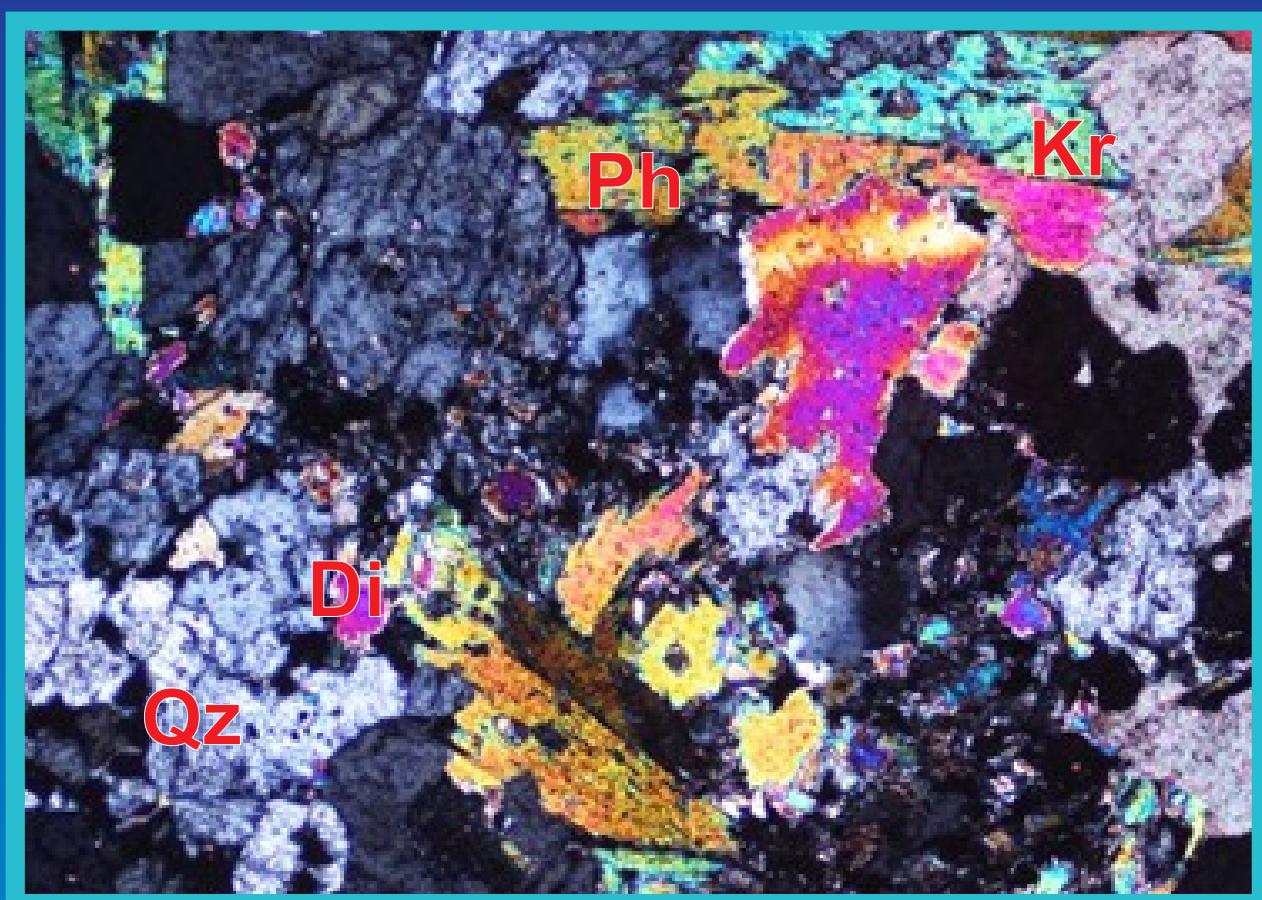


buletin

SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 14 No. 2, Agustus 2019



Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Badan Geologi
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

Buletin Sumber Daya Geologi	Vol. 14	No. 2	Halaman 79 - 155	Bandung Agustus 2019	Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 21/E/KPT/2018
--------------------------------	---------	-------	---------------------	-------------------------	----------------------------------------------------------------------------------

KETERANGAN SAMPUL DEPAN

Fotomikrografi pada Zona Kuarsa - Dolomit di kedalaman 2600 XC 05
di Big Gossan, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua. (Akhmad Fauzan, dkk. 2019)
Keterangan = Di : Diopsid, Qz : Kuarsa. Ph : Flogopit, Kr : Karbonat

buletin

SUMBER DAYA GEOLOGI

ISSN 1907-5367
eISSN 2580-1023

Volume 14 Nomor 2, Agustus 2019

Terakreditasi Kemenristekdikti sebagai Jurnal Ilmiah Nomor : 21/E/KPT/2018

Buletin Sumber Daya Geologi merupakan jurnal ilmiah terakreditasi Kemenristekdikti bidang mineral, energi fosil, dan panas bumi yang berkaitan dengan kajian sumber daya. Majalah ini terbit tiga nomor dalam satu tahun pada bulan Mei, Agustus dan November.

DEWAN REDAKSI

Editor In Chief Ir. Denni Widhiyatna, M.T.

Managing Editor Dra. Ella Dewi Laraswati
Eko Suryanto, S.Kom.
Resmi Novianti, S.T.
Rijal Ahmad Taufik, S.T.
Ernawati, A.Md.

Editorial Board Sumardi, S.T., M.M.
Qomariah, S.Kom., M.T.
Ir. Herry Rodiana Eddy, M.Si.
Ir. Prima Muhamar Hilman, M.Sc.
Ir. Dwi Nugroho Sunuhadi
Ir. Asep Suryana
Ir. Sri Widodo
Ir. Teuku Ishlah
Ir. Bambang Pardiarto
Dr. Siti Sumilah Rita Susilawati, S.T., M.Sc.
Ir. Rina Wahyuningsih
Fatimah, S.T., M.Sc.
Indra Sukmayana, S.T.

Peer-Reviewer Dr. Chairul Nas, M.Sc.
Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DESS.
Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc.
Dr. Eng. Agus Didit Haryanto, Ir., M.T.
Edi Suhanto, S.Si, M.T.

Alamat sekretariat dan pengiriman naskah
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Bagian Tata Usaha
Jl. Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254
Telepon : (022) 520 2698, 522 6270
Fax : (022) 522 6270, 522 6263
Email : buletinpsdg@gmail.com
OJS : <http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>

PENGANTAR REDAKSI

Puji syukur kami panjatkan kepada Allah SWT, karena atas izin-Nya Buletin Sumber Daya Geologi edisi kedua dapat dihadirkan pada Bulan Agustus tahun 2019. Lima artikel yang dimuat membahas hal yang berhubungan dengan mineralisasi dan alterasi cebakan mineral logam di dua lokasi berbeda, aplikasi geostatistik untuk estimasi potensi energi panas bumi di Cekungan Sumatera Tengah, pemanfaatan data magnetotellurik inversi 2D dan 3D dalam penyelidikan panas bumi dan penggunaan metode ordinary point kriging dalam penambangan batubara untuk memperoleh informasi besarnya sumber daya dan cadangan batubara.

Artikel pertama berupa kajian tentang kondisi geologi dan karakteristik bijih di Martabe pada salah satu lokasi tambangnya yaitu Ramba Joring, pembaca akan mengenal lebih rinci beragam alterasi dan mineral-mineral yang hadir pada daerah yang memiliki kandungan emas tersebut.

Selanjutnya hadir artikel yang mengulas kondisi geologi daerah Big Gosan yang merupakan salah satu lokasi tambang emas di Mimika, Papua. Artikel ini menguraikan secara rinci jenis-jenis alterasi dan mineralisasi yang hadir pada kedalaman 2600 mdpl dan 2640 mdpl dari data bor yang didukung oleh conto-conto sayatan tipis yang menarik dengan hasil deskripsi menggunakan mikroskop.

Kajian tentang panas bumi hadir dalam dua artikel. Artikel kesatu berupa ulasan tentang pengolahan data hasil pengeboran dalam untuk memperoleh informasi potensi panas bumi dalam sebuah sistem cekungan. Artikel kedua berupa pemanfaatan metode magnetotellurik inversi 2-D dan 3-D pada daerah panas bumi sehingga dapat memberikan hasil delineasi area prospek yang lebih jelas.

Artikel terakhir berhubungan dengan pemanfaatan sebuah aplikasi open source dengan metode statistik *ordinary point kriging* dalam suatu pertambangan batubara. Metode ini diaplikasikan untuk mengestimasi nilai kualitas batubara yang tidak diambil contohnya diantara beberapa contoh yg telah dianalisis, sehingga dapat memberikan estimasi nilai yang cepat, lebih mudah dan akurat.

Dewan Redaksi mengucapkan terimakasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada para Penulis, Editor dan Mitra Bestari atas partisipasinya dalam menghadirkan Buletin edisi ini. Ucapan terima kasih disampaikan juga kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi dan pihak manajemen yang telah memfasilitasi pengelolaan Buletin Sumber Daya Geologi sehingga dapat hadir diantara para pembaca hingga tahun ke-14. Semoga kehadiran Buletin Sumber Daya Geologi ini dapat menambah wawasan dan pengetahuan untuk para pembaca dalam bidang ilmu kebumian.

Salam hangat,

Dewan Redaksi

DAFTAR ISI

MAKALAH ILMIAH

- 79 - 95 **GEOLOGI DAN KARAKTERISTIK BIJIH PIT RAMBA JORING DEPOSIT MARTABE, SUMATERA UTARA**
GEOLGY AND ORE CHARACTERISTIC OF RAMBA JORING PIT MARTABE DEPOSIT, NORTH SUMATRA
Oleh : Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSSA
- 97 - 112 **ALTERASI DAN MINERALISASI CEBAKAN BIG GOSSAN KABUPATEN MIMIKA, PROVINSI PAPUA**
ALTERATION AND MINERALIZATION BIG GOSSAN DEPOSIT MIMIKA REGENCY, PAPUA PROVINCE
Oleh : Akhmad Fauzan, Mega F. Rosana, Euis T. Yuningsih, Dwie H. Saputra, dan Fernandy Meiriyanto
- 113 - 125 **APPLIED GEOSTATISTICS TO THE ASSESSMENT OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) IN CENTRAL SUMATRA BASIN**
APLIKASI GEOSTATISTIK UNTUK PENILAIAN POTENSI ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) DI CEKUNGAN SUMATERA TENGAH
Oleh : Josua Washington Sihotang and Syaiful Alam
- 127 - 141 **PREDIKSI NILAI FIXED CARBON SEBAGAI VARIABEL DALAM KUALITAS BATUBARA DENGAN METODA ORDINARY POINT KRIGING MENGGUNAKAN APLIKASI R**
FIXED CARBON ESTIMATION AS VARIABLES IN COAL QUALITY BY MEANS ORDINARY POINT KRIGING METHOD USING R PROGRAMMING
Oleh : Budi Nurani Ruchjana, Annisa Nur Falah, Endang Rusyaman, dan Nur Hamid
- 143 - 155 **PEMODELAN INVERSI 2-D DAN 3-D MENGGUNAKAN DATA MAGNETOTELURIK DAERAH PANAS BUMI MASSEPE KABUPATEN SIDENRENG RAPPANG, PROVINSI SULAWESI SELATAN**
2-D AND 3-D INVERSION MODELLING USING MAGNETOTELLURIC DATA AT MASSEPE GEOTHERMAL AREA, SIDENRENG RAPPANG REGENCY, SOUTH SULAWESI PROVINCE
Oleh : Wiwid Joni dan Rina Wahyuningsih

ABSTRAK MAKALAH

Oleh : Redaksi

GALERI FOTO

Oleh : Eko Suryanto, S.Kom

PEDOMAN PENULISAN KARYA ILMIAH

Oleh : Redaksi

GEOLOGI DAN KARAKTERISTIK BIJIH PIT RAMBA JORING DEPOSIT MARTABE, SUMATERA UTARA

GEOLOGY AND ORE CHARACTERISTIC OF RAMBA JORING PIT MARTABE DEPOSIT, NORTH SUMATRA

Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSSA

Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung

asri15008@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Deposit Ramba Joring merupakan bagian dari wilayah Kontrak Karya (KK) pertambangan umum PT Agincourt Resources yang terletak di Kelurahan Aek Pining, Kecamatan Batangtoru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Provinsi Sumatera Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi geologi meliputi geomorfologi, stratigrafi dan struktur geologi serta karakteristik bijih yang mengandung emas-perak pada deposit Ramba Joring. Penelitian dilakukan pada 44 lubang bor dan 15 coto permukaan. Penelitian menggunakan metode analisis petrografi sayatan tipis dan poles, *Analytical Spectral Devices* (ASD), *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive* (SEM EDS) serta pengolahan statistik data geokimia assay berupa nilai kadar kandungan Au, Ag, Cu, SxS (*sulfide sulphur*) yang didapatkan melalui analisis *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS). Daerah penelitian tersusun oleh litologi, diurutkan dari tua ke muda, berupa satuan andesit hornblende dan breksi polimikt-monomit. Satuan batuan andesit hornblende dan breksi polimikt-monomit teralterasi kuat oleh empat jenis alterasi yaitu, silisifikasi (kuarsa-kalsedon-alunit-kaolinit±dikit), argilik lanjut (alunit±kuarsa-kaolinit±dikit-pirofilit), argilik (illite±smektit-alunit-kaolinit-kuarsa) dan propilitik (klorit-epidot-kalsit). Terdapat enam jenis mineral sulfida pada daerah penelitian, paragenesa dimulai dari pirit, enargit, tennantit, tetrahedrit dan kovelit bersamaan dengan pengendapan emas-perak serta pirit dengan kristal berbentuk sempurna yang terbentuk paling akhir. Hasil uji pada data assay geokimia menunjukkan adanya korelasi antara kandungan unsur Au, Ag, Cu dan SxS (*sulfide sulphur*) terhadap jenis alterasi. Diketahui bahwa mineralisasi emas dan logam lainnya berasosiasi dengan mineral sulfida yang melimpah pada alterasi silisifikasi namun semakin berkurang pada jenis alterasi argilik hingga menghilang pada alterasi propilitik.

Kata kunci: Martabe, Sulfidasi Tinggi, Paragenesis Sulfida, *Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive* (SEM EDS), *Analytical Spectral Devices* (ASD)

ABSTRACT

*Ramba Joring deposit is located in Aek Pining Village, Batangtoru Sub-district, South Tapanuli Regency, North Sumatra, in the Contract of Work (CoW) area which belongs to PT Agincourt Resources. The study aimed to understand the geology, including geomorphology, stratigraphy, structural geology and ore characteristic contain gold- silver of Ramba Joring deposit. The study was conducted on 44 drill holes and 15 surface samples. This research used petrographic analysis on both thin and polished section, Analytical Spectral Devices (ASD), Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive (SEM EDS) and statistical data processing of geochemical assay of Au, Ag, Cu, SxS (*sulfide sulphur*) concentration derived from Atomic Absorption Spectrometry (AAS). The study area consist two lithologic units, from oldest to youngest, hornblende andesite unit, and polymict-monomict breccia unit. The hornblende andesite and polymict-monomict breccia rock unit is pervasively altered by four types of alterations; silicification (quartz-chalcedony-alunite-kaolinite±dickite), advanced argillic (alunite±quartz-kaolinite±dickite-pyrophillite), argilic (illite±smectite-alunite-kaolinite-*

quartz) and propilitic (chlorite-epidote-calcite). There are six types of sulphide minerals in the study area, the paragenesis sorted from earlier to the latest formed, are pyrite, enargite, tennantite, tetrahedrite, covellite along with the deposition of gold-silver and well crystallize pyrite. The test results on geochemical assay data showed a correlation between Au, Ag, Cu and SxS (sulfide sulphur) content on alteration types. It is known that gold and other metals associated with abundant sulfide minerals in silicification alteration but decreased in argillic and then disappear to propylitic alteration types.

Keywords: Martabe, High sulphidation, Sulfide Paragenesis, Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive (SEM EDS), Analytical Spectral Devices (ASD).

PENDAHULUAN

Daerah pertambangan PT Agincourt Resources (Martabe) terletak pada Busur Vulkanik Sumatera berumur Kenozoikum yang perpanjangannya membentuk Busur Sunda-Banda di sebelah baratlaut sepanjang 1.600 km. Zona subduksi di sekitar Lempeng Samudera Hindia sepanjang busur tersebut mempengaruhi terbentuknya sesar regional, aktifitas seismik dan aktifitas vulkanik lainnya. Sistem Sesar Sumatera (*Sumatran Fault System*) membentang sepanjang Pulau Sumatera dan berada kurang lebih 10 km dari wilayah Martabe, di sebelah timur membentuk *pull a part graben* yang terisi oleh endapan volkano-sedimen terlitifikasi yang terdiri dari lapisan batupasir, batulanau, batulempung karbonan serta aliran lava andesitik (Sutopo et al, 2013) Aktifitas tektonik diperkirakan merupakan penyebab terbentuknya endapan hidrotermal, *multi phase magmatic*, pembentukan breksi freatik dan freatomagmatik serta deposit emas Martabe. Deposit emas Martabe sebagian besar terletak pada bagian atas dari kubah porfiri dasit-andesit serta kompleks *diatreme* dan kontak dengan endapan volkano-sedimen di bagian timur hingga selatan wilayah pertambangan Martabe.

Deposit Ramba Joring merupakan salah satu deposit pada wilayah pertambangan Martabe. Litologi yang ditemukan pada deposit ini terdiri dari satuan andesit hornblende dengan keterdapatannya urat kuarsa secara setempat-setempat dan satuan batuan breksi polimik-monomik.

Alterasi di daerah penelitian dibagi menjadi 4 zona berdasarkan karakteristik alterasi yang diketahui dari analisis tekstur batuan, pengamatan petrografi serta analisis ASD. Zona alterasi dicirikan dengan tekstur breksiasi dan silika masif diikuti dengan tekstur *vuggy-residual quartz* di bagian luar dari zona silisifikasi, zona argilik lanjut ditandai dengan kehadiran mineral kuarsa-dikit-kaolinit yang dikelilingi oleh zona argilik dengan kelimpahan mineral ilit-smektit dan di bagian luar terdapat zona propilitik yang dicirikan dengan kehadiran mineral klorit-smektit-karbonat. Mineralisasi pada deposit Ramba Joring mengalami perubahan seiring dengan pertambahan kedalaman begitu juga dengan tingkat oksidasi yang secara signifikan mengalami perubahan. Zona oksidasi dan transisi mineralisasi mengalami perubahan menjadi mineralisasi sulfida terdiri dari mineral enargit-luzonit-kovalit-pirit yang ditemukan pada urat kuarsa dan *open spaces/vug* pada deposit Ramba Joring. Berdasarkan studi oleh Sutopo et al, (2013) alterasi dan mineralisasi yang berlangsung berumur 2,0 s.d. 3,3 Ma berdasarkan *dating* radioaktif unsur K-Ar pada mineral alunit hipogen.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi geologi dan menentukan karakteristik bijih yang berasal dari deposit Ramba Joring. Penelitian ini dilakukan pada deposit *Pit* dengan skala 1: 10.000. Pemetaan geologi dilakukan untuk mengetahui kondisi geologi permukaan daerah penelitian. *Logging* batuan dilakukan pada contoh batuan inti yang berasal dari pengeboran *diamond core*.

LOKASI PENELITIAN

Tambang emas Martabe berada di bagian selatan Provinsi Sumatera Utara, terletak pada Kecamatan Batangtoru, Tapanuli Selatan (Gambar 1). Tambang emas ini memiliki beberapa deposit, salah satunya adalah deposit Ramba Joring yang mulai ditambang sejak awal 2018. Deposit ini memiliki tipe epitermal sulfidasi tinggi (Sutopo *et al.*, 2013) dengan tubuh mineralisasi berbentuk sub-vertikal dan berasosiasi dengan batuan breksi freatik-freatomagmatik sepanjang patahan yang berarah relatif utara sampai timurlaut.

METODE PENELITIAN

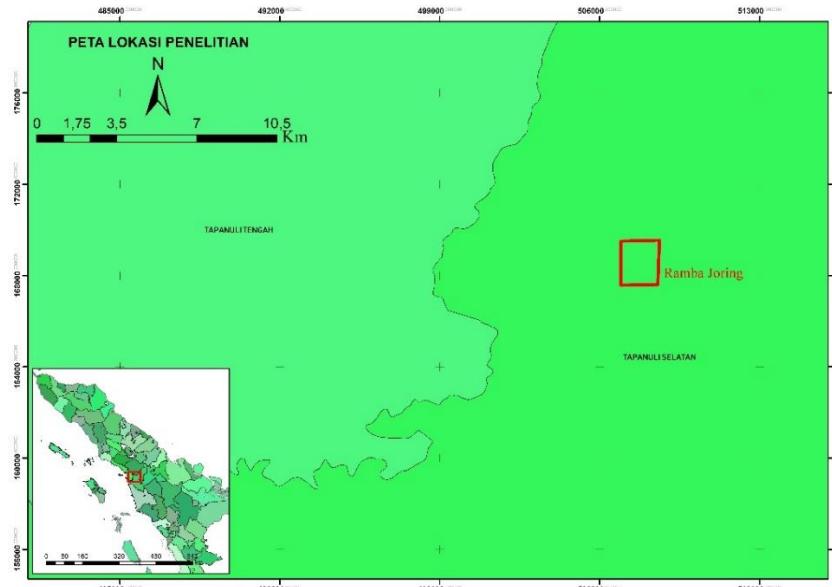
Penelitian dilakukan dengan pengambilan conto permukaan dan bawah permukaan. Conto permukaan berukuran *hand specimen* dikumpulkan melalui pemetaan lapangan, sedangkan conto bawah permukaan diambil dari 44 titik bor dan sebanyak 17 conto permukaan pada elevasi yang berbeda-beda. Analisis geokimia menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrometry* dilakukan pada keseluruhan conto, pengujian dilakukan oleh Intertek dan SGS Laboratory sedangkan analisis petrografi dan minerografi dilakukan pada Laboratorium Tekmira dan Laboratorium Universitas Padjadjaran, analisis ASD dilakukan pada Laboratorium Departemen

Eksplorasi PT Agincourt Resources sedangkan analisis *SEM EDS Mapping* dilakukan pada Laboratorium Tekmira untuk sejumlah conto batuan terpilih dengan karakteristik litologi dan alterasi yang berbeda-beda

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geomorfologi Daerah Penelitian

Analisis terhadap geomorfologi daerah penelitian dengan memperhatikan morfologi khas dan kontur daerah penelitian. Geomorfologi *Pit* Ramba Joring dicirikan dengan ketinggian yang relatif curam yaitu sekitar 670 meter s.d. 680 meter di atas permukaan laut dengan pola perbukitan yang memanjang ke arah utara – utara timurlaut. Morfologi Ramba Joring ditandai dengan ketinggian puncak yang tidak teratur dan relatif sirkular yang relatif lebih rendah daripada kedua puncak yang berada di bagian utara dan selatan barat daya, selain itu morfologi deposit Ramba Joring dengan topografi yang lebih tinggi daripada area di sekitarnya mengindikasikan bahwa daerah penelitian termasuk kedalam suatu perbukitan intrusi, kontrol struktur yang kuat berarah relatif utarabaratlaut memisahkan daerah penelitian yang terjal dengan bagian depresi yang lebih rendah di sebelah barat daerah penelitian.



