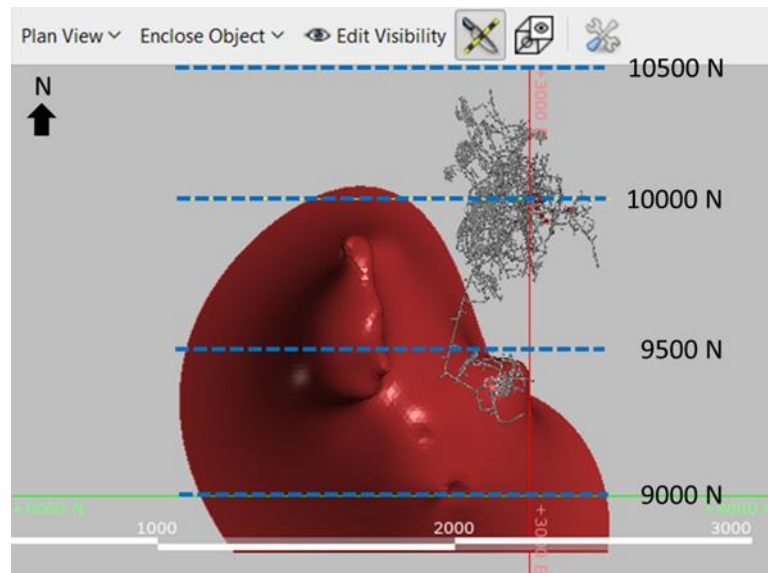
Gambar 5. *Box Plot*, menggambarkan perubahan nilai rata rata temperatur terhadap kedalaman (dibuat menggunakan *microsoft excel* 2016).



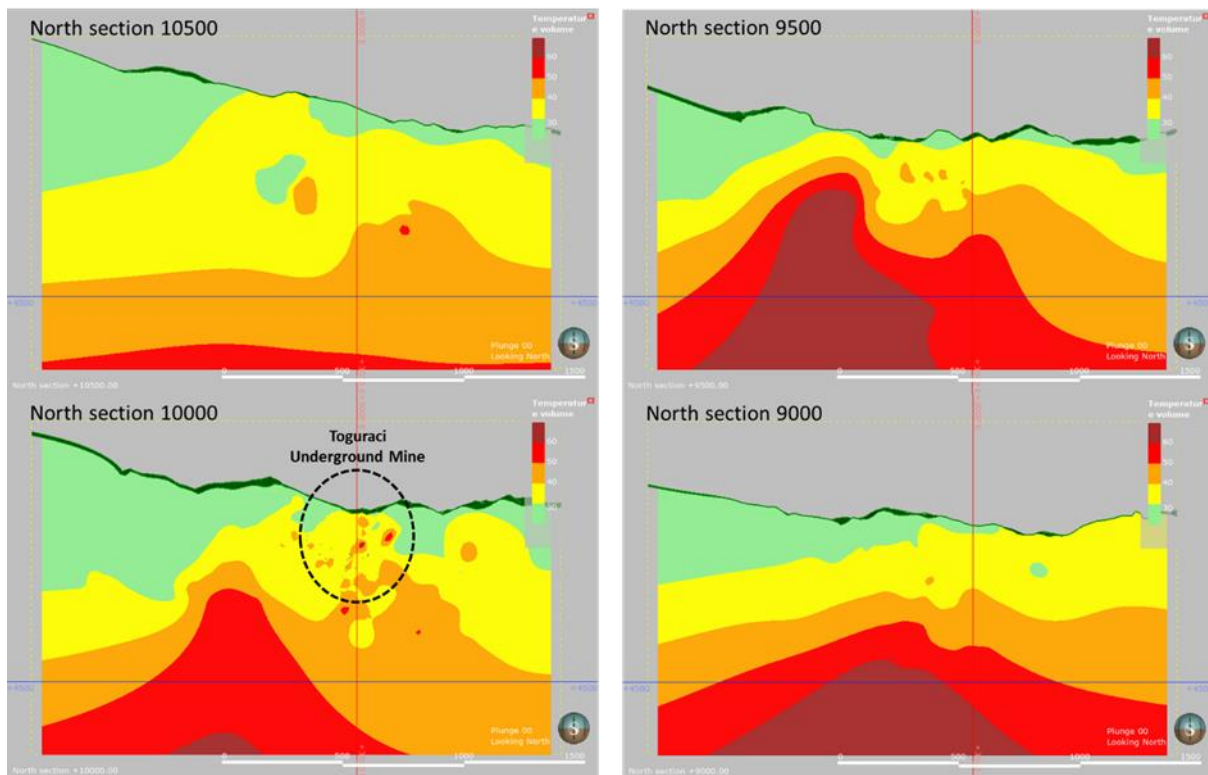
Gambar 6. Penggambaran konsep variogram *unbounded, Linear/Power Model* (modifikasi dari Armstrong, 1998).