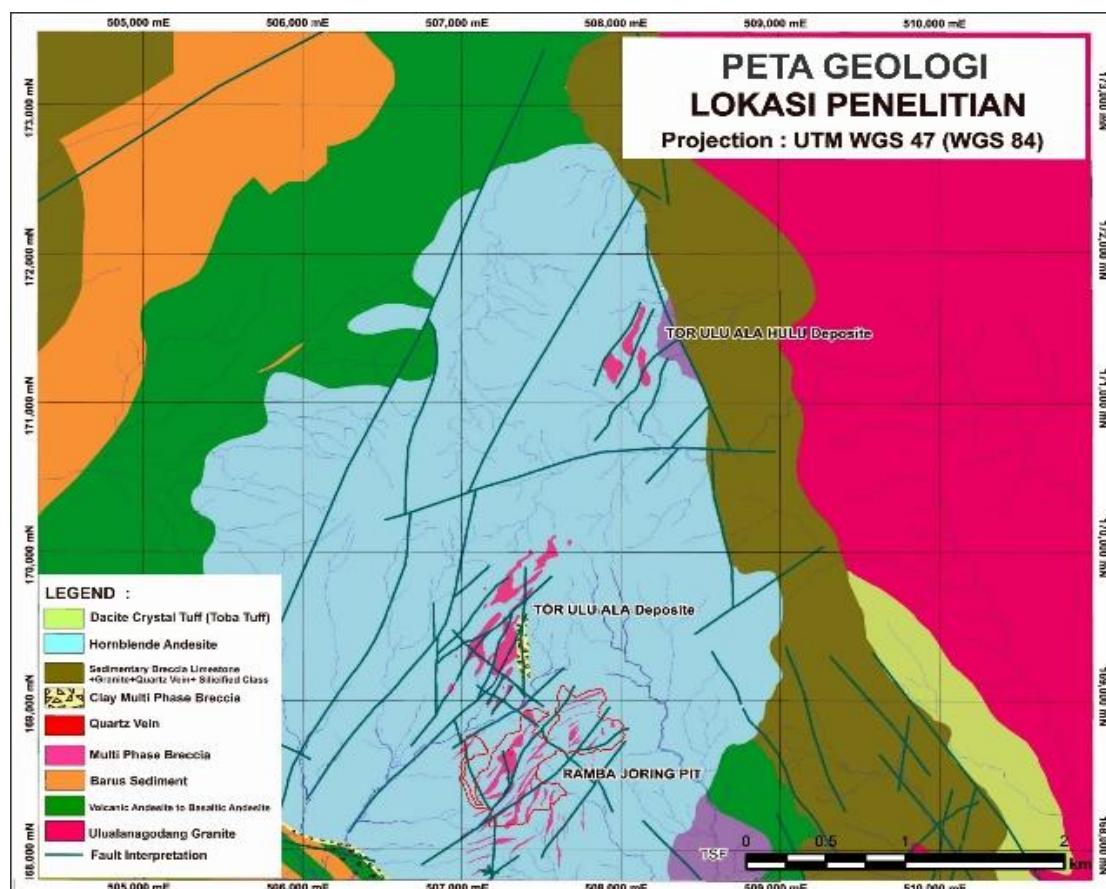
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Analisis geomorfologi dengan persentase kelerengan menunjukkan bahwa pada bagian timur hingga utara daerah penelitian memiliki persen kelerengan rata-rata sebesar 18%, pada bagian selatan rata-rata sebesar 13% dan pada bagian barat memiliki persen kelerengan rata-rata sebesar 5%-7%, yang menunjukkan bahwa daerah paling utara merupakan daerah yang lebih tinggi dan relatif curam. Pola aliran sungai sebagian besar menunjukkan pola *rectangular* hingga *trellis*. Berdasarkan pada analisis terhadap unsur-unsur geomorfologi, daerah penelitian termasuk ke dalam bentang alam struktural-denudasional.

Struktur Geologi Daerah Penelitian

Indikasi struktur geologi dapat dilihat dari foto udara, citra satelit, hasil pengukuran dan pengamatan lapangan. Struktur regional yang berkembang di Pulau Sumatera mempengaruhi struktur lokal di daerah penelitian (Davies, 2002). Terdapat

dua arah orientasi struktur yang bekerja khususnya pada deposit *Pit* Ramba Joring, struktur berorientasi relatif utara sampai timurlaut - selatan baratdaya dan struktur yang berarah utara hingga barat laut - tenggara. Struktur dengan arah orientasi utara hingga timurlaut merupakan perpanjangan dari struktur yang bekerja pada area lain di wilayah Tambang Emas Martabe, dengan pengayaan mineralisasi searah dengan struktur yang berorientasi arah ini. Struktur dengan arah orientasi utara sampai barat laut hingga tenggara searah dengan struktur regional Pulau Sumatera. Meski kandungan mineralisasi tidak sebanyak dengan struktur utara sampai timurlaut, namun struktur ini memisahkan area termineralisasi dengan area yang tidak termineralisasi. Topografi daerah penelitian menunjukkan bahwa kontrol struktur ini memisahkan *Pit* Ramba Joring dengan *graben* di sisi sebelah barat dan lembah di sebelah utara daerah penelitian.



Gambar 2. Peta geologi tambang emas Martabe dengan interpretasi struktur oleh PT Agincourt 2017 (dimodifikasi dari Apsden *et al*, 1982a; 2002)

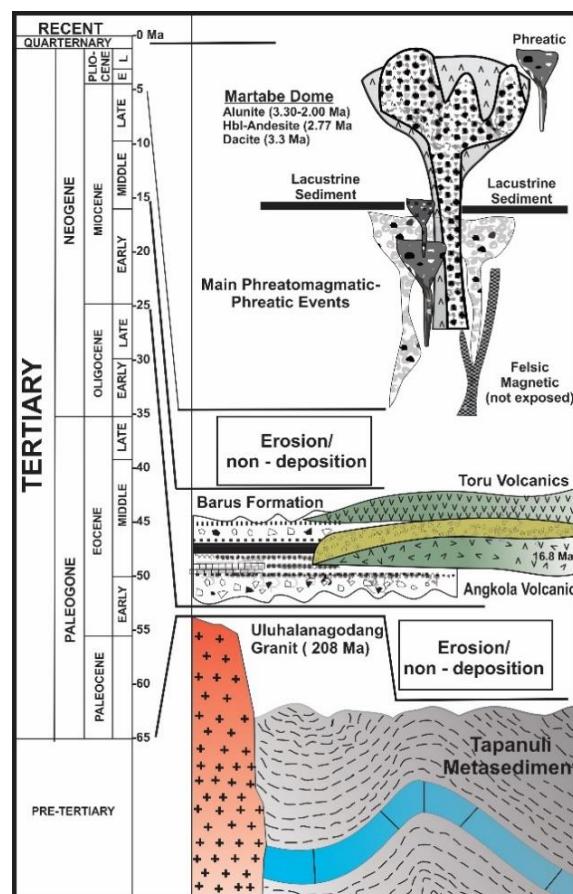
Stratigrafi Daerah Penelitian

Satuan batuan yang terdapat di daerah penelitian didominasi oleh batuan andesit hornblende yang tersebar hampir meliputi 60 persen daerah penelitian, setempat-setempat di jumpai batuan breksi polimik-monomik yang terhampar pada arah utara-utara timurlaut mengikuti struktur yang berkembang di daerah penelitian (Gambar 2). Penentuan jenis batuan dilakukan berdasarkan pengamatan secara makroskopis didukung dengan pengamatan petrografis sayatan tipis pada beberapa conto batuan inti dan conto *hand specimen*.

Batuan andesit hornblende, secara mikroskopik umumnya memiliki warna abu-abu putih/kehijauan – abu-abu kekuningan, tekstur porfiritik, *inequigranular*, allotriomorfik-hipidiomorfik. Batuan tersusun atas mineral plagioklas ($\pm 20\%$), mineral hornblende (< 10%), kuarsa sekunder (< 5%) dengan bentuk kristal *granular* dan membentuk struktur *mosaic* serta massa dasar batuan yang terdiri atas mineral dengan ukuran yang halus (> 60%). Sebagian besar mineral-mineral yang terdapat pada massa batuan telah mengalami ubahan sedang hingga ubahan kuat, setempat-setempat juga ditemukan batuan dengan urat kuarsa dan sebagian kalsedon dengan tekstur *colloform-crustiform* serta *massive banded*. Batuan breksi polimik-monomik memiliki warna abu-abu hingga kekuningan/kecoklatan memiliki umur lebih muda daripada batuan andesit hornblende. Hal ini diketahui dari matrik batuan breksi yang sebagian merupakan batuan andesit hornblende, batulanau dan batulempung tersilisifikasi kuat. Fragmen batuan berukuran antara 0,5 mm s.d. 70 cm, bentuk relatif menyudut, dijumpai tekstur *wispy*. Matriks berupa pasiran halus dengan kemas terbuka, sortasi buruk dan mengalami ubahan kuat.

Berdasarkan Sutopo (2013), satuan andesit hornblende disebandingkan dengan satuan andesit hornblende (Tpia), yang merupakan bagian dari kompleks *dome/intrusi* Martabe (Gambar 3). Satuan ini terbentuk akibat intrusi dari tubuh magma dengan komposisi

andesitik yang kemudian diterobos oleh satuan breksi polimik-monomik freatik-freatomagmatik. Sedangkan batuan breksi polimik-monomik ini termasuk ke dalam *multiphase breccia* freatik-freatomagmatik dengan umur yang relatif lebih muda daripada satuan batuan andesit hornblende.



Gambar 3. Sejarah Geologi Daerah Martabe dimodifikasi dari Sutopo (2013), dan De Smet et al, (2005)

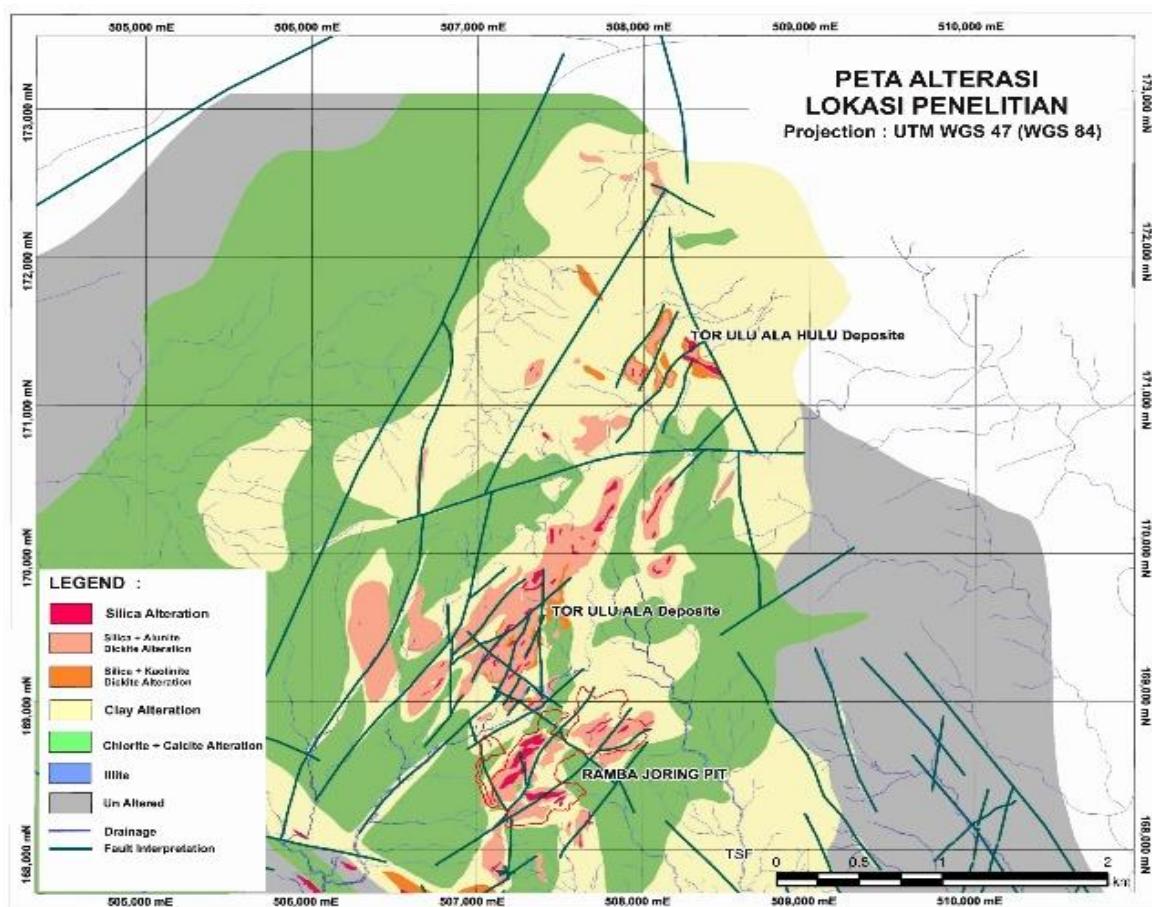
Zonasi Alterasi Daerah Penelitian

Zona alterasi yang berkembang pada daerah penelitian (Gambar 4) berupa alterasi silisifikasi yang terdapat di bagian tengah dari zona ubahan dengan tekstur masif dan *brecciated* yang mengalami silisifikasi kuat. Mineral yang umum didapatkan adalah mineral kuarsa-kalsedon-alunit dengan kelimpahan mineral sulfida. Di bagian luar dari zona silisifikasi terdapat zona alterasi argilik lanjut dengan kehadiran mineral kuarsa-alunit, kuarsa-dikit dan kuarsa-kaolinit±dikit dengan tekstur

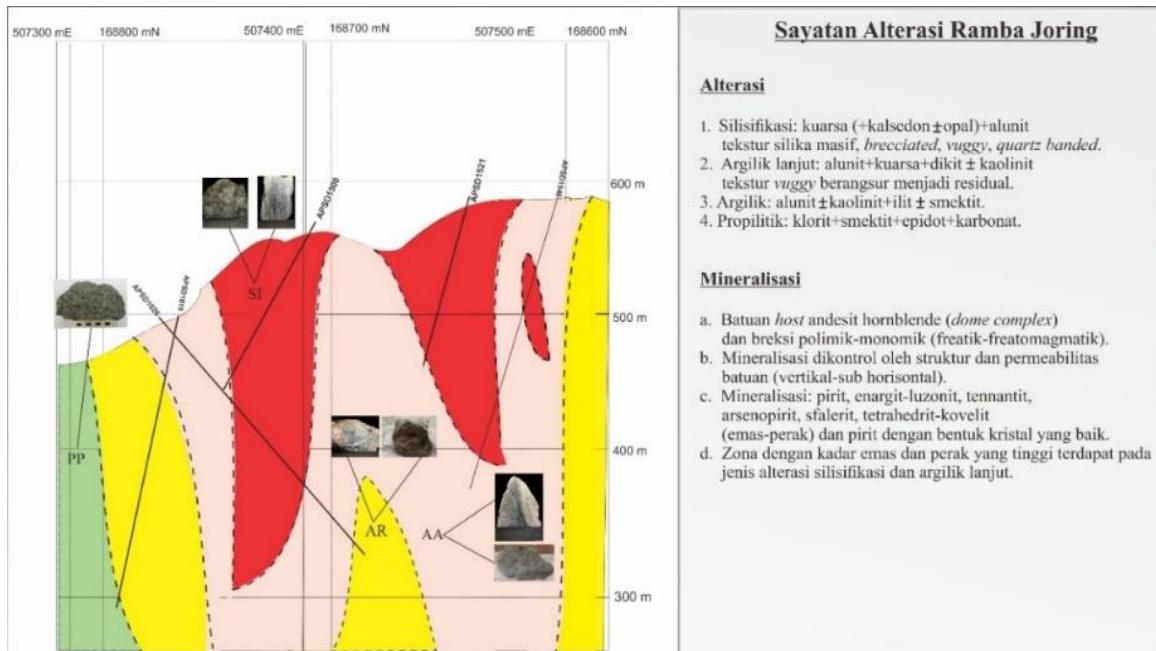
vuggy yang secara *gradual* berubah menjadi tekstur *residual* yang dikelilingi oleh kumpulan mineral kuarsa-ilit-smektit yang merupakan zona argilik di bagian luar dari argilik lanjut. Zona alterasi yang terdapat pada bagian luar dari zona ubahan ini adalah zona alterasi propilitik dengan kehadiran kelompok mineral klorit+smektit+epidot+karbonat (Gambar 5).

Beberapa mineral ubahan yang terdapat pada daerah penelitian berdasarkan analisis petrografi, ASD dan SEM-EDS, antara lain:

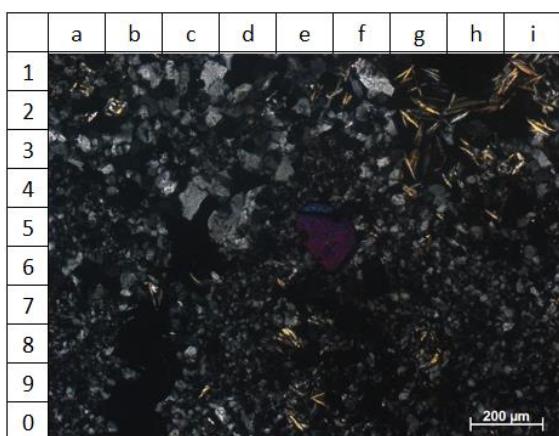
- Mineral kuarsa, opal dan kalsedon
Mineral kuarsa yang terdapat di daerah penelitian merupakan mineral kuarsa sekunder yang terbentuk pada temperatur dan *pH* rendah (Stoffregen, 1987). Kuarsa banyak terdapat pada alterasi silisifikasi dan argilik lanjut. Opal terbentuk pada temperatur rendah kurang dari 100 °C pada fluida yang kaya silika dengan *pH* rendah hingga hampir netral (Corbett dan Leach, 1998), umum dijumpai di sekitar daerah *hot spring* namun tetap dapat terbentuk pada semua kondisi geologi (Hedenquist *et al*, 1998). Kalsedon terbentuk pada kondisi yang jenuh dengan silika pada temperatur 100 °C s.d. 200 °C (Henley, 1983), terdapat pada alterasi silisifikasi pada *vein* atau *veinlets*.
- Mineral alunit
Terbentuk pada kondisi *steam-heated* sebagai akibat dari oksidasi larutan asam sulfat dengan *pH* rendah membentuk alunit dengan bentuk *pseudo cubic* dan tabular. Alunit terisi pada rekahan, mengganti fragmen dan matrik batuan atau lubang *vug* pada batuan. Alunit ditemukan pada alterasi silisifikasi, namun melimpah pada alterasi argilik lanjut.
- Mineral kaolinit±dikit dan pirofilit
Terbentuk pada *pH* rendah (*pH* < 4) biasa dijumpai bersama dengan alunit pada *pH* 3-4. Kaolinit±dikit terbentuk pada kedalaman yang relatif dangkal yaitu pada kedalaman 0-300 m dengan temperatur <150°C-200°C sedangkan pirofilit terbentuk pada temperatur yang lebih tinggi yaitu 200 °C s.d. 250 °C dan pada kedalaman yang tinggi, akan tetapi pada kondisi konsentrasi silika melebihi kelarutan kuarsa, pirofilit dapat terbentuk pada temperatur yang lebih rendah dari 150 °C. Mineral kaolinit±dikit dan pirofilit terdapat pada alterasi argilik lanjut dan kadang dijumpai sebagai *patches* pada alterasi silisifikasi yang mengindikasikan adanya zona lokal yang memiliki permeabilitas rendah yang terhindar dari proses pencucian oleh larutan asam (Prajono, 2009).
- Mineral ilit-smektit
Terbentuk pada *pH* 4-6, pada *pH* 5 sering berasosiasi dengan kaolinit (Prajono, 2009). Ilit terbentuk pada temperatur 200 °C s.d. 250 °C, sedangkan smektit terbentuk pada temperatur < 100 °C s.d. 150 °C, kedua jenis mineral terdapat pada jenis alterasi argilik, akan tetapi smektit lebih banyak terdapat pada alterasi argilik bertemperatur rendah (Thompson *et al*, 1996), kedua mineral juga terdapat dalam jenis alterasi argilik lanjut dengan persentase yang lebih sedikit.
- Kelompok mineral klorit-ilit-epidot-karbonat
Terbentuk pada *pH* 5-6 mendekati netral, klorit berasosiasi dengan kelompok mineral ilit-smektit dan karbonat pada kedalaman sekitar 300 m s.d. 800 m dengan temperatur pembentukan yang lebih rendah. Mineral epidot dan karbonat mengindikasikan komposisi fluida yang lebih netral hingga basa serta rendahnya kandungan gas CO dalam fluida selama proses pemanasan (Hedenquist *et al*, 1998).



Gambar 4. Peta zonasi alterasi Tambang Emas Martabe dan daerah penelitian (dimodifikasi dari Apsden *et al*, 1982a; 2002 dan diupdate oleh PT Agincourt Resources, 2017)



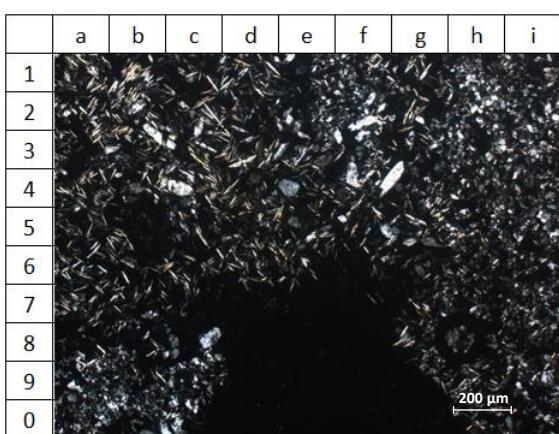
Gambar 5. Model alterasi daerah penelitian berdasarkan interpretasi batuan inti menurut konsep epitermal sulfida tinggi oleh Hedenquist *et.al*(1998)



Gambar 6. Fotomikrograf sayatan tipis dengan perbesaran 200 μm

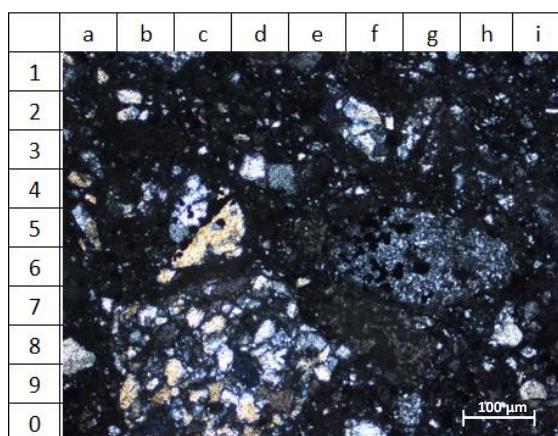
Ket.: alunit= g1-g2, mineral opak=b8-b9, kuarsa=c1-c2, rutil=e5, mineral oksida besi= g9.

Sayatan batuan pada Gambar 6 berasal dari titik bor APSD 1031 dengan kedalaman 50,8 m s.d. 51,8 m dan sayatan batuan (Gambar 7) berasal dari titik bor APSD 1550 dengan kedalaman 63,1 m s.d. 64 m, ditempati batuan andesitik hornblende dengan kehadiran mineral kuarsa sekunder bertekstur *mosaic* yang terlihat mengisi rekahan sedangkan mineral alunit berbentuk tabular menjarum tersebar di tubuh batuan, terkadang dijumpai pada bagian tepi dari suatu mineral lempung atau pada bagian luar suatu zona *vuggy silica*. Mineral rutil terdapat dalam jumlah yang tidak signifikan namun konsisten terdapat dalam conto batuan.



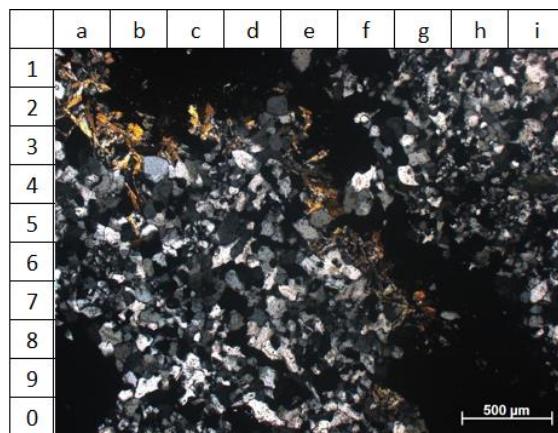
Gambar 7. Fotomikrograf sayatan tipis dengan perbesaran 200 μm

Ket.: alunit= b1, mineral lempung= h1, mineral opak= h3, kuarsa= e4, vug= rongga= e8-e9.



Gambar 8. Fotomikrograf sayatan tipis dengan perbesaran 100 μm

Ket: alunit= f2, mineral lempung= f7-f8, mineral opak= f6-g6, kuarsa= d8.



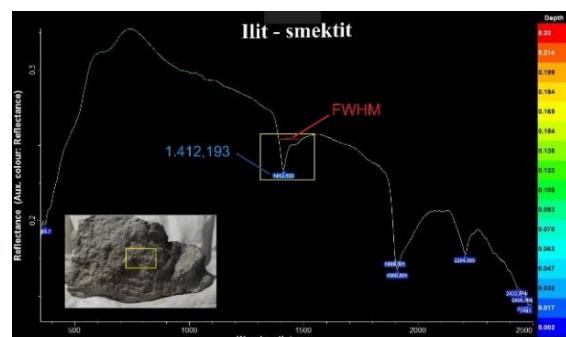
Gambar 9. Fotomikrograf sayatan tipis dengan perbesaran 500 μm

Ket.: alunit= a1-a2, mineral opak= f6-g6, kuarsa= d5-d6, vug= a8-a0.

Sayatan batuan (Gambar 8) berasal dari titik bor APSD 1026 dengan kedalaman 120 m s.d. 121 m sedangkan sayatan batuan (Gambar 9) berasal dari titik bor APSD 1521 pada kedalaman 50,4 m s.d. 51,2 m. Keduanya ditempati jenis batuan breksi polimik-monomik freatik-freatomagmatik yang ditandai dengan fragmen batuan yang telah mengalami ubahan kuat oleh jenis mineral lempung (illit ?). Pada keseluruhan conto batuan terdapat fenokris mineral opak yang sebagian terlihat memiliki bentuk euhedral-anhedral pada rekahan batuan dalam celah batuan/vug maupun tersebar pada tubuh batuan. Identifikasi terhadap jenis mineral lempung seperti illit, dikit dan pirofilit serta jenis mineral silika seperti kuarsa, kalsedon

dan opal juga dilakukan menggunakan analisis ASD.

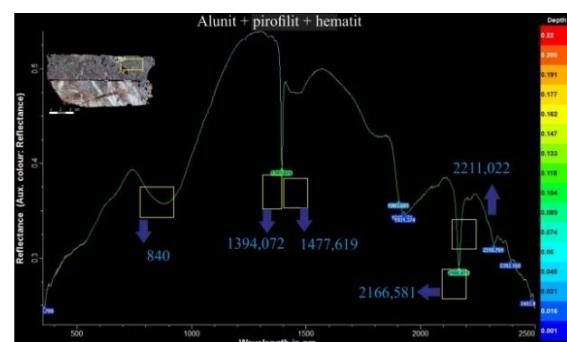
Secara megaskopis batuan telah mengalami ubahan dengan indikasi alterasi argilik berwarna abu-abu keputihan dengan tekstur batuan *sugary*, analisis ASD menunjukkan karakteristik panjang gelombang mineral ilit-smektit yang mengalami *interlayer* satu sama lain dengan puncak gelombang minima 1.412,193 μm . Jenis mineral ilit-smektit memiliki rentang puncak minima pada 1.404 μm s.d. 1.415 μm , selain itu penentuan jenis mineral ilit-smektit diketahui dari kenampakan garis *full width at half maximum (FWHM)* yang memiliki rentang pendek dan tidak simetris antara kedua minima, hal ini berarti mineral yang diamati memiliki kristalinitas yang sulit dibedakan antara jenis mineral ilit $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ atau smektit $[\text{Na}_{0,2}\text{Ca}_{0,1}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_{10}]$. Batuan termasuk ke dalam jenis alterasi argilik (Gambar 10).



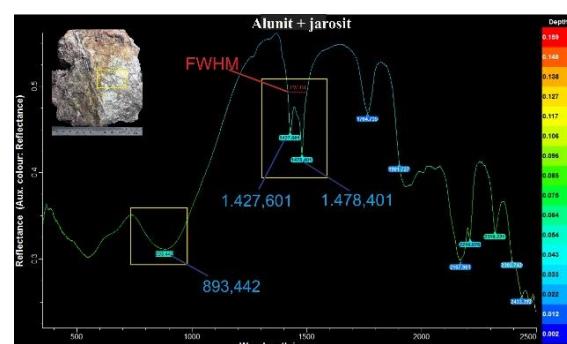
Gambar 10. Spektrum pembacaan ilit-smektit pada jenis batuan alterasi argilik

Secara megaskopis batuan termasuk kedalam alterasi argilik lanjut-argilik, contoh batuan berwarna abu-abu keputihan dengan tekstur *silica vuggy*. Analisis ASD menunjukkan kehadiran alunit $[\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ dengan nilai spektrum 1.477,619 μm sementara nilai ASD mineral ini berada pada rentang gelombang 1.425 μm s.d. 1.439 μm dan 1.478 μm s.d. 1.495 μm serta 2.168 μm s.d. 2.173 μm dan 2.205 μm s.d. 2.208 μm bentuk kristal yang cukup baik yang ditunjukkan dengan rentang *FWHM* yang pendek antara kedua minima. Hematit berada pada nilai 840 μm , untuk

rentang gelombang hematit (Fe_2O_3) berada pada nilai 745 μm s.d. 862 μm . Pirofilit $[\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$ memiliki nilai spektrum 2.166,581 μm , sementara nilai spektrum ASD untuk mineral ini berada pada rentang 1.392 μm s.d. 1.396 μm dan 2.166 μm s.d. 2.168 μm (Gambar 11).



Gambar 11. Spektrum pembacaan mineral alunit, pirofilit dan hematit pada batuan argilik



Gambar 12. Spektrum pembacaan mineral alunit serta jarosit

Batuan berwarna abu-abu kecoklatan yang memperlihatkan adanya tekstur *wispy* dan urat kuarsa. Berdasarkan analisis ASD, di sekitar mineral silika dan jarosit $\text{KFe}^{3+}_3(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2$ juga terdapat mineral alunit $[\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$ dengan bentuk kristal yang cukup baik yang ditunjukkan dengan rentang *FWHM* yang pendek antara kedua minima. Mineral alunit diidentifikasi memiliki gelombang *doublet* pada nilai gelombang ASD 1.427,601 μm s.d. 1.478,401 μm , nilai ASD mineral ini berada pada rentang gelombang 1.425 μm s.d. 1.439 μm serta 2.205 μm s.d. 2.208 μm (Hauff, 2004). Batuan termasuk ke dalam alterasi argilik lanjut (Gambar 12).

Zona mineralisasi yang berkembang pada daerah penelitian berdasarkan hasil interpretasi dikontrol oleh struktur yang berarah utara sampai timurlaut - selatan baratdaya dan merupakan buaan akibat struktur utama Sesar Sumatera berarah utara sampai baratlaut - tenggara (Davies, 2002). Tahapan mineralisasi yang berlangsung pada daerah penelitian dibagi menjadi beberapa tahapan yang berbeda:

- **Tahap pra-sulfidasi**

Sulfidasi dari mineral pembawa besi (Fe) oleh fluida hidrotermal (*vapor phase*) sehingga membentuk mineral pirit yang hadir berikatan dengan unsur sulfur yang terdapat di batuan. Pirit berukuran halus dan membentuk klaster yang berbentuk *prismatic-hexagonal* atau juga hadir tersebar merata pada batuan sebagai mineral aksesoris hasil sulfidasi.

- **Tahap mineralisasi Au**

Larutan fluida magmatik yang kaya akan logam mengendapkan mineral enargit, tennantit, tetrahedrit, kovelit, pirit dan emas yang mengisi *vuggy*. Berdasarkan pengamatan mikroskopis sebagian enargit terbentuk lebih dahulu yang diikuti dengan pembentukan pirit, mineral tetrahedrit, sfalerit maupun kovelit, demikian pula dengan butiran emas yang berukuran sub mikron dan terikat di dalam mineral sulfida seperti pirit, enargit dan tetrahedrit (Sutopo et al, 2013 dan Saing et al, 2016).

Pirit yang hadir pada tepi celah batuan *vug*, rekahan maupun yang tersebar secara klaster yang menunjukkan bentuk dan karakteristik yang berbeda-beda mengindikasikan tahapan pembentukan pirit yang berbeda-beda pula.

- **Tahap post mineralisasi Au**

Fase akhir dari aktifitas hidrotermal, membentuk pirit dengan bentuk kristal yang baik dan sempurna, yang mengindikasikan proses pendinginan berlangsung lambat atau pada suhu

pembentukan yang relatif stabil sehingga kristalisasi berlangsung dengan baik.

Jenis mineral sulfida yang hadir pada daerah penelitian diketahui melalui pengamatan makroskopis dan analisis minerografi sayatan poles dan analisis SEM-EDS. Pemilihan conto untuk analisis minerografi sayatan poles berdasarkan pada hasil analisis *Atomic Absorption Spectrometry* (AAS) yaitu dengan menggunakan nilai kandungan Au > 0,6 ppm sebagai batas bawah nilai ekonomis material bijih penambangan.

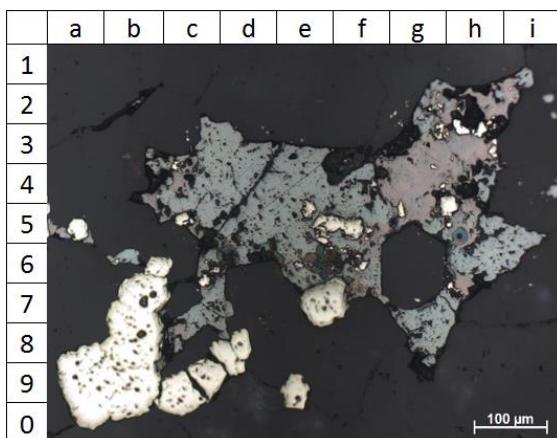
Analisis minerografi dilakukan pada 25 conto sayatan poles bertujuan untuk mengkonfirmasi keberadaan mineral-mineral sulfida dan teksturnya secara mikroskopik sehingga pendekatan terhadap paragenesa mineral sulfida dapat dilakukan.

Identifikasi terhadap mineral sulfida dan oksida yang ditemukan melalui pengamatan terhadap sayatan conto batuan, antara lain:

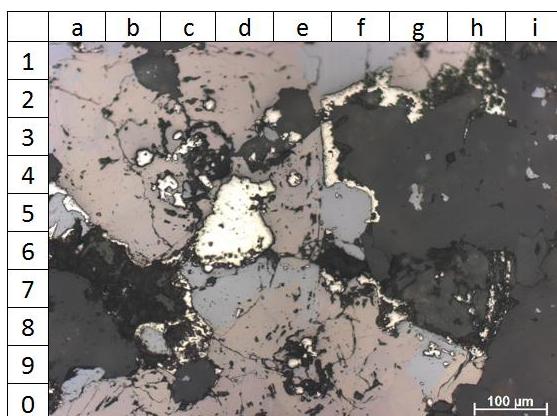
- **Pirit (FeS_2)**; secara umum berwarna kuning hingga krem pucat, memiliki relief tinggi, berukuran antara 0,005 mm s.d. 0,2 mm, isotropik, daya pantul kuat, bentuk kubik kristalin, mengisi rekahan dan dijumpai sebagai butiran tunggal yang tersebar, selain memiliki bentuk kristal kubik yang baik, pirit di sebagian conto menunjukkan tekstur *broken* dan diganti menjadi mineral lainnya (Gambar 13).

- **Enargit-luzonit (Cu_3AsS_4)**; berwarna abu-abu kecoklatan hingga kemerahan, relief sedang, daya pantul lemah-sedang, bireflektan sedang, berukuran 0,02 mm s.d. 0,35 mm, anisotropik kuat, menunjukkan tekstur *intergrowth*, dijumpai sebagai butiran tunggal maupun berikatan dengan pirit dan tetrahedrit (Gambar 14).

- Tetrahedrit $[(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}]$; berwarna abu-abu kebiruan, daya pantul lemah-sedang, relief sedang, berukuran 0,02 mm s.d. 0,5 mm, isotropik, dijumpai berikatan dengan pirit dan enargit-luzonit serta mengisi rongga-rongga pada pirit atau mineral silikat (Gambar 13).



Gambar 13. Fotomikrograf sayatan poles
Ket.: enargit-luzonit = g3-g4, pirit= b8-b0, td= tetrahedrit= c4-e4, kovelit= d6.

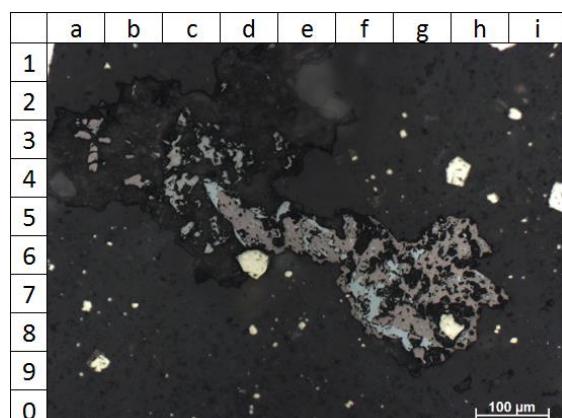


Gambar 14. Fotomikrograf sayatan poles
Ket.: anatas= g4-g5, enargit= f5 luzonit= f8-f0 , pirit= d4-d5, kovelit= d5-e5.

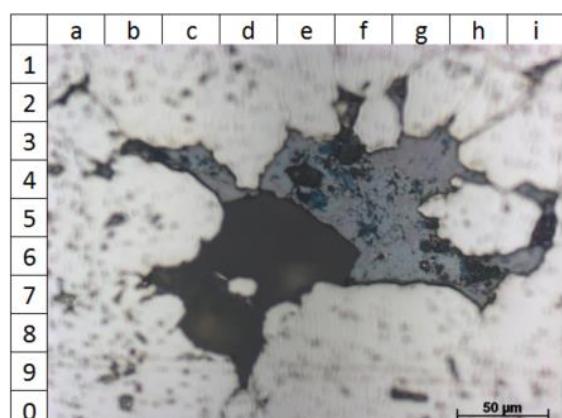
- Kovelit (CuS); warna biru, relief rendah, berukuran <0,01 mm, anisotropik kuat, daya pantul sedang, dijumpai menggantikan tetrahedrit (Gambar 16).
- Famatinit (Cu_3SbS_4); berwarna merah muda kecoklatan, relief sedang, daya pantul lemah-sedang, bireflektan

sedang, anisotropik kuat, berukuran 0,01 mm s.d. 0,4 mm, dijumpai sebagai butiran tunggal maupun berikatan dengan pirit (Gambar 15).

- Stibnit (Sb_2S_3); berwarna abu-abu terang, relief rendah, daya pantul sedang, berukuran 0,006 mm s.d. 0,07 mm, anisotropik kuat, menunjukkan tekstur *intergrowth* dengan famatinit (Gambar 15).

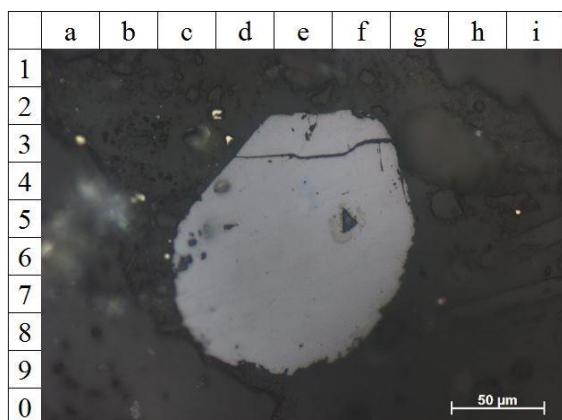


Gambar 15. Fotomikrograf sayatan poles
Ket.: pirit= d6, stibnit= f7, g8, famatinit= d5.



Gambar 16. Fotomikrograf sayatan poles
Ket.: enargit-luzonit= g3-g4, pirit= a1-i1, tetrahedrit= g6, i6, kovelit= e5, f4.

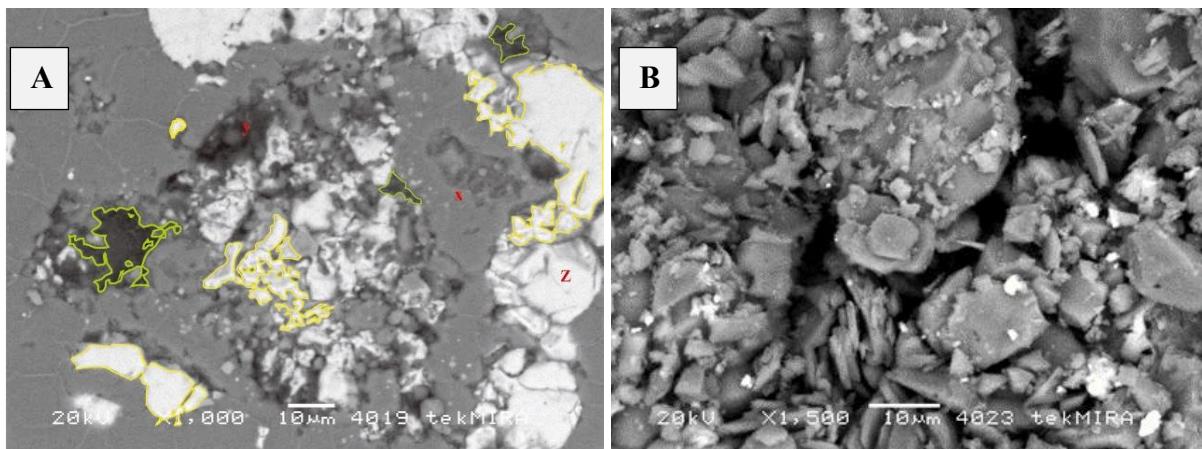
- Tennantit $[(\text{Cu},\text{Fe})_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}]$; abu-abu kecoklatan agak kebiruan, relief sedang, berukuran 0,01 mm s.d 0,11 mm, isotropik, dijumpai sebagai butiran tunggal (Gambar 17).



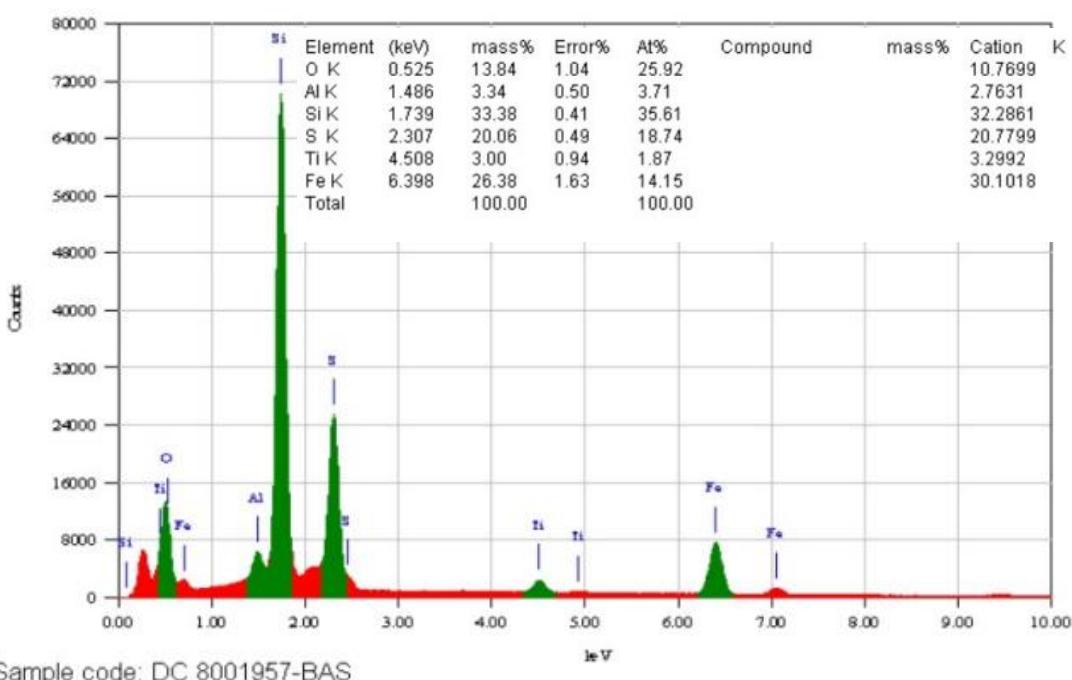
Gambar 17. Fotomikrograf sayatan poles
Ket.: inklusi kovelit dan pirit pada enargit c6, f5, pirit= a3, tennantit= e4 (*solid solution* berwarna kebiruan), inklusi kovelit dan pirit dalam rekahan= d3-f3).

Pengujian SEM dilakukan dengan JEOL JED-2200 Series yang dilengkapi dengan perangkat *Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS)* untuk analisis komposisi kimia. Analisis ini dikerjakan pada Laboratorium Tekmira dan Laboratorium Universitas Padjadjaran, Bandung. Penggunaan mikroskop elektron mengkonfirmasi jenis mineral alterasi, sulfida dan mineral oksida dalam batuan yang terdapat pada daerah penelitian, selain itu tekstur dan karakter fisik dari mineral dapat diamati lebih baik.

Analisis SEM-EDS, untuk conto sayatan dengan nomor conto D.8001957 yang berasal dari titik bor APSD 1673 diambil dari kedalaman 22 m s.d. 23 m (Gambar 18A dan 18B) menunjukkan mineral pirit yang diperlihatkan dengan struktur permukaan pada garis kuning (z) berwarna abu-abu terang berbentuk prismatic kubik dan sebagian berbentuk *irregular* di dalam celah/vug atau pada *veinlet* dengan ukuran yang lebih besar. Penentuan jenis mineral didasarkan pada grafik spektrum EDS dengan presipitasi X-Ray yang menunjukkan persentase kandungan unsur mineral yang terdapat dalam conto batuan (Gambar 19). Mineral pirit terindikasi dari hasil presipitasi x-ray untuk kandungan Fe sebesar 26,38% dan S sebesar 20,06%, sedangkan indikasi mineral alunit pada garis hijau (y) terindikasi dari nilai presipitasi X-Ray untuk O sebesar 13,84% dan Al sebesar 3,34% sementara untuk mineral yang ditunjukkan dengan kode x terindikasi sebagai kuarsa yang memperlihatkan struktur *mosaic* serta memiliki nilai presipitasi untuk kandungan Si sebesar 33,38%. Struktur mikro pada (Gambar 18b) memperlihatkan mineral kuarsa berbentuk prismatic sedangkan alunit berbentuk tabular yang mengambang diatas kuarsa.



Gambar 18 Struktur permukaan perbesaran conto 1000x menunjukkan mineral pirit (z), alunit (y) dan kuarsa (x) (A). Struktur mikro pada perbesaran conto 1500x (B)



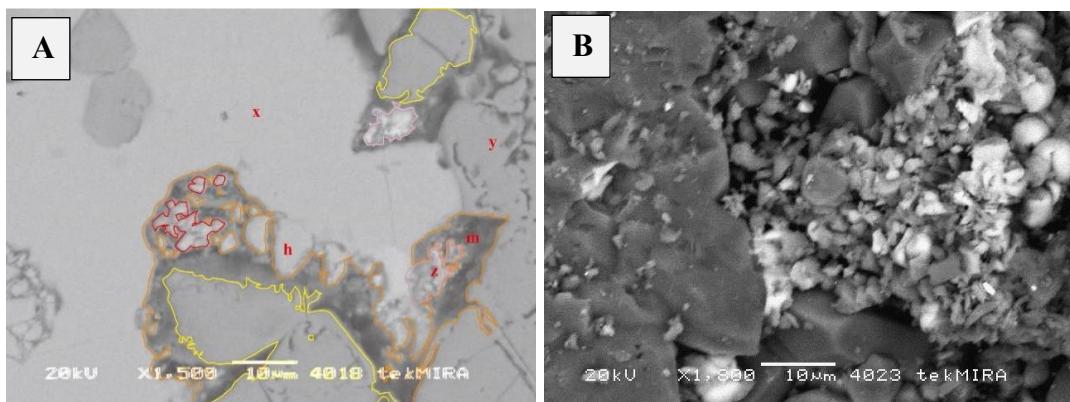
Gambar 19. Grafik EDS conto D.8001957 dengan spektrum presipitasi X-Ray serta persentase unsur yang terdapat dalam conto batuan

Hasil analisis SEM-EDS, untuk conto sayatan dengan nomor conto D.1674052 yang berasal dari titik bor APSD 1521 diambil dari kedalaman 92 m s.d. 93 m (Gambar 20A dan 20B), menunjukkan mineral berwarna abu-abu gelap dengan bentuk kristal kubik dan di beberapa bagian memiliki tekstur *broken* adalah mineral pirit pada garis kuning (z), mineral enargit-luzonit (x) memiliki warna abu-abu terang dengan struktur *smooth* dan terdapat adanya inklusi kristal pirit di dalamnya. Perak pada lingkaran berwarna magenta (z) dan tennantit pada lingkaran merah (h) terdapat diantara pirit serta enargit-luzonit namun dikelilingi oleh mineral hematit yang terdapat di sekitar mineral atau terlihat di dalam rekahan batuan.