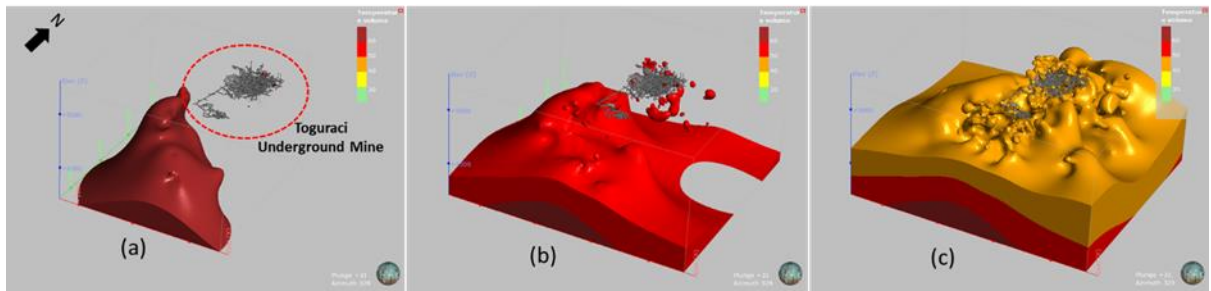
Gambar 7. Pengaturan RBF interpolant pada Leapfrog™, sesuai dengan kebutuhan pemodelan temperatur (Seequent, 2021).



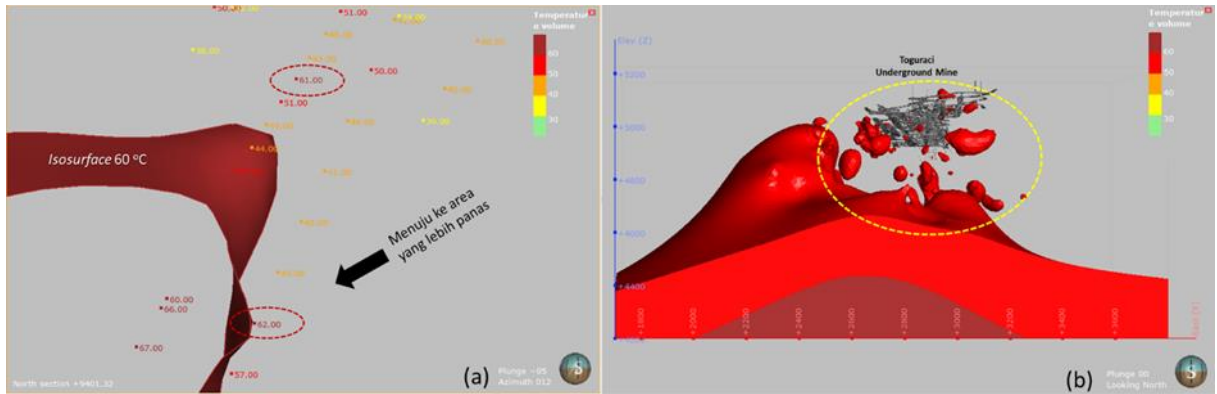
Gambar 8. *Plan view map*, menunjukkan posisi 4 buah garis penampang barat-timur, diurutkan dari selatan ke utara yaitu penampang 9000N, 9500N, 10000N, dan 10500N. *Volume solid (isovalue)* berwarna merah tua menunjukkan area dengan temperatur $\geq 60^{\circ}\text{C}$ (dibuat menggunakan software Leapfrog™ versi 5.1).



Gambar 9. Model temperatur pada 4 penampang menghadap utara (*looking north*), 9000N, 9500N, 10000N, dan 10500N (dibuat menggunakan software Leapfrog™ versi 5.1).



Gambar 10. Visualisasi model temperatur terhadap infrastruktur tambang bawah tanah Toguraci, (a) model *isovalue* temperatur $\geq 60^{\circ}\text{C}$, (b) model *isovalue* temperatur $\geq 50^{\circ}\text{C}$, (c) model *isovalue* temperatur $\geq 40^{\circ}\text{C}$ (dibuat menggunakan software Leapfrog™ versi 5.1).



Gambar 11. (a) Penampang relatif menghadap utara, memperlihatkan 2 data temperatur: 61°C dan 62°C , berada diluar *isovalue* $\geq 60^{\circ}\text{C}$. (b) Penampang menghadap utara, memperlihatkan *volume solid* / *isovalue* $\geq 50^{\circ}\text{C}$ (lingkaran kuning) yang tidak terhubung dengan *volume solid* utama hasil interpolasi, dibutuhkan parameter tambahan agar model lebih realistis.