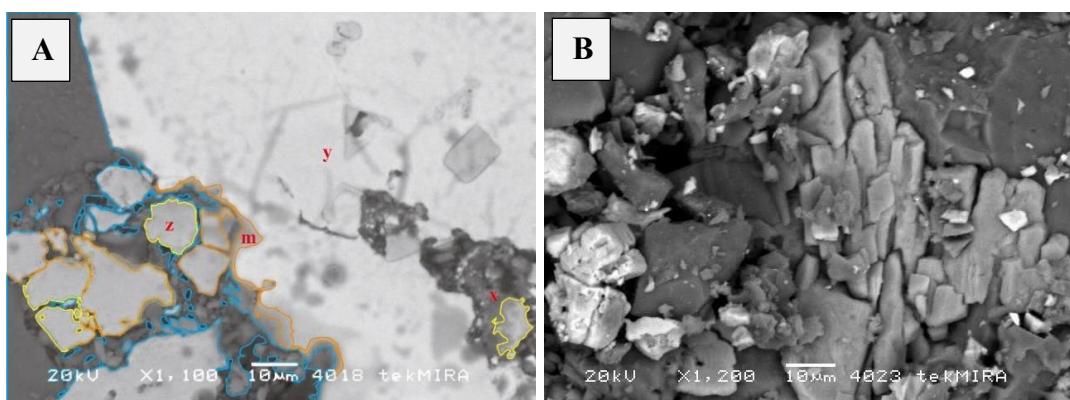
Analisis SEM-EDS, untuk conto sayatan dengan nomor conto D.3112436 yang diambil dari titik bor APSD. 1500 kedalaman 50,4 m s.d. 51,2 m (Gambar 21A dan 21B), menunjukkan mineral yang berwarna abu-abu gelap memiliki tekstur *broken* dan kristal kubik adalah mineral pirit (FeS_2) pada lingkaran garis kuning (z), mineral enargit-luzonit (y) memiliki warna abu-abu terang dengan struktur *smooth*

namun terdapat adanya inklusi kristal pirit. Hematit pada lingkaran oranye (m) terdapat diantara pirit dan enargit-luzonit di bagian tepi dari mineral tersebut. Kuarsa pada lingkaran garis biru (x) dengan butiran yang besar terdapat dengan warna abu-abu gelap memiliki bentuk kristal euhedral namun di dalamnya terdapat inklusi pirit.

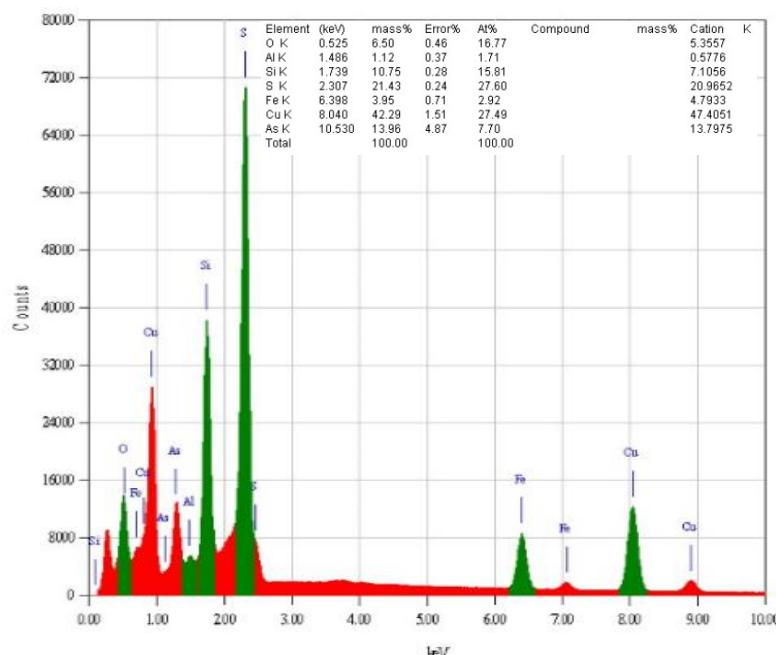
Penentuan jenis mineral didasarkan pada grafik spektrum EDS dengan presipitasi X-ray yang menunjukkan persentase kandungan unsur mineral yang terdapat dalam conto batuan (Gambar 22). Mineral pirit (z) terindikasi dari hasil presipitasi X-ray untuk kandungan Fe sebesar 3,95% dan S sebesar 21,43%, sedangkan indikasi mineral enargit (y) terindikasi dari nilai presipitasi X-ray untuk Cu sebesar 42,29% dan As sebesar 13,98% sementara untuk mineral yang ditunjukkan dengan kode x terindikasi sebagai kuarsa yang memperlihatkan struktur *mosaic* serta memiliki nilai presipitasi untuk kandungan Si sebesar 10,75%, kehadiran alunit terindikasi dengan kehadiran unsur Al sebesar 1,12%, sedangkan hematit (m) diindikasikan dengan kehadiran unsur Fe sebesar 3,95% dan O sebesar 6,50%.



Gambar 20. Struktur permukaan dengan perbesaran conto 1500x dengan indikasi mineral pirit (y), tennantit (h), perak (z), hematit (m) dan enargit-luzonit (x) (A). Struktur mikro pada perbesaran conto 1800x (B)



Gambar 21. Struktur permukaan dengan perbesaran 1100x dengan indikasi mineral pirit (z/garis kuning), enargit-luzonit (y), hematit (m/garis oranye) dan kuarsa (x) (A). Struktur mikro pada perbesaran conto 1200x (B)



Gambar 22. Grafik EDS dengan spektrum presipitasi X-Ray conto D.3112436 yang menunjukkan persentase unsur yang terdapat dalam conto batuan

Paragenesa mineral sulfida daerah penelitian diawali dengan pembentukan mineral pirit, kemudian pirit mengalami *replacement* menjadi enargit-luzonit, dalam persentase yang kecil enargit-luzonit sebagian berubah menjadi tennantit. Pirit, arsenopirit serta sfalerit yang memiliki bentuk kristal kubik mengisi mineral enargit-luzonit dalam bentuk inklusi atau tersebar secara klaster di dalam tubuh batuan dan rekahan atau celah/vug yang hadir pada fase akhir. Kemudian dilanjutkan dengan kehadiran mineral tetrahedrit dan kovelit yang mengisi rekahan antar pirit atau hadir sebagai inklusi dalam enargit-luzonit. Dengan demikian, diketahui bahwa urut-urutan pembentukan mineral sulfida pada daerah penelitian adalah dimulai dari pembentukan pirit, kemudian enargit-luzonit, tennantit, tetrahedrit dan kovelit bersamaan dengan pengayaan butiran emas-perak serta diakhiri dengan pembentukan pirit yang memiliki butiran kristal yang baik dan sempurna (Tabel 1).

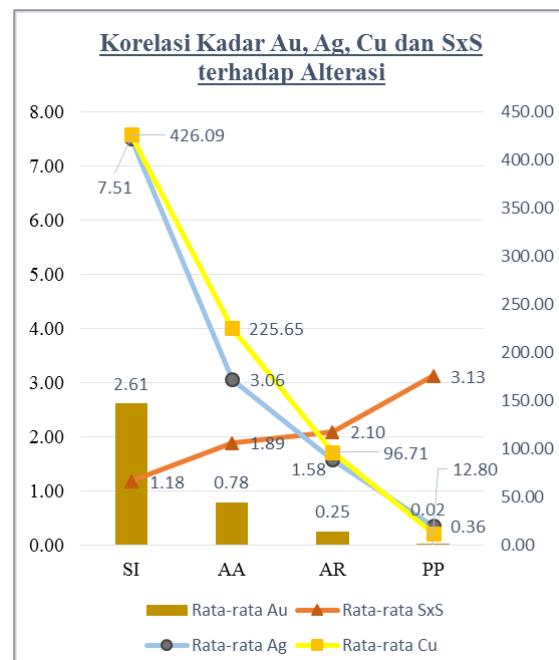
Tabel 1. Urutan paragenesa mineral sulfida

Tahapan pembentukan mineral sulfida	
Pirit	—
Enargit-luzonit	—
Tennantit	—
Tetrahedrit-kovelit (emas-perak)	—
Pirit (kristal sempurna)	—

Hubungan Alterasi dan Mineralisasi

Korelasi antara mineralisasi terhadap alterasi diwakili dengan hubungan antara kadar Au (ppm), Ag (ppm), Cu (ppm) dan SxS (ppm) terhadap zona alterasi yang ada pada deposit Ramba Joring, keseluruhan nilai kadar yang digunakan berasal dari 44 lubang bor dengan jumlah data kadar sebanyak 5.222 conto. Grafik pada Gambar 23 menunjukkan bahwa jenis alterasi berkaitan erat dengan mineralisasi yang terjadi pada daerah penelitian.

Mineralisasi yang baik dicirikan dengan kumpulan nilai kadar logam berharga yang semakin besar yang dibawa oleh mineral sulfida. Mineralisasi kuat terjadi pada jenis alterasi silisifikasi dan semakin berkurang pada alterasi argilik dan menghilang pada alterasi propilitik, yang berkorelasi positif terhadap kandungan logam berharga yang terdapat pada deposit tersebut.



Gambar 23. Grafik korelasi kadar Au, Ag, Cu dan SxS (kadar dalam ppm) dengan alterasi daerah penelitian

DISKUSI

Struktur geologi yang hadir pada daerah penelitian merupakan salah satu faktor penentu terbentuknya deposit Tambang emas Martabe, selain jenis batuan yang memiliki permeabilitas yang baik yaitu andesit hornblende dan batuan breksi polimik-monomik. Struktur geologi merupakan pembentuk jalur keluarannya larutan hidrotermal yang mengalami perubahan dua jenis batuan yang ada. Larutan hidrotermal yang bersifat asam menyebabkan terbentuknya jenis alterasi silisifikasi, argilik lanjut, argilik serta propilitik dengan mineral-mineral ubahan seperti alunit, dikit, kaolinit, jarosit, pirofilit, illit-smektit dan mineral sulfida seperti pirit, enargit-luzonit, famatinit, tennantit,

MAKALAH ILMIAH

tetrahedrit, sfalerit, arsenopirit dan kovelit yang menjadi penciri dari endapan epitermal sistem sulfidasi tinggi. Perubahan jenis alterasi dari dalam ke luar merupakan indikasi dari perubahan temperatur serta tingkat keasaman batuan yang mengalami alterasi.

Pembentukan mineral-mineral sulfida terutama pada jenis alterasi silisifikasi dan argilik lanjut diikuti dengan kehadiran emas dan perak dalam bentuk inklusi pada mineral pirit dengan ukuran submikron, merupakan hal yang menarik untuk ditelaah lebih lanjut, khususnya terhadap studi paragenesa mineral sulfida di daerah penelitian.

KESIMPULAN

Jenis batuan yang terdapat pada daerah penelitian yaitu andesit hornblende dan breksi polimik-monomik, mendukung terbentuk dan berkembangnya alterasi hidrotermal. urutan pembentukan kedua jenis batuan didahului oleh adanya intrusi lava andesit membentuk kompleks *dome* kemudian diterobos oleh satuan breksi polimik-monomik.

Zonasi alterasi yang terdapat pada daerah penelitian terdiri atas 4 zonasi, yaitu zona silisifikasi, argilik lanjut, argilik dan propilitik. Mineralisasi yang ditemukan adalah mineral pirit, enargit-luzonit, tenantit, kovelit, tetrahedrit, dan inklusi perak, selain sulfida ditemukan adanya mineral oksida hematit dan goetit. Paragenesa mineral bijih setidaknya melalui 3 tahap yaitu (a) pra-sulfidasi pembentukan pirit, (b) mineralisasi enargit, kovelit, tetrahedrit bersama dengan emas-perak, (c) pembentukan pirit dengan kristal yang baik. Keberadaan jenis alterasi dengan kandungan Au, Cu dan SxS (*sulfide sulphur*) memiliki korelasi positif, jenis alterasi silisifikasi memiliki kandungan mineral berharga yang paling banyak dari semua jenis alterasi yang terdapat pada daerah penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pihak PT Agincourt Resources, tim Departemen Mine Geology, Fakultas Teknik Geologi Unpad dan Laboratorium Tekmira Bandung.

DAFTAR PUSTAKA

- Apsden, J.A., Stephenson, B., Cameron, N.R. 1982a. *Tectonic Map of Northern Sumatra* (1:1,500,000). Directorate of Overseas Surveys.
- Corbett, J.G., dan Leach, T.M., 1998, *Southwest Pacific Rim gold-copper systems: Structure, alteration, mineralization*: Society of Economic Geologist Special Publication, v.6, p. 237.
- Davies, B., 2002. Report on the structural review of the Martabe project, Newmont Horas Nauli, internal memorandum, 5 p. Tidak terpublikasi.
- De Smet, M.E.M and Barber, A.J., 2005, *Tertiary stratigraphy*. In: *Sumatra, Geology, Resources and Tectonic Evolution* (eds) Barber, A.J., Crow, M.J., and Milsom, J.. Geological Society, London, Memoirs 2005; v. 31; p. 86-97.
- Hauff, Phoebe, 2004. *An overview of VIS-NIR SWIR Field Spectroscopy as Applied to Precious Metal Exploration*. Spectral International INC.
- Hedenquist JW, Arribas A Jr, Reynolds TJ.1998. Evolution of an intrusion-centered hydrothermal system: Far Southeast Lepanto porphyry and epithermal Cu-Au deposits, Philippines. *Economic Geology*, 93 (4) pp 373-404.
- Henley, R.W., and Ellis, A.J., 1983. *Geothermal Systems, Ancient and Modern*. Earth Science Reviews, v.19, p. 1-50.
- Pirajno, F. 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Perth: Springer

- Saing, S, & Ryohei, T., Imai, A. (2016). Fluid Inclusion and Stable Isotope Study at the Southeastern Martabe Deposit: Purnama, Barani and Horas Ore Bodies, North Sumatra, Indonesia. The Society of Resource Geology.
- Sutopo, B, Brian K. Levet, and Gemmel Bruce J. (2013). Characteristics of Sub-Microscopic Gold and Trace Element Geochemistry of Enargite/Luzonite in the Martabe High Sulfidation Epithermal Deposits, North Sumatra, Indonesia.
- Stoffregen, R., 1987, Genesis of acid sulfate alteration and Au-Cu mineralization at Summitville: Economic Geology, v. 82, p. 1575-1591.
- Thompson, A.J.B, Thompson J.F.C. 1996 Atlas of Alteration. Geological Association of Canada – Association Géologique du Canada Division des gites minéraux. Mineral Deposit Division-GAC.

Diterima : 1 Maret 2019
Direvisi : 6 Mei 2019
Disetujui : 19 Agustus 2019

ALTERASI DAN MINERALISASI CEBAKAN BIG GOSSAN
KABUPATEN MIMIKA, PROVINSI PAPUA

ALTERATION AND MINERALIZATION BIG GOSSAN DEPOSIT
MIMIKA REGENCY, PAPUA PROVINCE

Akhmad Fauzan¹, Mega F. Rosana¹, Euis T. Yuningsih¹,
Dwie H. Saputra², dan Fernandy Meiriyanto²

¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, ²PT. Freeport Indonesia
akhmadfn06@gmail.com

ABSTRAK

Aktifitas magmatik dan tektonik yang diikuti oleh proses hidrotermal di Pulau Papua dimulai pada zaman Tersier yang menghasilkan batuan intrusi dan mineralisasi Cu-Au di wilayah Ertsberg – Grasberg dan berpengaruh terhadap proses pembentukan Cebakan Big Gossan. Dalam penelitian ini, dilakukan pemetaan alterasi, analisis petrografi dan minerografi untuk mengetahui karakteristik dan penyebaran alterasi dan mineralisasi di Cebakan Big Gossan pada kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl. Berdasarkan himpunan mineral ubahannya dibedakan menjadi delapan zona, yaitu: Zona Diopsid – K-feldspar, Zona Kuarsa – Diopsid – Garnet, Zona Garnet – Diopsid + Epidot, Zona Biotit – K-feldspar + Epidot, Zona Garnet – Diopsid, Zona Aktinolit – Tremolit, Zona Kuarsa – Dolomit dan Zona Epidot – Klorit. Berdasarkan asosiasi mineral logamnya, dapat dikelompokan menjadi lima zona, yaitu: Zona Pirit, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit – Sfalerit – Galena, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit serta Zona Magnetit – Hematit. Penyebaran zona alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian menunjukkan arah baratlaut – tenggara yang dikontrol oleh Sesar Big Gossan yang memiliki kesamaan arah.

Kata kunci: Alterasi hidrotermal, big gossan, mineralisasi, *skarn*, Pulau Papua

ABSTRACT

Magmatic and tectonic activities followed by hydrothermal processes on Papua Island began in the Tertiary era which produced Cu-Au intrusion and mineralization in the Ertsberg-Grasberg region and influenced the process of created the Big Gossan deposit. In this study, alteration mapping and petrography and mineragraphy analysis were carried out to determine the characteristics and spread of alteration and mineralization in the Big Gossan deposit at a depth of 2,600 masl and 2,640 masl. Based on the associated of mineral alteration are divided into 8 zones, namely: Diopside - K-feldspar Zone, Quartz - Diopside – Garnet Zone, Garnet - Diopside + Epidote Zone, Biotite - K-feldspar + Epidote Zone, Garnet – Diopside Zone, Actinolite – Tremolite Zone, Quartz – Dolomite Zone and Epidote – Chlorite Zone. Based on the associated of ore minerals, can be identified 5 zone are Pyrite Zone, Chalcopyrite – Pyrite – Magnetite – Sphalerite Zone, Chalcopyrite – Pyrite – Magnetite – Hematite – Sphalerite – Galena Zone, Chalcopyrite – Pyrite – Magnetite – Hematite Zone, Magnetite – Hematite Zone. The distribution of alteration and mineralization zones in the study area shows the northwest-southeast direction which is controlled by the presence of the Big Gossan Fault which has the same direction.

Keywords: Alteration hydrothermal, Big Gossan, mineralization, *skarn*, Papua Island

MAKALAH ILMIAH

PENDAHULUAN

Big Gossan terletak sekitar 1 km di bagian baratdaya kompleks Ertsberg, 2 km selatan dari endapan porfiri Grasberg. Dimensi Big Gossan membentuk pola yang tabular, mempunyai panjang lebih dari 1 km, ketinggian sekitar 500 m dan lebar lebih dari 200 m. Big Gossan merupakan cebakan yang termasuk ke dalam kawasan kontrak karya PT Freeport Indonesia di Distrik Ertsberg, Kabupaten Mimika, Provinsi Papua.

Cebakan Big Gossan memiliki kondisi geologi yang cukup kompleks dengan proses alterasi dan mineralisasi yang memiliki penyebaran yang cukup luas serta kadar tembaga (Cu) yang cukup tinggi. Data Tahun 2018, Big Gossan memiliki cadangan terkira 39.839.000 ton dengan kadar 2,19% Cu, 0,96 g/t Au dan 12,64 g/t Ag dan cadangan terbukti 17.566.000 ton dengan kadar 2,32% Cu, 0,98 g/t Au dan 14,53 g/t Ag (Anonim, 2018). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi karakteristik alterasi dan mineralisasi serta penyebarannya pada kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl di Cebakan Big Gossan.

GEOLOGI REGIONAL

Susunan stratigrafi daerah penelitian terdiri dari Kelompok Kembelangan dan Kelompok Batugamping New Guinea yang ditutupi secara tidak selaras oleh endapan aluvial glasial berumur Kuarter (Gambar 1). Berikut urutan satuan stratigrafi dari tua ke muda pada daerah penelitian, yaitu:

Formasi Ekmai

Formasi Ekmai memiliki ketebalan sekitar 650 m. Mulai dari bagian bawah hingga ketebalan 550 m, terdiri dari batupasir arenit kuarsa dengan ukuran butir kasar hingga halus yang memiliki struktur tabular *cross bedding* dan tabular *parallel*. Satuan batuan tersebut diendapkan pada zona tepi laut atau lingkungan dekat sikuan paparan. Di atas satuan ini, terendapkan batulempung dan batugamping dengan

ketebalan 90 m pada lingkungan laut di zona batimetri batial, paparan luar, atau lereng laut. Formasi ini diinterpretasikan berumur Kapur Akhir hingga Paleosen. Berdasarkan dominasi litologi, Formasi Ekmai terbagi menjadi tiga anggota yaitu, Anggota Ekmai Batupasir pada bagian bawah, kemudian di atasnya terdapat Anggota Ekmai Batugamping dan anggota paling muda adalah Anggota Ekmai Batulempung.

Formasi Waripi

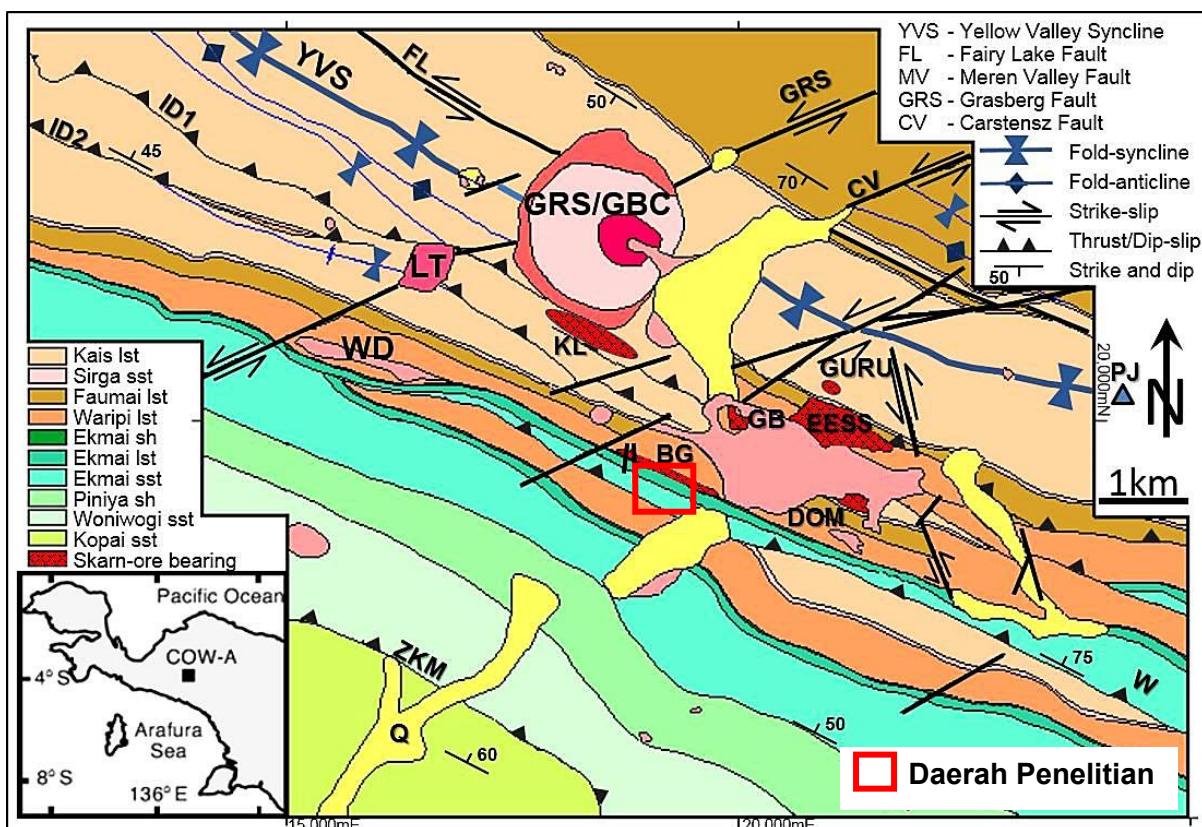
Formasi Waripi terdiri atas dolomit, batugamping dolomitan dan sedikit arenit kuarsa dengan nodul anhidrit. Formasi ini berumur Kapur Akhir atau Paleosen hingga Eosen Awal karena tidak ditemukannya fosil pada Gunung Bijih (Ufford, 1996). Robinson (1988) meneliti di daerah lain dan berdasarkan analisis foraminifera dan nanoplankton mendapatkan umur Paleosen Tengah hingga Paleosen Akhir. Formasi ini terendapkan di lingkungan laut dangkal hingga paparan laut.

MAGMATISME DAERAH PENELITIAN

Magmatisme pada Distrik Ertsberg dipengaruhi oleh proses kolisi delaminasi pada Miosen Akhir di Pegunungan Tengah bagian barat (Cloos et al, 2005). Kolisi delaminasi adalah lepasnya lempeng yang tersubduksi akibat tidak kuatnya lempeng untuk menahan tekanan dari magma.

Cebakan Big Gossan dipengaruhi oleh adanya Kompleks Intrusi Erstberg. Kompleks Intrusi Ertsberg memiliki dimensi tinggi 1 km, panjang 3 km dan lebar 1 km. Intrusi Erstberg tidak muncul hingga permukaan, melainkan terhenti pada kedalaman 2 km dari permukaan. Intrusi ini terdiri atas porfiri monzodiorit kuarsa dan monzonit kuarsa, yang menerobos batuan samping berupa sedimen karbonat.

Berdasarkan metode penanggalan Ar - Ar, diketahui bahwa Intrusi Ertsberg berumur $2,67 \pm 0,03$ juta tahun lalu (Pollard dkk., 2005 dalam Gandler, 2006).



Gambar 1. Peta Geologi Distrik Erstberg (Sunyoto, 2015)

STRUKTUR GEOLOGI

Big Gossan merupakan bagian dari sayap lipatan sinklin Yellow Valley yang memiliki sumbu lipatan baratlaut - tenggara. Menurut Hefton (1995), Formasi Waripi pada Big Gossan telah diganggu oleh adanya *bedding plane fault* yang dibatasi oleh Batulempung Formasi Ekmak di bagian selatannya.

Berdasarkan Meinert (1997), Sesar Big Gossan terdapat pada batugamping Formasi Ekmak yang berada 100 m dari batulempung Formasi Ekmak.

Perlapisan yang tegak dan *overtuned* pada Formasi Ekmak dan Formasi Waripi disebabkan oleh adanya pergerakan dari Sesar Big Gossan yang memiliki arah jurus sesar (*strike*) sebesar 120° (Gambar 2). Zona *shear* pada Formasi Ekmak terbentuk sebelum masuknya larutan hidrotermal dan terbentuk skarn diopsid.

Akibat adanya pergerakan tersebut, memicu masuknya fluida hidrotermal dari Intrusi Ertberg ke daerah penelitian yang menghasilkan proses alterasi hidrotermal dan mineralisasi yang cukup kompleks.

METODOLOGI

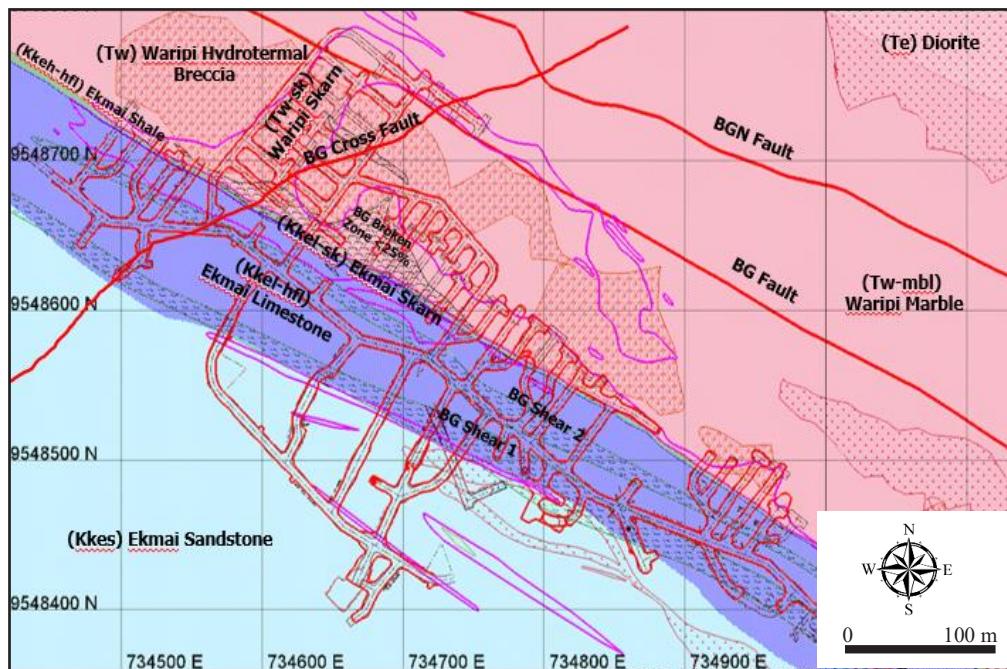
Metode penelitian yang digunakan terdiri dari pemetaan geologi dan alterasi serta analisis laboratorium meliputi analisis petrografi dan analisis mineragrafi. Pengambilan delapan contoh batuan untuk dianalisis petrografi dan mineragrafi yang diperoleh dari tambang bawah tanah kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl.

HASIL DAN PEMBAHASAN

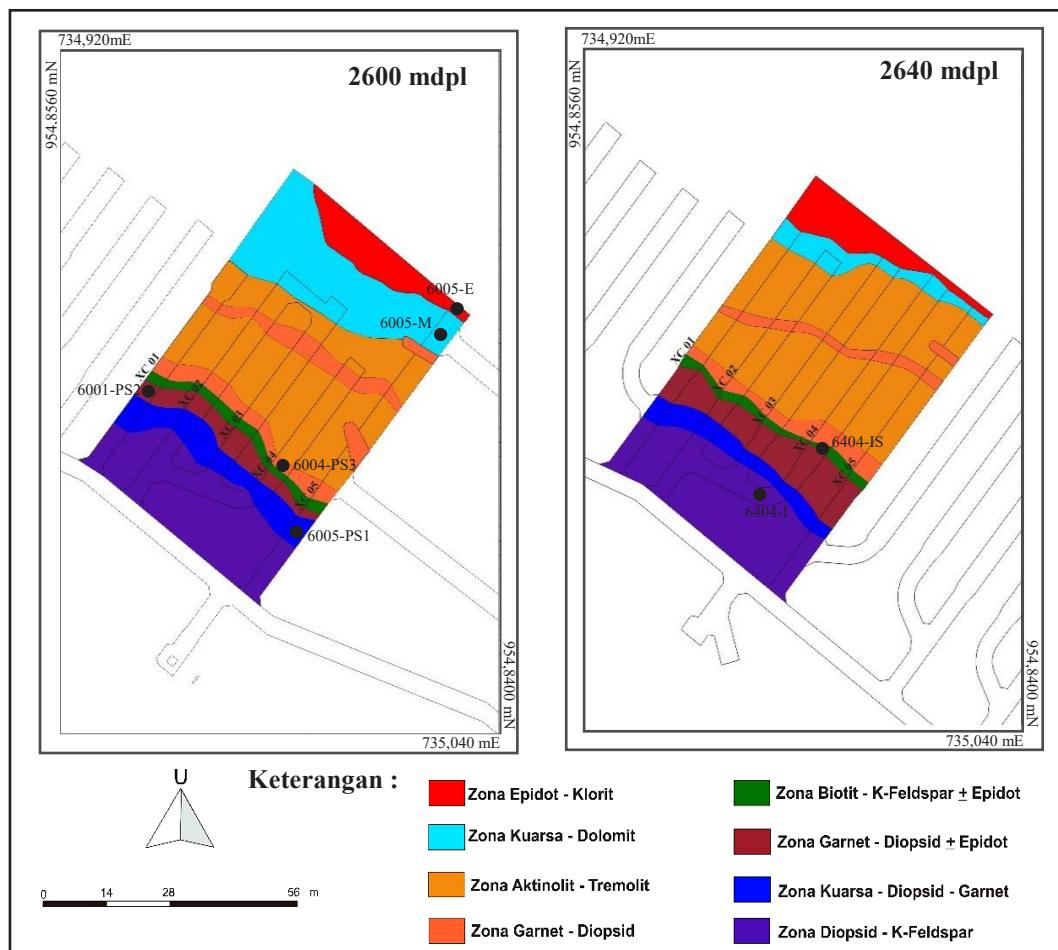
Alterasi Daerah Penelitian

Berdasarkan asosiasi mineral alterasi yang diamati secara megaskopis dan mikroskopis, zona alterasi pada daerah penelitian terbagi menjadi delapan zona alterasi meliputi, (Gambar 3).

MAKALAH ILMIAH



Gambar 2. Plan of view Big Gossan kedalaman 2.540 mdpl
(Tim Geology UG Big Gossan, 2018)



Gambar 3. Peta zona alterasi cebakan Big Gossan
di kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl

Zona Diopsid – K-Feldspar

Zona ini menempati 25% dari daerah penelitian. Memiliki warna kehijauan yang dicirikan oleh kehadiran mineral alterasi berupa diopsid, K-feldspar, klorit dan kalsedon. Kehadiran mineral kalsedon ditemukan sebagai urat-urat halus di beberapa lokasi. Mineral bijih yang hadir pada zona ini didominasi oleh kehadiran mineral pirit secara tersebar.

Pada zona ini memiliki intensitas alterasi sedang dengan proses alterasi *pervasive*. Kehadiran mineral K-feldspar dan urat kalsedon merupakan tahap awal dari fase pembentukan *skarn* yakni tahap isokimia *skarn* yang diakibatkan oleh adanya proses metamorfisme kontak (Corbett & Leach, 1997).

Pada tahap berikutnya, terjadi proses metasomatisme *skarn* yang mengakibatkan tergantikannya mineral karbonat oleh diopsid, lalu pada fase berikutnya mineral diopsid sebagian digantikan oleh mineral epidot dan klorit (Gambar 4).

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Diopsid – K-feldspar terbentuk pada kisaran temperatur

$>300^{\circ}\text{C}$, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.

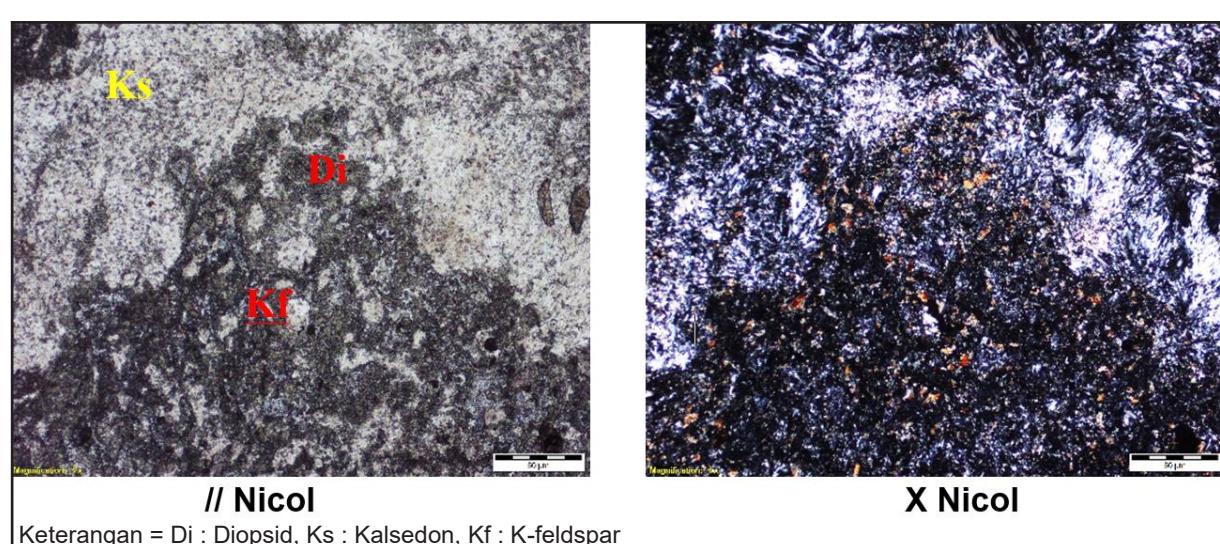
Zona Kuarsa – Diopsid – Garnet

Zona ini memiliki persebaran 15% dari daerah penelitian yang dicirikan oleh mineral kuarsa sekunder, diopsid, garnet, epidot dan klorit dengan intensitas alterasi sangat kuat dan proses alterasi berupa *pervasive*.

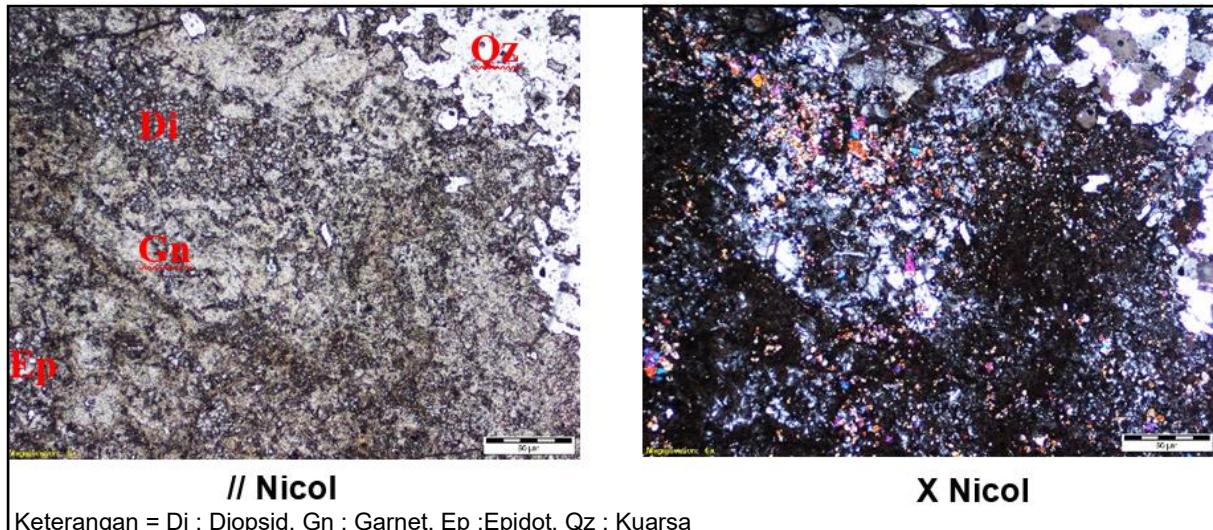
Mineral bijih pada zona ini terdiri atas mineral kalkopirit, pirit, magnetit dan sfalerit yang hadir secara tersebar.

Kemunculan mineral kuarsa sekunder merupakan penciri adanya proses kontak metamorfisme di daerah penelitian (Corbett & Leach, 1997). Pada tahap berikutnya, hadir mineral berupa diopsid dan garnet yang dijumpai menggantikan mineral karbonat. Pada fase berikutnya, mineral diopsid dan garnet sebagian tergantikan oleh mineral epidot dan klorit (Gambar 5).

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Kuarsa – Diopsid – Garnet terbentuk pada kisaran temperatur $>300^{\circ}\text{C}$, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.



Gambar 4. Fotomikrografi 6404-I di Zona Diopsid – K-feldspar
kedalaman 2.640 mdpl XC 04



Keterangan = Di : Diopsid, Gn : Garnet, Ep :Epidot, Qz : Kuarsa

Gambar 5. Fotomikrografi 6005-PS1 di Zona Kuarsa – Diopsid – Garnet kedalaman 2.600 mdpl XC 05

Zona Garnet – Diopsid ± Epidot

Zona ini menempati 12% dari daerah penelitian dengan komposisi mineral garnet, diopsid, epidot, tremolit dan anhidrit. Garnet yang hadir pada zona ini memiliki ukuran yang halus. Intensitas alterasi yang terjadi pada zona ini adalah sangat kuat dan proses alterasi yaitu *pervasive*. Mineral bijih yang hadir meliputi mineral kalkopirit, pirit, magnetit, hematit, galena dan sfalerit yang hadir secara tersebar dengan intensitas yang cukup tinggi.

Mineral kuarsa merupakan produk dari proses metamorfisme kontak antara fluida hidrotermal dengan batugamping. Pada fase selanjutnya, hadir mineral garnet dan diopsid yang merupakan hasil dari penggantian mineral karbonat, kemudian sebagian dari mineral garnet dan diopsid tergantikan oleh epidot, tremolit dan anhidrit (Gambar 6).

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Garnet – Diopsid ± Epidot terbentuk pada kisaran temperatur $> 300^{\circ}\text{C}$, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.

Zona Biotit – K-feldspar + Epidot

Persebaran zona ini terdapat 3% dari daerah penelitian dengan karakteristik berwarna coklat didominasi oleh hadirnya mineral biotit, sedangkan yang berwarna abu-abu didominasi oleh K-feldspar. Mineral lain yang dijumpai berupa epidot dan garnet yang hadir secara tersebar maupun sebagai urat. Mineral diopsid dan garnet tidak terlalu dominan dibandingkan mineral lainnya. Kehadiran mineral bijih berupa kalkopirit, pirit, magnetit dan sfalerit yang terdapat secara tersebar dan sebagai urat dengan intensitas lemah. Intensitas alterasi pada zona ini adalah lemah dengan proses alterasi berupa *selectively pervasive*.

Tahap metamorfisme kontak pada zona ini ditandai dengan kehadiran mineral K-feldspar. Keterdapatannya mineral biotit dan garnet merupakan hasil dari fase berikutnya. Mineral garnet dijumpai menggantikan sebagian dari mineral karbonat. Kemudian pada fase akhir dicirikan oleh kehadiran mineral epidot baik hadir secara tersebar maupun sebagai urat (Gambar 7).

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Biotit – K-feldspar ± Epidot terbentuk pada kisaran

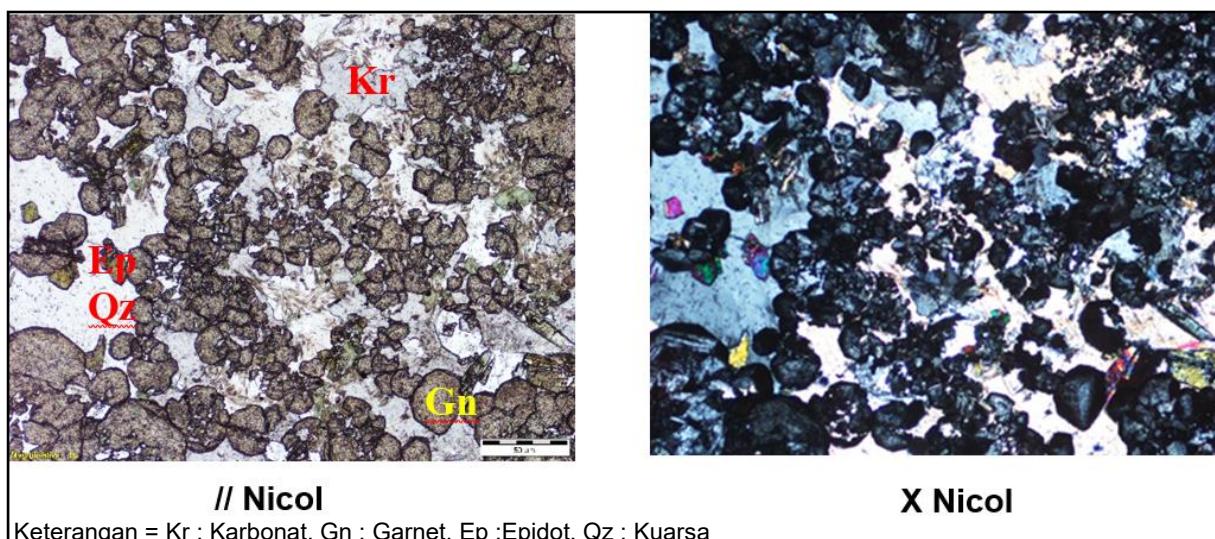
temperatur $>300^{\circ}\text{C}$, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.

Zona Garnet – Diopsid

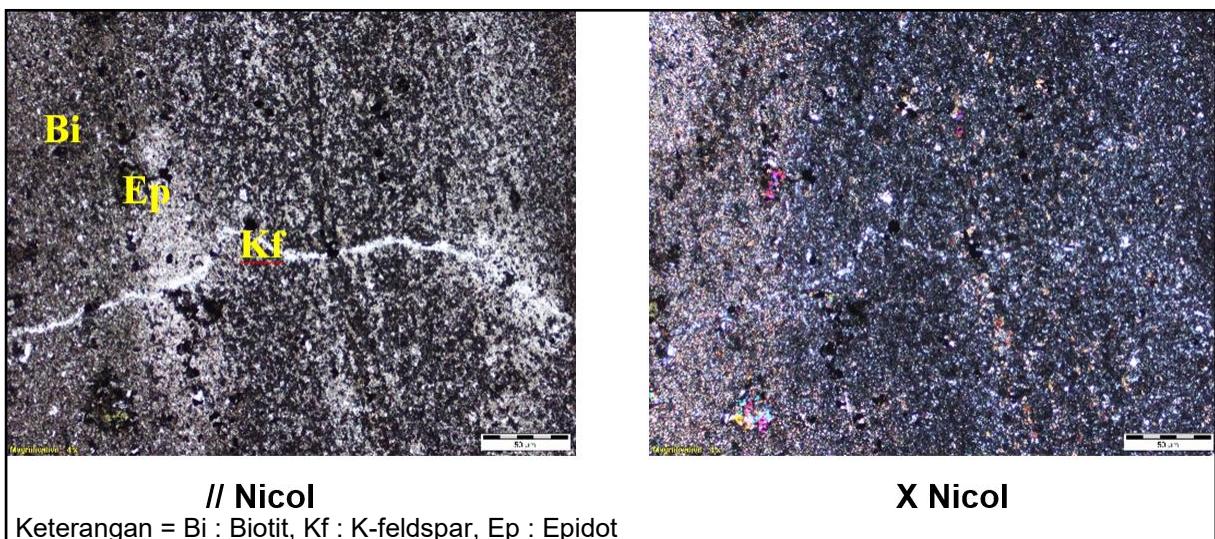
Zona ini terdapat 10% dari daerah penelitian. Karakteristik dari zona ini memiliki warna kecoklatan, dijumpai mineral garnet, diopsid, kuarsa, epidot, dan anhidrit. Intensitas alterasi pada zona ini yaitu sangat kuat dan proses alterasi berupa *pervasive*. Mineral bijih pada zona ini meliputi mineral kalkopirit, pirit, magnetit, hematit, dan sfalerit yang hadir secara tersebar dengan intensitas yang cukup

tinggi. Mineral yang hadir pada tahap isokimia *skarn* akibat adanya proses metamorfisme kontak adalah kuarsa. Pada fase berikutnya, terjadi penggantian mineral karbonat oleh garnet dan diopsid. Sebagian dari mineral diopsid digantikan oleh mineral epidot dan anhidrit di fase selanjutnya (Gambar 8).

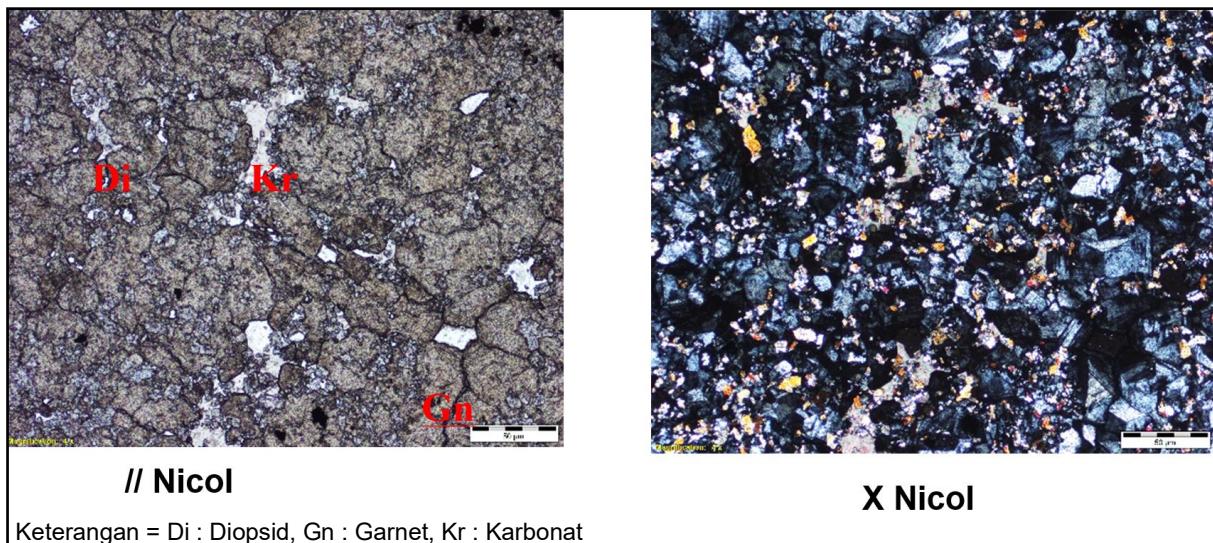
Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Garnet – Diopsid terbentuk pada kisaran temperatur $> 300^{\circ}\text{C}$, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.



Gambar 6. Fotomikrografi 6001-PS2 di Zona Garnet – Diopsid \pm Epidot
kedalaman 2.600 mdpl XC 01



Gambar 7. Fotomikrografi 6404-IS di Zona Biotit – K-feldspar + Epidot
kedalaman 2.640 mdpl XC 04



Keterangan = Di : Diopsid, Gn : Garnet, Kr : Karbonat

Gambar 8. Fotomikrografi 6004-PS3 di Zona Garnet – Diopsid kedalaman 2.600 mdpl XC 04

Zona Aktinolit – Tremolit

Zona ini menempati 25% dari daerah penelitian yang memiliki warna kehijauan dengan dicirikan oleh mineral aktinolit, tremolit, epidot, klorit, garnet, diopsid dan anhidrit. Intensitas alterasi yaitu sangat kuat dan proses alterasi berupa *pervasive*. Mineral bijih pada zona ini meliputi mineral kalkopirit, pirit, magnetit dan hematit yang hadir secara tersebar dengan intensitas sangat tinggi.

Pada zona ini nampak bahwa telah terjadi proses penggantian mineral pada mineral karbonat oleh mineral garnet dan diopsid. Kemudian proses selanjutnya mineral *hydrous* hampir menggantikan keseluruhan dari mineral garnet dan diopsid berupa mineral aktinolit, tremolit, klorit, epidot dan anhidrit.

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Aktinolit - Tremolit terbentuk pada kisaran temperatur 280 °C hingga 300 °C, kondisi fluida memiliki kondisi pH relatif netral.

Zona Kuarsa – Dolomit

Zona ini menempati 8% dari daerah penelitian dengan warna putih kecoklatan, struktur non foliasi, *granulose*, *heteroblastic* (*saccharoidal*) dan

granuloblastic), keras, sebagian telah terubah menjadi kristalin yang ditandai dengan hadirnya mineral kuarsa dan terdapat pula mineral karbonat, diopsid, flogopit, dan mineral magnetit yang hadir secara setempat dan sejajar perlapisan.

Zona Kuarsa - Dolomit merupakan zona kontak metamorfisme dengan Intrusi Ertsberg di daerah penelitian yang dicirikan oleh terubahnya batuan menjadi marmer.

Kemudian, proses alterasi dengan intensitas sangat lemah yang ditandai dengan kehadiran mineral diopsid yang menggantikan mineral karbonat. Pada fase berikutnya, sebagian dari mineral diopsid telah tergantikan oleh adanya mineral flogopit (Gambar 9).

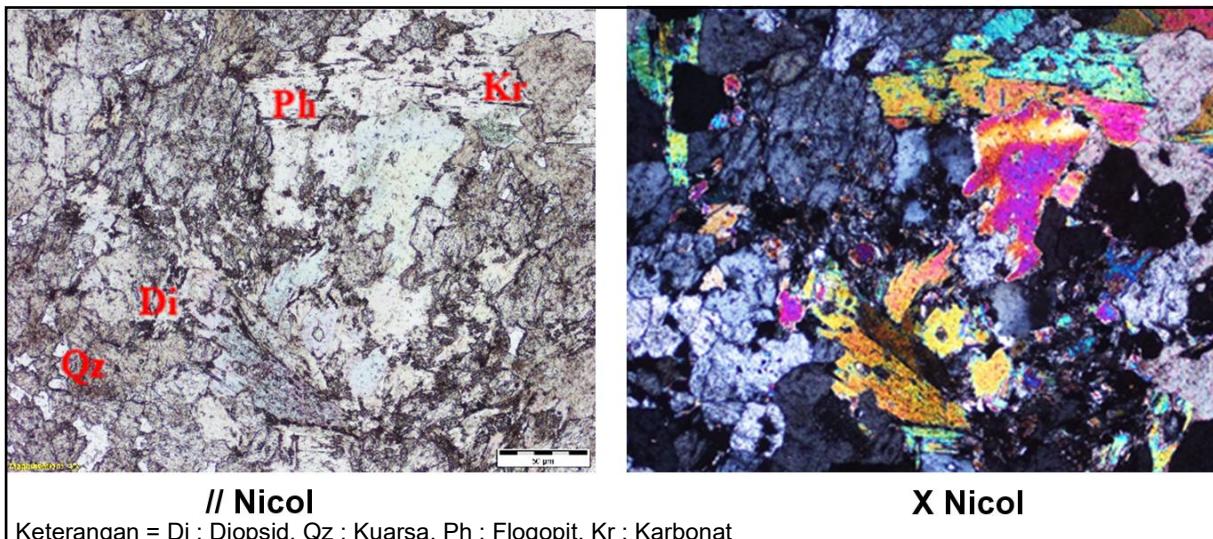
Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Kuarsa - Dolomit terbentuk pada kisaran temperatur < 220 °C, kondisi fluida memiliki pH relatif netral.

Zona Epidot – Klorit

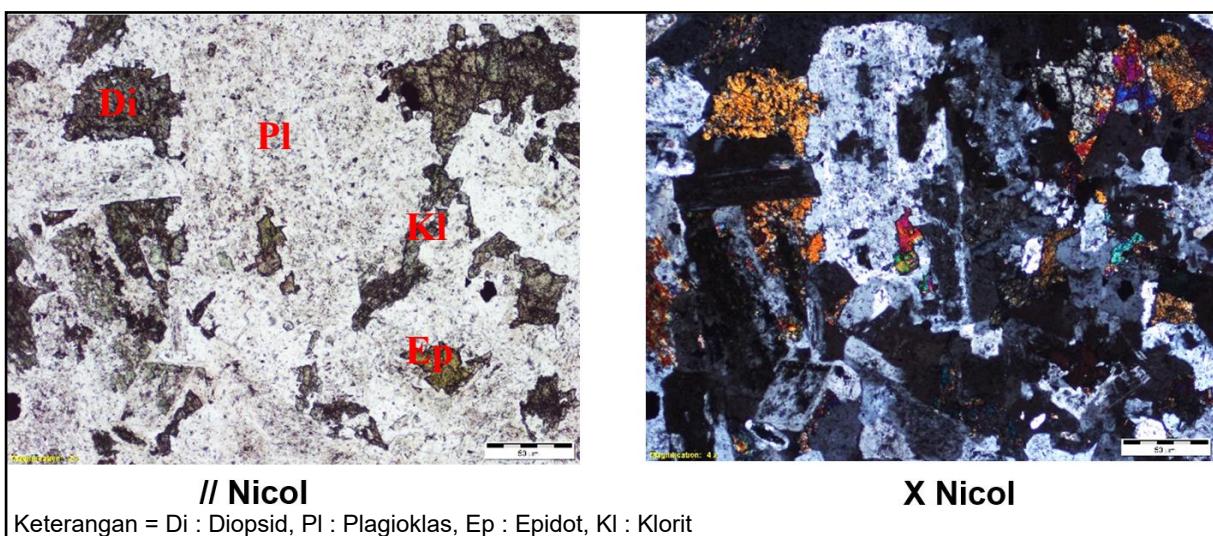
Zona terdapat 2% dari daerah penelitian memiliki karakteristik berwarna abu abu muda, mesokratik, porfiritik, inequigranular, struktur sill, hadir sejajar dengan perlapisan batuan, komposisi mineral teridentifikasi berupa feldspar, kuarsa, piroksen, klorit,

epidot. Kehadiran mineral epidot telah menggantikan sebagian mineral plagioklas dan K-feldspar, mineral klorit menggantikan sebagian mineral biotit dan plagioklas (Gambar 10).

Berdasarkan kisaran temperatur mineral alterasi (Morrison, 1997), Zona Epidot - Klorit terbentuk pada kisaran temperatur 240 °C hingga 320 °C, kondisi fluida memiliki kisaran pH relatif netral.



Gambar 9. Fotomikrografi 6005-M di Zona Kuarsa – Dolomit kedalaman 2.600 mdpl XC 05



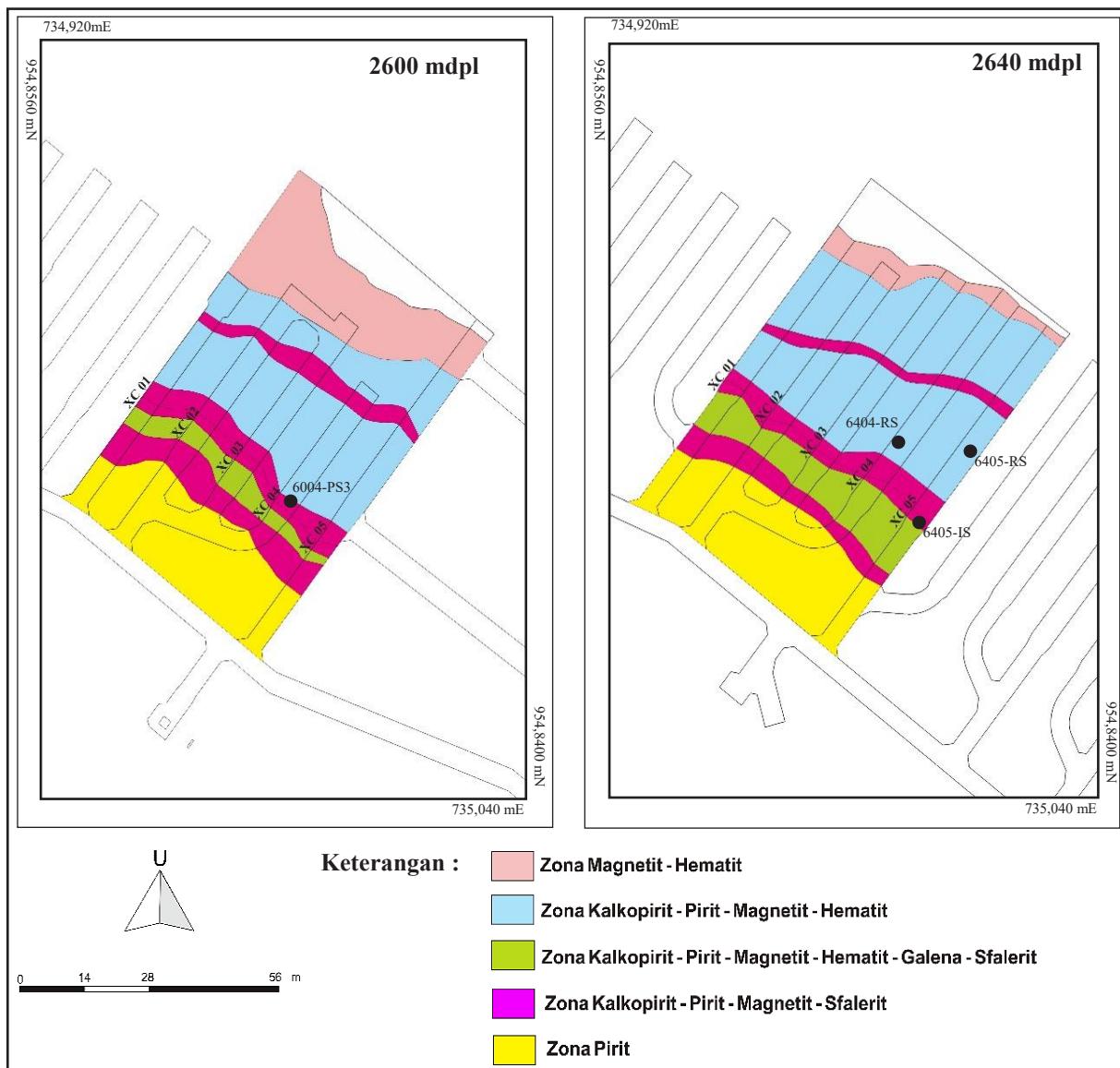
Gambar 10. Fotomikrografi 6005-E di Zona Epidot – Klorit di kedalaman 2.600 mdpl XC 05

Mineralisasi Daerah Penelitian

Daerah penelitian terbagi menjadi lima zona mineralisasi berdasarkan kehadiran mineral bijih pada batuan secara megaskopis serta analisis mineraagrafi, yaitu (Gambar 11) :

Zona Pirit

Zona Pirit hadir pada bagian barat daya daerah penelitian yang meliputi Zona Diopsid – K-feldspar. Kehadiran mineral pirit pada zona ini memiliki intensitas yang lemah dengan kehadiran secara tersebar.



Gambar 11. Peta zona mineralisasi cebakan Big Gossan di kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit hadir pada Zona Kuarsa – Diopsid - Garnet, Zona Biotit – K-feldspar ± Epidot, Zona Garnet - Diopsid.

Kehadiran mineral magnetit dan mineral sulfida hadir secara tersebar pada tubuh *skarn* dan setempat ditemukan sebagai urat. Intensitas kehadiran mineral sulfida yang tersebar lebih dominan dibandingkan hadir sebagai urat. Berdasarkan analisis mineragrafi, magnetit hadir pertama yang kemudian tergantikan sebagian oleh kalkopirit dan pirit, lalu kalkopirit tergantikan sebagian sebagian kecil oleh sfalerit (Gambar 12 dan Gambar 13).

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit – Galena – Sfalerit

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit – Galena – Sfalerit terdapat pada Zona Garnet – Diopsid ± Epidot. Mineral magnetit, hematit serta mineral sulfida secara tersebar pada tubuh batuan *skarn*. Berdasarkan analisis mineragrafi, mineral magnetit digantikan oleh hematit yang

mengelilinginya serta sebagian telah tergantikan oleh mineral kalkopirit dan pirit. Kemudian pada fase selanjutnya mineral galena dan sfalerit menggantikan sebagian kecil mineral kalkopirit.

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit

Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit terdapat pada Zona Aktinolit -Tremolit. Pada zona ini kehadiran mineral magnetit dan hematit serta mineral sulfida hadir secara tersebar pada tubuh batuan *skarn*. Berdasarkan analisis mineragrafi, kehadiran mineral magnetit tergantikan oleh hematit yang mengelilinginya serta sebagian magnetit juga tergantikan oleh mineral kalkopirit dan pirit (Gambar 14 dan Gambar 15).

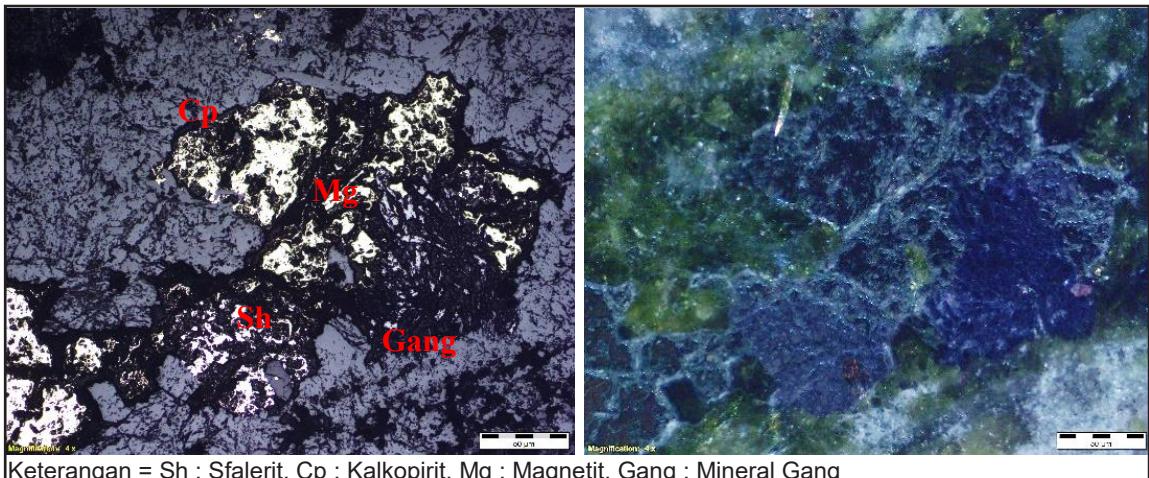
Zona Magnetit – Hematit.

Zona Magnetit – Hematit menempati Zona Kuarsa - Dolomit yang memiliki kontak langsung dengan tubuh batuan beku Satuan Monzodiorit. Pada zona ini kehadiran mineral magnetit dan hematit hadir secara lokal dan setempat ditemukan sejajar perlapisan batuan.

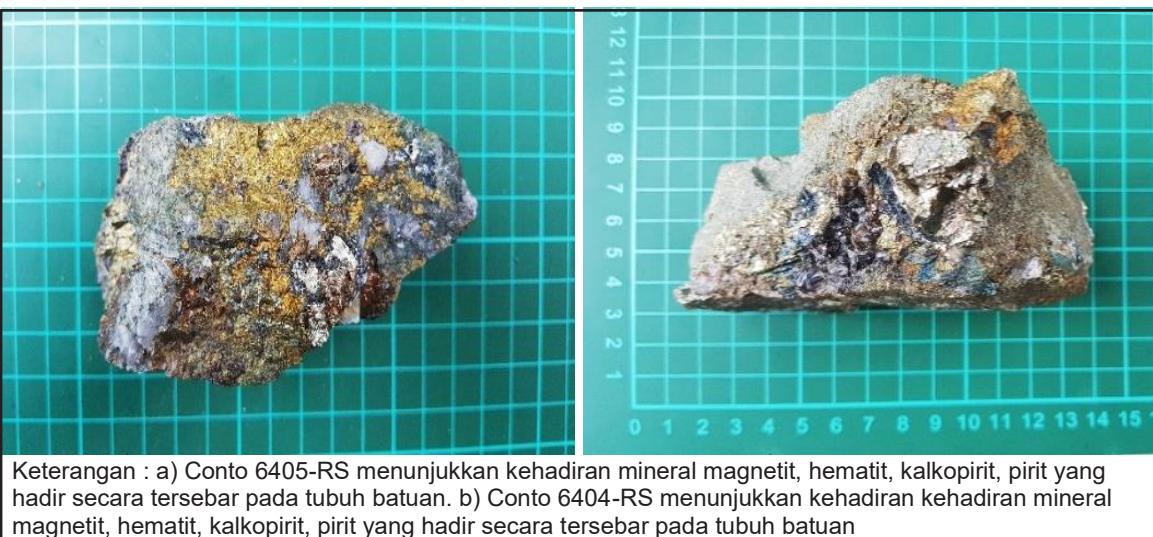


Keterangan: a) Conto 6405-IS menunjukkan kehadiran mineral sulfida dan magnetit sebagai urat.
b) Conto 6004-PS3 menunjukkan kehadiran mineral sulfida secara tersebar.

Gambar 12. Conto mineralisasi kalkopirit – pirit – magnetit - sfalerit

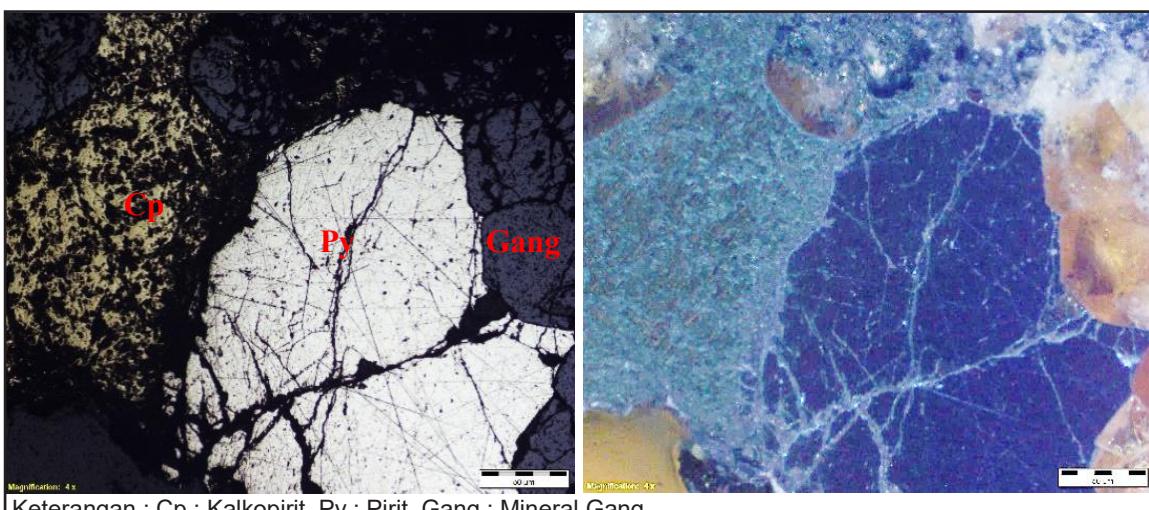


Gambar 13. Kenampakan magnetit yang tergantikan oleh kalkopirit dan sebagian kalkopirit tergantikan oleh sfalerit pada conto batuan 6405-IS



Keterangan : a) Conto 6405-RS menunjukkan kehadiran mineral magnetit, hematit, kalkopirit, pirit yang hadir secara tersebar pada tubuh batuan. b) Conto 6404-RS menunjukkan kehadiran kehadiran mineral magnetit, hematit, kalkopirit, pirit yang hadir secara tersebar pada tubuh batuan

Gambar 14. Conto mineralisasi kalkopirit – pirit – magnetit - hematit



Gambar 15. Kenampakan sebagian kalkopirit tergantikan oleh pirit pada conto batuan 6404-RS

PEMBAHASAN

Proses magmatisme yang terjadi di Distrik Ertsberg pada 4,4 – 2,6 juta tahun lalu (Hefton, 1995) tepat pada bagian timur daerah penelitian yang menyebabkan hadirnya tubuh batuan beku sebagai *sill* di daerah penelitian. Kehadiran tubuh batuan beku monzodiorit tersebut menyebabkan adanya transfer panas terhadap batuan samping disebut dengan proses metamorfisme kontak. Menurut Meinert (1997), jalur fluida yang mengubah batuan pada daerah penelitian melalui kontak antara Formasi Ekmai dan Formasi Waripi. Hasil dari adanya metamorfisme kontak tersebut menyebabkan batuan di daerah penelitian termetamorfkan, meliputi batu lempung menjadi hornfels, batupasir menjadi metasedimen dan batugamping menjadi marmer. Akibat adanya proses tersebut menghasilkan adanya Zona Biotit – K-Feldspar ± Epidot dan Zona Kuarsa – Dolomit.

Pada fase berikutnya, kembali terjadi proses magmatisme yang menghasilkan fluida hidrotermal. Fluida hidrotermal tersebut masuk melalui kontak antara Formasi Ekmai dan Formasi Waripi. Hasil dari proses tersebut menghasilkan mineral tahap *prograde skarn* seperti garnet dan diopsid. Hal ini dapat ditunjukkan pada zona alterasi yang memiliki jarak terdekat dengan jalur fluida tersebut seperti Zona Garnet – Diopsid, Zona Garnet – Diopsid ± Epidot dan Zona Kuarsa – Diopsid ± Epidot.

Pada bagian tubuh intrusi monzodiorit, fluida hidrotermal juga masuk melalui rekanan akibat pendinginan dan mengubah batuan tersebut menjadi *endoskarn* dan proses mineralisasi mulai terjadi yang dicirikan oleh terendapkannya mineral bijih berupa mineral magnetit dan hematit. Hal ini dicirikan oleh zona mineralisasi pada fase *prograde skarn* yaitu Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit – Sfalerit – Galena.

Fase mineralisasi awal dicirikan oleh kehadiran mineral magnetit yang kemudian tergantikan oleh mineral sulfida berupa mineral kalkopirit, pirit. Pada fase berikutnya kalkopirit tergantikan oleh galena dan sfalerit. Selanjutnya pada fase oksidasi terbentuk hematit. Mineralisasi pada zona ini memiliki presentase kehadiran mineral sulfida yang cukup tinggi. Hal ini dikarenakan jarak sumber fluida terhadap zona ini tidak terlalu jauh.

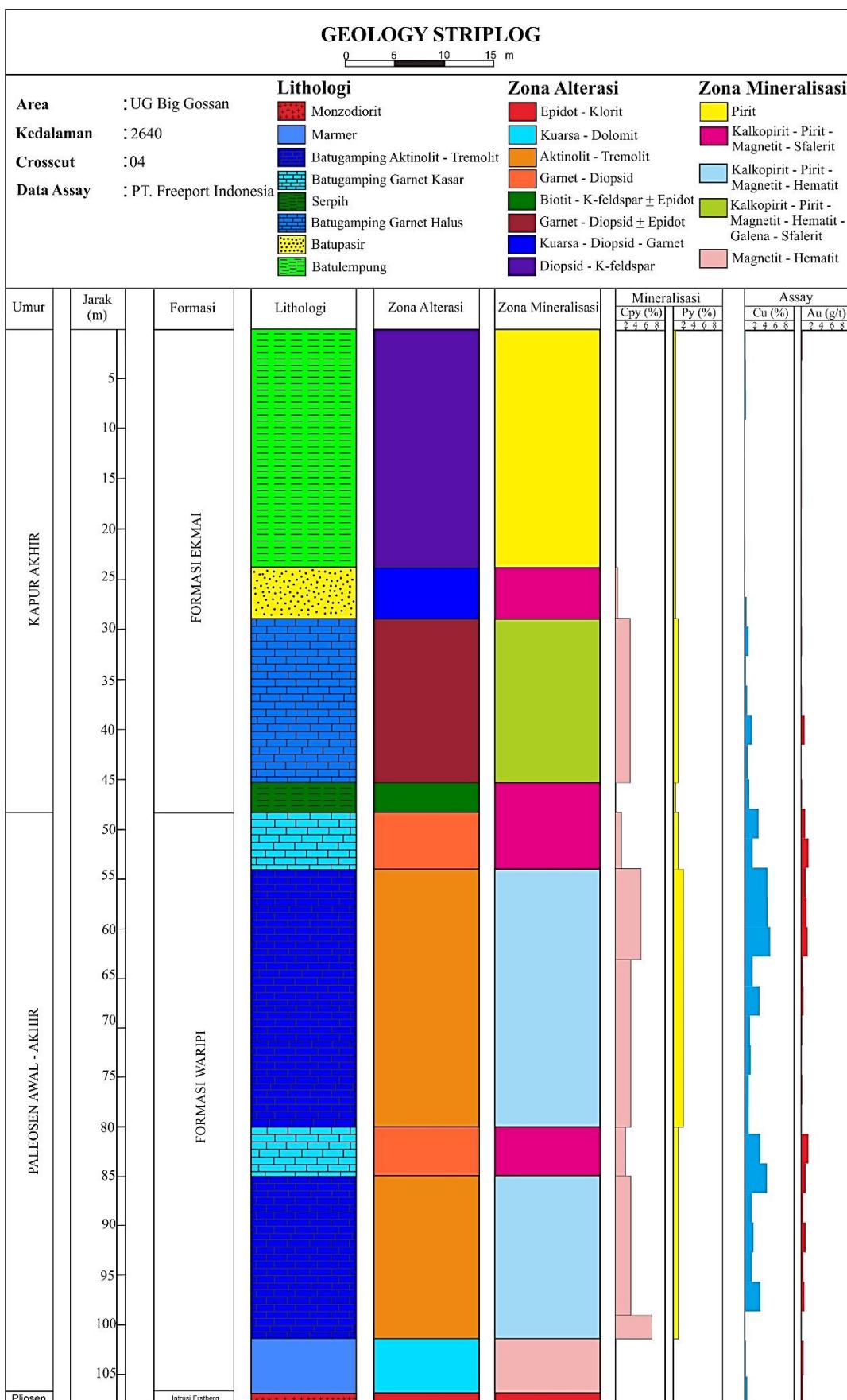
Semakin menjauhi sumber fluida mengakibatkan terjadinya evolusi magma dan penurunan temperatur. Hal ini menghasilkan mineral tahap *retrograde skarn* yang dicirikan oleh kelompok mineral *hydrous* seperti tremolit, aktinolit, epidot, klorit, anhidrit dan gypsum. Tahap ini dapat terlihat pada Zona Tremolit – Aktinolit.

Pada tahap *retrograde skarn* diperkaya oleh masuknya air meteorik, sehingga penyebaran mineral *hydrous* sangat luas dan ditemukan pada zona – zona *prograde skarn*. Pada tahap ini kehadiran mineral sulfida memiliki presentase yang lebih tinggi dibandingkan pada fase *prograde skarn*. Hal ini terjadi karena efektivitas terendapkan mineral bijih terjadi saat proses penurunan temperatur. Mineral bijih pada fase ini dicirikan oleh Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit.

Mineralisasi pada fase ini diawali oleh kehadiran mineral magnetit yang kemudian tergantikan oleh kalkopirit dan pirit. Pada fase oksidasi mulai hadir hematit yang menggantikan magnetit.

Keterdapatannya unsur Cu dan Au dengan intensitas tinggi terdapat pada Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit dan Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit (Gambar 16). Kadar unsur Cu dan Au pada zona tersebut di kedalaman 2.640 mdpl lebih tinggi dibandingkan dengan kedalaman 2.600 mdpl.

MAKALAH ILMIAH



Gambar 16. Geologi striplog cebakan Big Gossan kedalaman 2.600 mdpl XC 04

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis petrologi dan petrografi, asosiasi mineral yang hadir akibat adanya proses metamorfisme kontak pada fase isokimia *skarn* adalah kuarsa, kalsedon dan k-feldspar.

Selanjutnya, fluida hidrotermal menyebabkan adanya proses metasomatisme *skarn* yang menggantikan mineral karbonat oleh garnet dan diopsid yang disebut sebagai tahap *prograde skarn*. Semakin menjauhi dari sumbernya, terjadi proses *retrograde skarn* yang diakibatkan oleh adanya evolusi dari fluida hidrotermal sehingga terjadinya penurunan temperatur dan diperkaya oleh masuknya air meteorik sehingga menghasilkan asosiasi mineral *hydrous* berupa aktinolit, tremolit, epidot, klorit, anhidrit dan gipsum.

Tahap mineralisasi mulai terjadi saat fase *prograde skarn* yang dicirikan oleh kehadiran mineral magnetit, kalkopirit, pirit, galena dan sfalerit. Sedangkan pada fase *retrograde skarn*, hanya dijumpai berupa mineral magnetit, kalkopirit dan pirit. Selanjutnya, pada fase oksidasi terbentuk mineral hematit.

Persebaran zona alterasi dan mineralisasi menunjukkan arah baratlaut – tenggara, dikontrol oleh arah perlapisan batuan dan Sesar Big Gossan yang memiliki kesamaan arah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Freeport Indonesia yang telah memberikan izin serta membantu penulis dalam menyelesaikan penelitian serta kepada semua pihak yang telah membantu penulis baik secara langsung maupun tidak langsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2018, *Laporan Pemutakhiran Neraca Sumber Daya Mineral Logam Tahun 2018*, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, Badan Geologi, Bandung.
- Cloos, M., Sapiie, B., Van Ufford, A. Q., Weiland, R. J., Warren, P. Q., and McMahon, T. P., 2005, *Collisional delamination in New Guinea: The geotectonics of subsiding slab breakoff*. Geologi Society of America, Special Paper 400, h. 1 – 45.
- Corbett, G. J. and Leach, T. M., 1997, *Southwest Pacific Rim Gold-Copper Systems: Structure, Alteration, and Mineralization*. Short Course Manual.
- Gandler, L. M., 2006, *Calc-silicate Alteration and Cu-Au Mineralization of The Deep MLZ Skarn, Ertsberg District, Papua, Indonesia*. The University of Texas at Austin.
- Hefton K. K., MacDonald G. D., Arnold L. C., Schappert A. L., and Ona A., 1995, *Coper-gold deposits of the Ertsberg (Gunung Bijih) Mining District, Irian Jaya, in Exploring the Tropics: Geology and Copper-Gold Deposits of the Ertsberg (Gunung Bijih) Mining District, Irian Jaya, Indonesia*. Mayes D. & Pollard P., eds, EGRU Contribution, 53, 1-43.
- Meinert, L D et al., 1997, *Geology, Zonation, and Fluid Evolution of the Big Gossan Cu-Au Skarn Deposit, Ertsberg District, Irian Jaya*. Society of Economic Geologists, Economic Geology, v.92. pp. 509-534.
- Meinert, L. D., 1992, *Skarns and Skarns Deposits*. Geoscience Canada, v. 19, pp. 145 – 162.
- Morrison, Kingston., 1995, *Important Hydrothermal Minerals and Their Significance*. Geothermal and Mineral Services Divison, Kingston Morrison Limited.

MAKALAH ILMIAH

- Pollard, P. J., Taylor, R. G., and Peters, L., 2005, *Ages of Intrusion, Alteration, and Mineralization at The Grasberg Cu-Au Deposit, Papua, Indonesia*. Society of Economic Geologists, Economic Geology, v. 100, pp. 1005-1020.
- Robinson, G. P., Ryburn, R. J., Tobing, S. L., and Achdan, A. 1988, *Steenkool (Wasior) - Kaimana 1:250,000 Sheet Area Geological Data Record: Irian Jaya Geological Mapping Project, Geological Research and Development Centre, Indonesia in Cooperation With The Bureau Of Mineral Resources*. Australia on behalf of the Department of Mines and Energy, Indonesia and the Australian Development Assistance Bureau, 153 p.
- Sunyoto, W., MacDonald, G., and De Jong, G., 2015, *From Discovery to Inventory – PT Freeport Indonesia Story in Papua Province, Indonesia*. HAGI-IAGI-IAFMIATMI Joint Convention, Balikpapan, 2 - 4 October 2015.
- Ufford, A. I. Q., 1996, *Stratigraphy, Structural Geology, and Tectonics of Young Forearc-continent Collision, Western Central Range, Irian Jaya (Western New Guinea), Indonesia*. Dissertation, The University of Texas, Austin.

Diterima	: 17 Mei 2019
Direvisi	: 12 Juni 2019
Disetujui	: 19 Agustus 2019

APPLIED GEOSTATISTICS TO THE ASSESSMENT OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) IN CENTRAL SUMATRA BASIN**APLIKASI GEOSTATISTIK UNTUK PENILAIAN POTENSI ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) DI CEKUNGAN SUMATERA TENGAH****Josua Washington Sihotang¹ and Syaiful Alam²**¹Faculty of Geological Engineering Padjadjaran University,²Laboratory of Stratigraphy Padjadjaran University

josua16005@mail.unpad.ac.id

ABSTRACT

Thick sediment (over 2,500 m), fractured basement and high thermal gradient (up to 19.10 °C/100 m) of Central Sumatra Basin are suitable factors to have the Enhanced Geothermal System (EGS) potential. A number of 130 wells data were used to evaluate EGS of the basin. The assessment is divided into the number of estimation within grid cell (1 km x 1 km) of sediment thickness, heat flow, thermal conductivity and technical potential calculated starting from basement-sediment layer interface. The distribution of heat flow and gradient thermal values correspond to the sediment layer. The autocorrelation test indicate the data is stationary. The variance of data gets bigger after a depth over 5.5 km. According to the Breadsmore protocol, the technical potential value ranged from 0.5 MW up to 4.7 MW at the depth of 3.5 km. In addition, the lowest technical potential is 0.66 MW and the highest is 5.76 MW at a depth of 4.5 km. The ordinary kriging, using number of lags 10 in variogram modeling, estimated the technical potential distribution is higher to the southwest.

Keywords: Enhanced Geothermal Systems (EGS), Central Sumatra Basin, Geostatistics**ABSTRAK**

Ketebalan sedimen (lebih dari 2.500 m), rekahan pada batuan dasar, dan gradient thermal yang tinggi (mencapai 19,10 C/100 m) dari Cekungan Sumatera Tengah membuat cekungan ini memiliki potensi penggunaan Enhanced Geothermal System (EGS). Sebanyak 130 data sumur digunakan untuk mengevaluasi EGS dari cekungan. Penilaian dibagi ke dalam beberapa nomor estimasi di dalam grid cell (1 km x 1 km) dari ketebalan sedimen, heat flow, konduktivitas thermal, dan technical potential dihitung mulai dari muka lapisan batuan dasar dan batuan sedimen. Uji Autokorelasi mengindikasikan bahwa persebaran data bersifat stasioner. Varians data meningkat setelah kedalaman 5,5 km. Berdasarkan Beardmore Protocol, nilai technical potential beragam mulai dari 0,5 MW – 4,7 MW pada kedalaman 3,5 km. Sebagai tambahan, nilai technical potential terendah sebesar 0,66 MW dan tertinggi 5,76 MW pada kedalaman 4,5 km. Ordinary Kriging, menggunakan besar lag-10 pada pemodelan variogram, mengestimasikan bahwa distribusi technical potential lebih tinggi terdapat di sebelah Barat Daya.

Kata kunci: Enhanced Geothermal Systems (EGS), Cekungan Sumatra Tengah, Geostatistika**INTRODUCTION**

As the world largest geothermal potential, Indonesia should be the most productive country in geothermal energy utilizing. It is estimated that Indonesia has 28,910 GW

geothermal potential drawn from 312 fields in several islands (Pambudi, 2017). Unfortunately, Indonesia is only in the third rank for about 5% geothermal energy utilization ratio that shows a low utilization under USA and Philippine. Nowadays, the

whole country in this world should develop the sustainable and clean energy to overcome the greenhouse gas (GHG) emission impact. The Indonesia government is committed to enhance the geothermal energy production for fossil fuel instead. Therefore, the methodology penetration is needed to enhance the geothermal production.

Enhanced Geothermal Systems (EGS) is a method that is used to artificially create the geothermal systems included hydrothermal resources that can be used to generate electricity. The conventional geothermal energy exploitation was limited to shallow and high-enthalpy reservoirs ($>180^{\circ}\text{C}$) in volcanic areas, whereas EGS technologies may exploit in medium-enthalpy reservoirs ($80\text{-}180^{\circ}\text{C}$) situated at greater depth in the basement rock (Limberger et al, 2014). Generally, geothermal energy is limited by the size and location of the reservoir and utilizes the natural reservoir. Consequently, EGS was needed to be utilized in which can reduce these constraints by artificially create the hydrothermal reservoirs in hot and deep geological formations, where energy production had not been economical.

Technically, EGS is worked by injecting the fluid into the subsurface under carefully controlled conditions, which is creating the artificial fractures to create the permeability (U. S. Department of Energy, 2012). EGS also may reduce the emission impact that is almost entirely free of greenhouse gas (GHG) emissions. Only when the drilling phase, EGS might be released the small traces of carbon dioxide and other GHGs. Economic EGS field usually related to oil-prolific basin because it requires deep and thick sedimentary basin and high heat flow characteristic.

The geothermal electrical generation capacity is approximately 3-4 GW and hence the installed base provides approximately 20,000 GW/h of electrical energy in the United States (U. S. Department of Energy, 2012). The heat source was created due to the subject of

the East Pacific Rise under South-Western North America and was associated with uplift and extension of the Basin and Range. Thus, EGS's prospective area in the United States was concentrated in the higher heat flow area of the western region. EGS could provide the 100 GW of cost-competitive in the next 50 years in the United States (MIT, 2006). Based on those conditions, EGS is possible to be developed in Indonesia. Indonesia has a complex tectonic setting and tectonically stressed sedimentary basin as a fine target for EGS preliminary study (Hendrawan and Draniswari, 2016). Indonesian crust relatively had a good heat generation due to thick sediment and surrounded by the ring of fire. This research aims to analyse the assessment of EGS utilization in Central Sumatra Basin for Indonesia's future sustainable and clean energy.

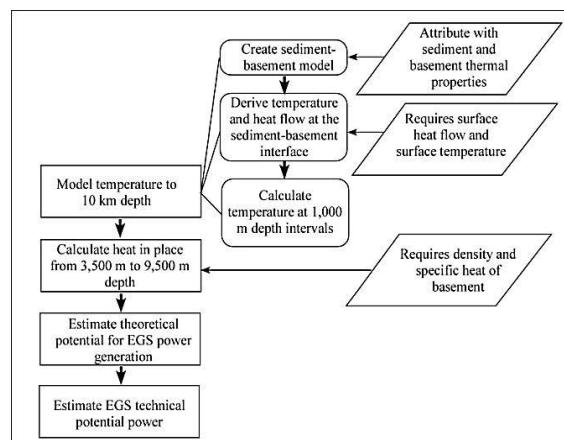


Figure 1. The Beardsmore Protocol workflow diagram (Busby and Terrington, 2017).

METHODOLOGY

The surface and subsurface data were used to identify the suitability and calculate the EGS potential in Central Sumatra Basin. The assessment was done by using the Beardsmore Protocol (Beardsmore et al, 2010). The protocol recommends assessing the EGS potential from 3-10 km depth slice by creating the model of Basement-Sediment Interface and Basement rock (Busby and Terrington, 2017). The calculation then assisted by spatial statistics considering the data distribution and

variogram modeling also kriging estimation to the depth target. The geostatistics approach mainly conducted to know the data distribution and spatial relationship. This research source was done by literature study from South East Asia Research Group (Table 1) to know the geological and heat characteristic of each well (Royal Holloway South East Asia Research Group, 2017).

The EGS potential calculating steps were compiled below based on the Beardmore Protocol:

$$Ts = To + [QoS/Ks] - As[S^2/2Ks] \dots\dots\dots(1)$$

Ts ($^{\circ}\text{C}$) is the temperature at the sediment–basement interface To ($^{\circ}\text{C}$) is the mean annual air temperature, Qo (W m^{-2}) is the surface heat flow, Ks ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) is the sediment thermal conductivity, S (m) is the sediment thickness and As (W m^{-3}) is the sediment heat generation.

$$Qs = Qo - S \cdot As \dots\dots\dots(2)$$

Qs (W m^{-2}) is the heat flow at the sediment–basement interface. The next step is to calculate the temperatures at depth of each 3000-9000 m depth slice.

$$Tx = Ts + [(Qs(X-S))/Kb] - Ab[(X-S)^2/2Kb] \dots\dots\dots(3)$$

Tx ($^{\circ}\text{C}$) is the temperature at depth X , Kb ($\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$) is basement thermal conductivity, and Ab (W m^{-3}) is the basement heat generation. According to the protocol, EGS potential is best to calculate within the basement rock.

$$H = \rho Cp Vc (Tx-Tr) \times 10^{-18} \dots\dots\dots(4)$$

Where, H (Exajoule) is the Total Heat in Place, ρ (kg m^{-3}) is the density, Cp ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$) is the specific heat of the basement cell, Vc (m^3) is the volume of the cell, Tx ($^{\circ}\text{C}$) is the temperature at depth X and $Tr = To + 80$ ($^{\circ}\text{C}$) is the mean annual air temperature. Theoretical potential assumed that the lifespan of power generation is 30 years (9.46×10^8 s). In which the Tx value is less than Tr , The H value may be negative and could be set to zero.

$$P = (\eta_{th} H \times 10^{12}) / (9.46 \times 10^8) \dots\dots\dots(5)$$

P is the Theoretical Potential EGS power in (MW), and η_{th} , is a function of inlet temperature.

$$\eta_{th} = 0.00052Tx + 0.032 \dots\dots\dots(6)$$

The technical potential power can be calculated after determining the technical limitations (Rybarch, 2010). It was assumed that this efficiency value is 1.

$$PT = 1.057 \times P \times R \dots\dots\dots(7)$$

Technical Potential (PT) for each basement cell (MW, megawatts). The R -value for the Beardmore technical potential is 0.01 (Van Wees et al, 2013).

GEOLOGY

The research area is located in a part of Central Sumatra Basin (Figure 2). This basin is called as back-arc basin that is formed by convergent activity between the Eurasian continental plate and Indo-Australian oceanic plate. The basin was formed as a NW-SE separated basin called dextral strike-slip faulting and had experienced in three tectonic deformation phases that are Eocene-Oligocene, Mesozoic compressional extensional, and Pliocene-Pleistocene compressional tectonics. Furthermore, Central Sumatra Basin has a high gradient geothermal because of the crustal fractures penetrating to the upper mantle (Eubank and Makki, 1981).

Heidrick and Aulia (1993) unveil the dominated structural fault in Central Sumatra Basin by two prominent fault sets. The more prevalent set strikes NW-SE and the other N-S. It is generally accepted that the N-S set is older and Paleogene in age. Eubank and Makki (1981) emphasized that both sets were repeatedly active during the Tertiary, and required to account for the disposition of Pematang grabens and half-grabens, also represent fundamental basement breaks in response to back-arc tension and dextral

MAKALAH ILMIAH

wrenching throughout the Tertiary. Structural styles and resulting deformational geometries that are diagnostic, statistically unique, form temporally distinct families including Beruk, Sumateran, Zamrud-Pedada and Bengkalis (Heidrick and Aulia, 1993).

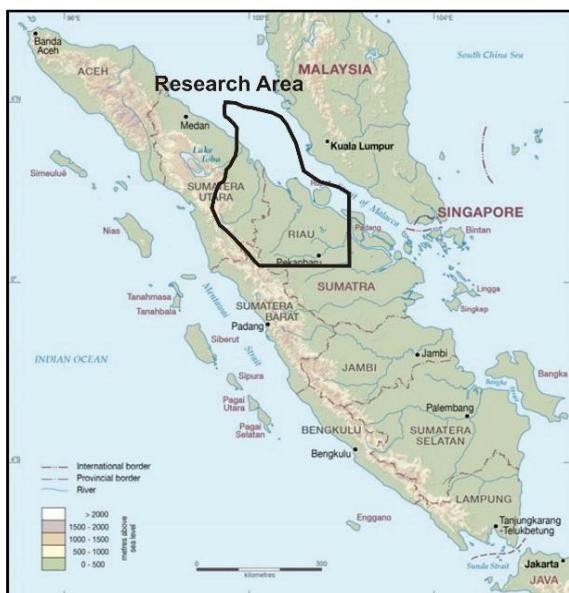


Figure 2. The research area in a part of Central Sumatra Basin

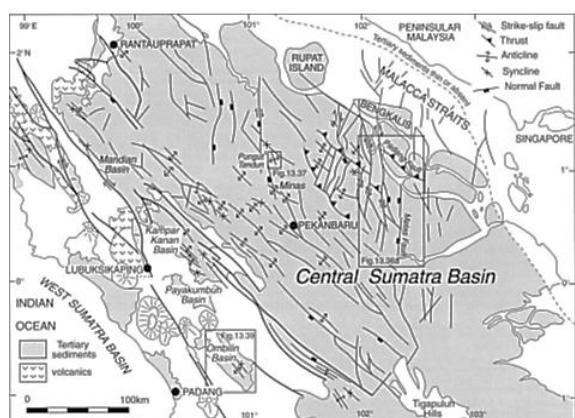


Figure 3. Geological structure in Central Sumatra Basin (Heidrick and Aulia, 1993)

Sedimentary process in Central Sumatra Basin was started at the beginning of Tertiary (Paleogene). Basement rock in Central Sumatra Basin is composed of (Eubank and Makki, 1981):

- Mallaca Terrane (Quartz Group) that is composed of quartzite, argillite, limestone crystalline and plutonic granite and granodiorite in Jura's age.
- Mutus assemblages that are composed of radiolarian chert, meta-argillite, red shale, limestone, and basaltic rocks.
- Mergui Terrane that is composed of greywacke, pebbly-mudstone, and quartzite from the Bahorok Formation. It is also found argillite, phyllite, limestone, and tuff from Kluet Formation.
- Kualu Terrane that is composed of phyllite, slate, tuff, and limestone.

There are 130 wells that were drilled, (Table 1), in this basin which are shown in modeled of technical potential (Figure 6) and (Figure 7). Gradient temperature, heat flow, sediment thickness, and thermal conductivity data were identified through the drillings and being modeled (Figure 4). The highest heat flow value can be found in the southwest area and decrease to the northeast. The highest surface heat flow (Q_o) value is 0.356 W m^{-2} and the lowest is 0.083 W m^{-2} . It is directly proportional to the EGS potential. The largest sediment thickness (S) value is 2,542 m and the lowest is 287 m. The sediment thermal conductivity (K_s) data were ranged from $1.83\text{--}2.6 \text{ W m}^{-1}$. The gradient geothermal values were ranged from $37\text{--}191^\circ\text{C km}^{-1}$.

RESULT AND DISCUSSION

RESULT

The temperature at 3.5 km and 4.5 km depths were determined before the technical potential calculation. The temperature at 3.5 km and 4.5 km depths were ranged in $104\text{--}326^\circ\text{C}$ and $121\text{--}402^\circ\text{C}$, respectively. Some of these temperatures were classified as high geothermal systems ($>150^\circ\text{C}$). The highest temperature can be found in the southwest region.

Table 1. The drillings data from 130 wells around the research area
(Royal Holloway South East Asia Research Group, 2017)

Latitude	Longitude	Well Name	Heat Flow (mW/m ²)	Sediment Thickness (m)	Thermal Conductivity (W/m)	Gradient Temperature (°C/km)
4.01	99.248333	ASAHDAN F	83	995	2.23	185.09
3.595	99.28	NSO-2S	114	581	1.97	224.58
1.561667	100.943333	UJUNG PA	227	552	2.54	576.58
1.328333	100.001667	TANAH UD	117	1267	1.89	221.13
2.446667	100.231667	PANAI-1	127	1567	2.15	273.05
1.888333	100.285	PINGANGA	98	963	2.09	204.82
1.235	100.253333	GERINGGI	106	1372	1.88	199.28
1.173333	100.106667	KUMU-1	174	741	1.91	332.34
2.248333	100.336667	BARUMUN-	118	1690	2.48	292.64
2.136667	100.468333	TOLANG-1	112	1578	2.06	230.72
2.103333	100.36	DAUN-1	114	1262	2.09	238.26
2.061667	100.386667	KARANG-1	141	1231	2.01	283.41
1.996667	100.481667	SITANGKO	154	579	1.97	303.38
1.996667	100.481667	SITANGKO	126	973	2.09	263.34
2.036667	100.533333	TANJUNGK	103	1853	2.15	221.45
1.876667	100.433333	KUBU-3	118	422	2.36	278.48
1.786667	100.426667	KUBU-2	114	1349	2.27	258.78
1.726667	100.441667	TANJUNG	105	1065	2.21	232.05
2.543333	100.523333	TANJUNG	104	845	2.2	228.8
2.655	100.465	BUAYA-1	147	941	2.19	321.93
1.511667	100.346667	KEBARO-1	124	1247	2.09	259.16
1.401667	100.406667	MAHATO-1	118	1324	1.9	224.2
1.061667	100.383333	TOBAT-1	172	593	1.89	325.08
2.893333	100.355	PINANG-1	148	1251	2.04	301.92
1.956667	100.75	DAMAR-1	119	1739	2.1	249.9
1.886667	100.755	PINANG S	129	1501	2.07	267.03
1.753333	100.7	BALAM F	127	1302	1.99	252.73
1.558333	100.626667	TANJUNG	158	718	2.13	336.54
1.251667	100.6	TANGAH-1	111	1614	1.89	209.79
1.015	100.625	KIRI-1	100	1730	1.88	188
0.786667	100.643333	KOTALAMA	198	990	2.11	417.78
0.66	100.623333	LANGGAK-	113	450	1.98	223.74
0.646667	100.706667	KASIKAN-	131	360	1.97	258.07
0.615	100.751667	TERANTAM	162	309	2.15	348.3
2.053333	100.778333	ROKAN-1	118	1868	2.23	263.14
1.92	100.915	BANTAIAN	113	465	2.33	263.29
1.756667	100.82	BANGKO F	143	1047	2.03	290.29
1.641667	100.908333	SERUNI F	156	946	1.98	308.88
0.58	100.955	SINTONG	141	1112	2	282
1.505	100.885	TELINGA-	99	1443	1.98	196.02
1.473333	100.935	SIKLADI	99	1661	2.01	198.99
1.38	100.98	KOPAR-1	119	1726	1.98	235.62
1.323333	100.803333	JORANG F	120	2223	2.01	241.2
0.905	101.055	LIBO SE-	115	1872	1.91	219.65
1.28	101.926667	RANGAU F	115	2542	2.01	231.15
1.123333	100.916667	SIALANG-	123	1994	1.94	238.62
1.043333	100.878333	WADUK-1	114	2020	1.94	221.16
1.021667	100.838333	HITAM-1	102	2029	1.93	196.86
0.986667	100.931667	TAMALUKU	106	1913	1.94	205.64
0.87	100.796667	MAWAR-1	98	2041	1.94	190.12
0.78	100.918333	LANCANG-	114	2155	1.94	221.16
0.738333	100.78	LINDAI-3	220	352	2.01	442.2
0.646667	100.876667	SURAM-2	186	600	2.01	373.86
0.616667	101.001667	PETAPAH	100	1544	1.94	194
0.598333	100.83	KUSAN-1	120	663	1.94	232.8
0.491667	100.871667	BIRUANG-	153	499	2	306
2.273333	101.003333	SENEBUI-	108	586	2.07	223.56
2.231667	101.146667	CSB-A1	90	758	2.04	183.6
1.931667	101.141667	SEMENANJ	97	643	2.17	210.49

MAKALAH ILMIAH

1,736667	101,005	UJUNG TA	173	779	1,98	342,54
1,565	101,115	RANTAUBA	134	988	2,15	288,1
1,61	101,128333	KERBAU-1	122	1220	2,02	246,44
1,481667	101,095	TINGGI-1	140	731	2,08	291,2
1,32	101,215	DURI NE-	139	609	2,12	294,68
1,37	101,135	PETANI N	103	1090	2,02	208,06
1,34	101,055	PETANI-1	102	1457	2,05	209,1
1,283333	101,08	PEMATANG	130	1981	2,1	273
1,203333	101,123333	PEMATANG	111	2347	2,03	225,33
1,191667	101,081667	PUDU FIE	118	2098	1,99	234,82
1,096667	101,216667	PINGGIR	127	1305	2,02	256,54
0,07	101,105	SANGSAM-	128	2106	1,9	243,2
0,68	101,195	KOTAGARO	115	1872	1,89	217,35
0,686667	101,105	KOTABATA	116	1581	1,92	222,72
0,535	101,04	BATU-1	102	1334	1,92	195,84
0,428333	101,178333	KAMPAR-1	112	1430	1,92	215,04
0,336667	101,018333	BANGKINA	210	561	2,33	489,3
0,223333	101,19	LIPAI-1	142	964	2,17	308,14
1,92	101,275	BULUHALA	161	405	1,94	312,34
1,851667	101,303333	PASIR-1	134	495	2,04	273,36
1,756667	101,441667	DUMAI-2	145	607	2,01	291,45
1,663333	101,441667	DUAMI-1	166	451	2,04	338,64
1,601667	101,243333	MUTUS-1	142	1014	1,96	278,32
1,39	101,265	LEBAN-1	185	610	1,99	368,15
1,155	101,3	SEMUNAI	187	604	2,06	385,22
1,053333	101,291667	TANDUN F	117	1180	1,99	232,83
0,895	101,236667	MINDAL F	131	1166	1,94	254,14
0,761667	101,438333	MINAS FI	157	945	1,92	301,44
1,88	101,465	SAHIR-1	127	563	2,06	261,62
1,765	101,55	RUPAT-1	149	287	1,94	289,06
1,73	101,678333	MESIM-1	109	1095	1,93	210,37
1,655	101,633333	PELETUNG	147	449	1,97	289,59
1,336667	101,556667	BAGANBEL	162	550	2,09	338,58
0,995	101,64	MERAK-1	124	1513	2,09	259,16
0,9	101,633333	GARIB-1	109	1532	1,95	212,55
0,705	101,58	PERAWANG	135	990	1,9	256,5
0,54	101,54	MINAS SO	135	1162	1,98	267,3
0,521667	101,576667	BARU-2A	147	975	1,92	282,24
1,318333	101,776667	SEMBILAN	194	393	2,6	504,4
0,728333	101,881667	KEUTAPAN	149	799	1,88	280,12
0,671667	101,778333	GASIP-1	153	1293	2,04	312,12
0,406667	101,836667	LAGO-1	122	1197	1,87	228,14
0,176667	101,813333	PENAR-1	105	1297	1,86	195,3
1,353333	102,148333	PAKNING	189	864	2,01	379,89
1,238333	102,101667	SIAK KEC	172	509	1,9	326,8
1,145	102,078333	PEDADA-1	238	426	2,09	497,42
1,043333	102,055	TASIB-1	197	791	2,3	453,1
0,981667	102,021667	RAYA-1	143	849	2,08	297,44
0,81	102,028333	DASAN-1	136	1469	2,04	277,44
0,771667	102,011667	RAMBAH-1	186	766	1,96	364,56
0,685	101,965	BUATAN-1	146	882	1,92	280,32
0,626667	102,06	BERUK FI	260	592	1,89	491,4
0,491667	102,05	OTAK-1	164	871	1,91	313,24
0,185	102,093333	TATAK-1	103	1673	1,88	193,64
1,161667	102,195	GUNTUNG-	141	1173	1,99	280,59
0,935	102,125	PUSAKA-1	117	1715	2	234
0,598333	102,26	ZAMRUD-1	158	1017	1,93	304,94
0,655	102,14	BUNGSU F	153	679	1,93	295,29
0,33	102,286667	SALAK-1	113	1798	1,98	223,74
2,416667	99,75	1	111	572	2,1	233,1
2,816667	100,05	4	85	2175	2,13	181,05
1,05	100,3	8	365	274	1,9	693,5
2	100,466667	19	138	744	2,12	292,56
1,966667	100,666667	26	135	1250	2,02	272,7
1,866667	100,65	27	108	1204	1,72	185,76
0,716667	100,616667	30	124	488	1,97	244,28
0,633333	100,616667	32	150	496	1,83	274,5
1,933333	100,916667	37	139	914	2,06	286,34
1,7	100,75	38	140	799	2,08	291,2
1,65	100,8	39	124	2291	2,08	257,92
1,7	100,9	41	135	1198	3,12	421,2

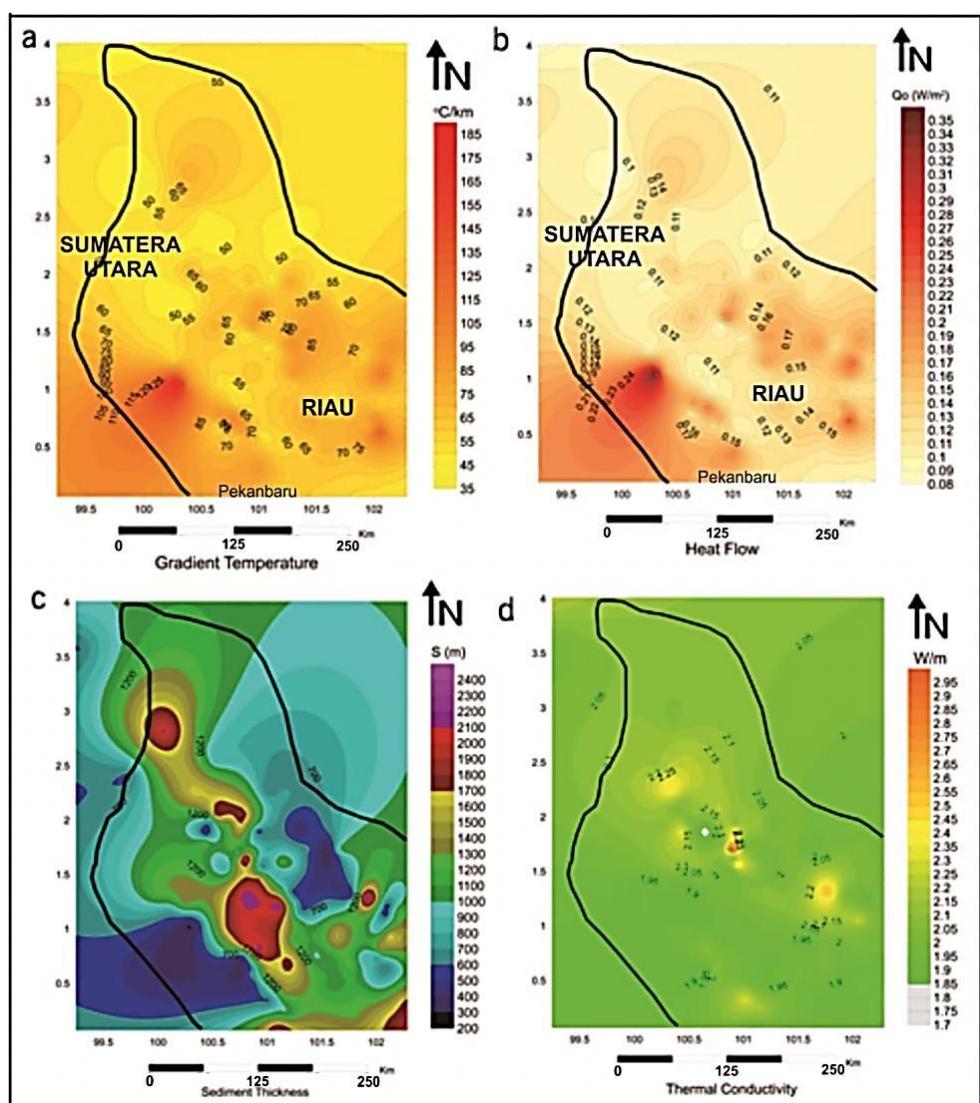


Figure 4. Modeled of a) gradient temperature b) heat flow
c) sediment thickness d) thermal conductivity

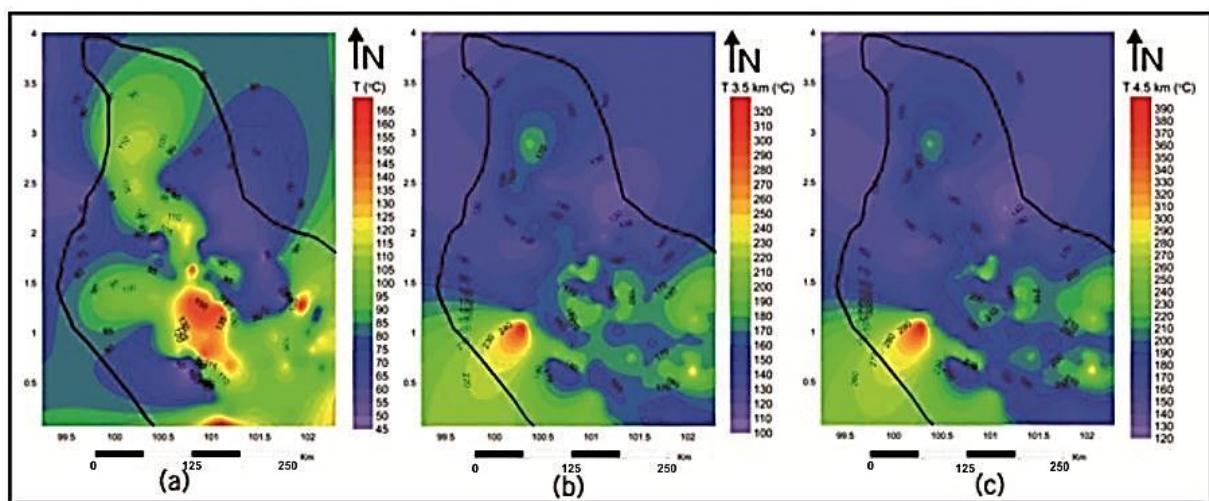


Figure 5. Modeled temperature at depth of a) basement-sediment interface
b) 3.5 km c) 4.5 km

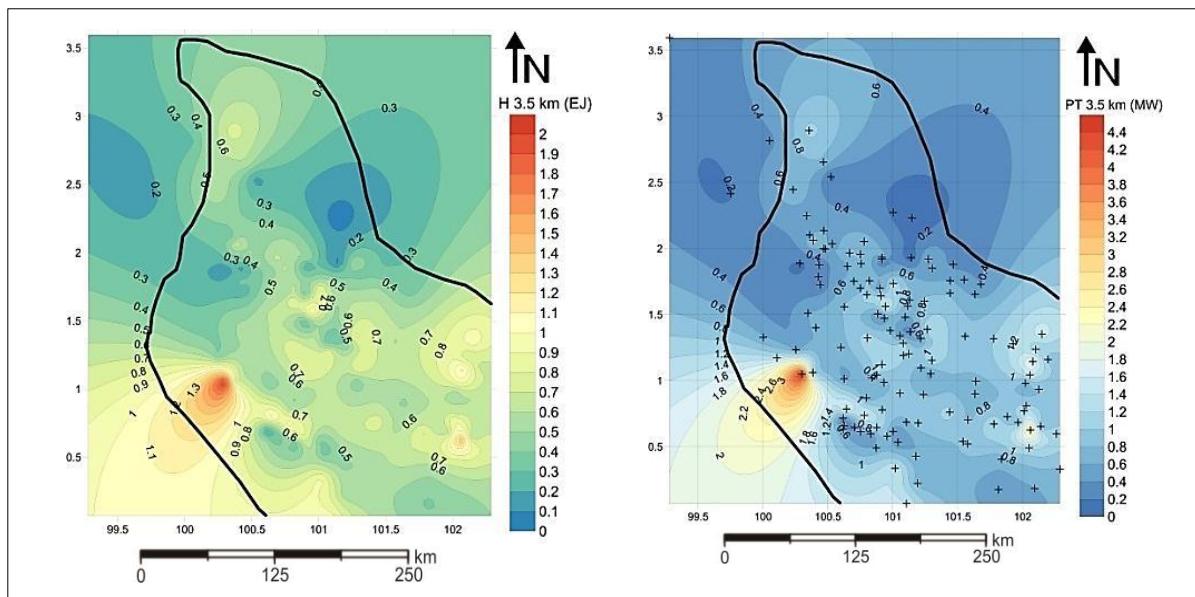


Figure 6. Modeled of a) heat in place at 3.5 km depth
b) technical potential at 3.5 km depth

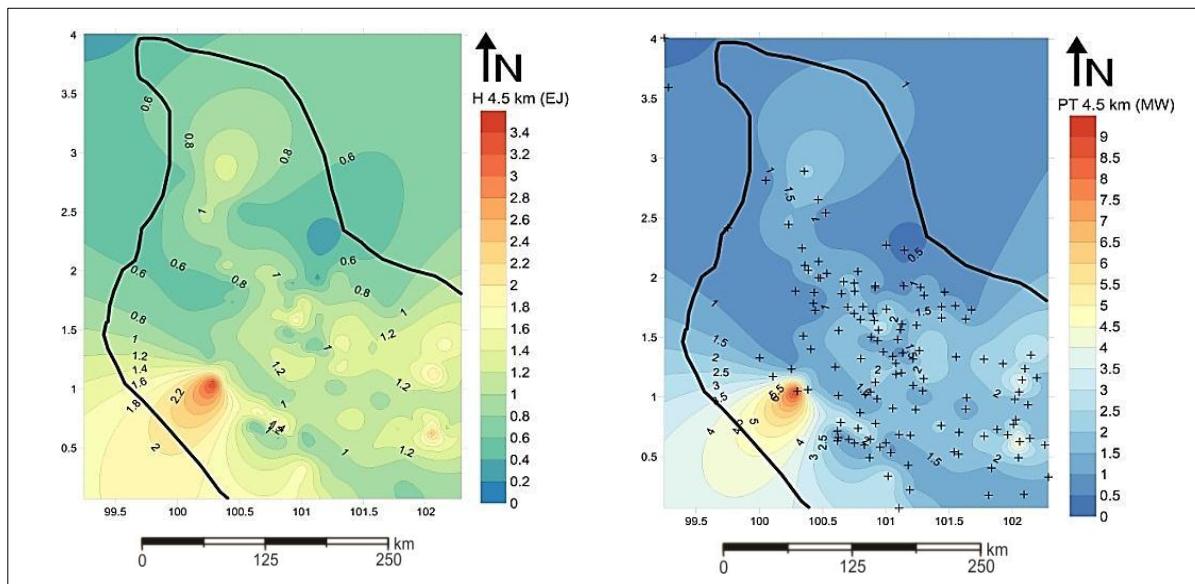


Figure 7. Modeled of a) heat in place at 4.5 km depth
b) technical potential at 4.5 km depth

The potential calculations were determined for each cell with 1 km x 1 km size. It was assumed that sediment heat generation (A_s) value was 1 W m⁻³ and the specific heat of the basement cell (C_p) value was 1000 J/kg°C (MIT, 2006). The basement rock was metamorphic rock that is rich in quartz. This lithology has the K_b value is 4.71 W m⁻¹ K⁻¹ (Clauser, 2006) due to the lithology was rich in quartz and A_b value is 1.35 W m⁻³ (Slagstad, 2008).

The technical potential was assessed in 3.5 km and 4.5 km depths due to the thickest sediment was 2,542 m and the basement rock could produce higher heat generation than sedimentary rock. The calculation of technical potential was used the thermal efficiencies for a range of inlet fluid temperatures from 150 °C to 350 °C (MIT, 2006).

TECHNICAL POTENTIAL AT 3.5 KM DEPTH

The lithology at this depth was estimated as basement rock, which is the target for the drilling. This depth is related to the heat generation of basement rock with the various patterns. The total of Heat in Place of each well is 66.05 EJ. The Theoretical Potential is ranging from 47.4 - 444.68 MW. The lowest Technical Potential in this depth is 0.5 MW and the highest is 4.7 MW. The total of technical potential of each well is 103.5 MW.

TECHNICAL POTENTIAL AT 4.5 KM DEPTH

This depth slice was recommended to drill due to the economical properties. The total Heat in Place of each well is 131.66 EJ. The Theoretical Potential is ranging from 64.78–545.45 MW. The lowest Technical Potential is 0.66 MW and the highest is 5.76 MW. The total of Technical Potential is 217.9 MW that is available to fulfill the energy demands of Central Sumatra Area.

GEOSTATISTICAL ANALYSIS

Data Distribution

The technical potential distribution were evaluated from 3.5 km to 9.5 km depth. The data distribution was showed by histogram. The bar charts plotting were made on 4 types of depth slice in order to know the variance value through the deeper depth (Figure 8). The variance value visualize the Technical Potential data distribution of each well. From the geostatistical histogram analysis, the variance data was relatively show the significant different between 4.5 km, 5.5 km, and 6.5 km depth. The variance deviation data in each of the depth is 2.361 (for 4.5 km to 5.5 km depth) and 5.4929 (for 5.5 km to 6.5 km depth). These value was significantly different with variance data in 3.5 km to 4.5 km depth that is

0.8492. Thus, the recommendation depth to be drilled is in 3.5 and 4.5 km depth due to the small variance in deviation data. Moreover, the mean data from all of the 130 wells in 3.5 and 4.5 km depth is 0.8 MW and 1.6708 MW with the median is 0.7258 MW and 1.5199 MW, respectively. After data distribution reflecting the technical depth variables (3.5 km and 4.5 km) are analyzed, the spatial relationship between those variables should be considered. The way to check are consist of covariance, coefficient correlation and variogram. To generate them, the data condition (stationary or non-stationary) are authorized by autocorrelation test. Autocorrelation is a statistical test under the assumption either stationary or non-stationary data. It is also known as serial correlation of random process with a delayed lag of itself. The following equation is simply explaining the autocorrelation function;

with;

- | | |
|------------|-----------------------------|
| $R(\tau)$ | = autocorrelation amplitude |
| $\tau + t$ | = time-lag |
| E | = expected value operator |
| T | = discrete time |
| M | = mean |
| σ^2 | = variance |

About 60 time-lag were chosen to test stationary condition or randomness of the data as shown in figure attachment. The amplitude of autocorrelation decrease rapidly as long as the increasing of time-lag.

The autocorrelation indicates the data are distributed randomly and stationary (Figure 9) and (Figure10). The amplitude of autocorrelation also does not show the critical value in upper and lower of zero value as the data boundary (reflected by the blue line). This could be as the indicator of low-correlated between the data.

MAKALAH ILMIAH

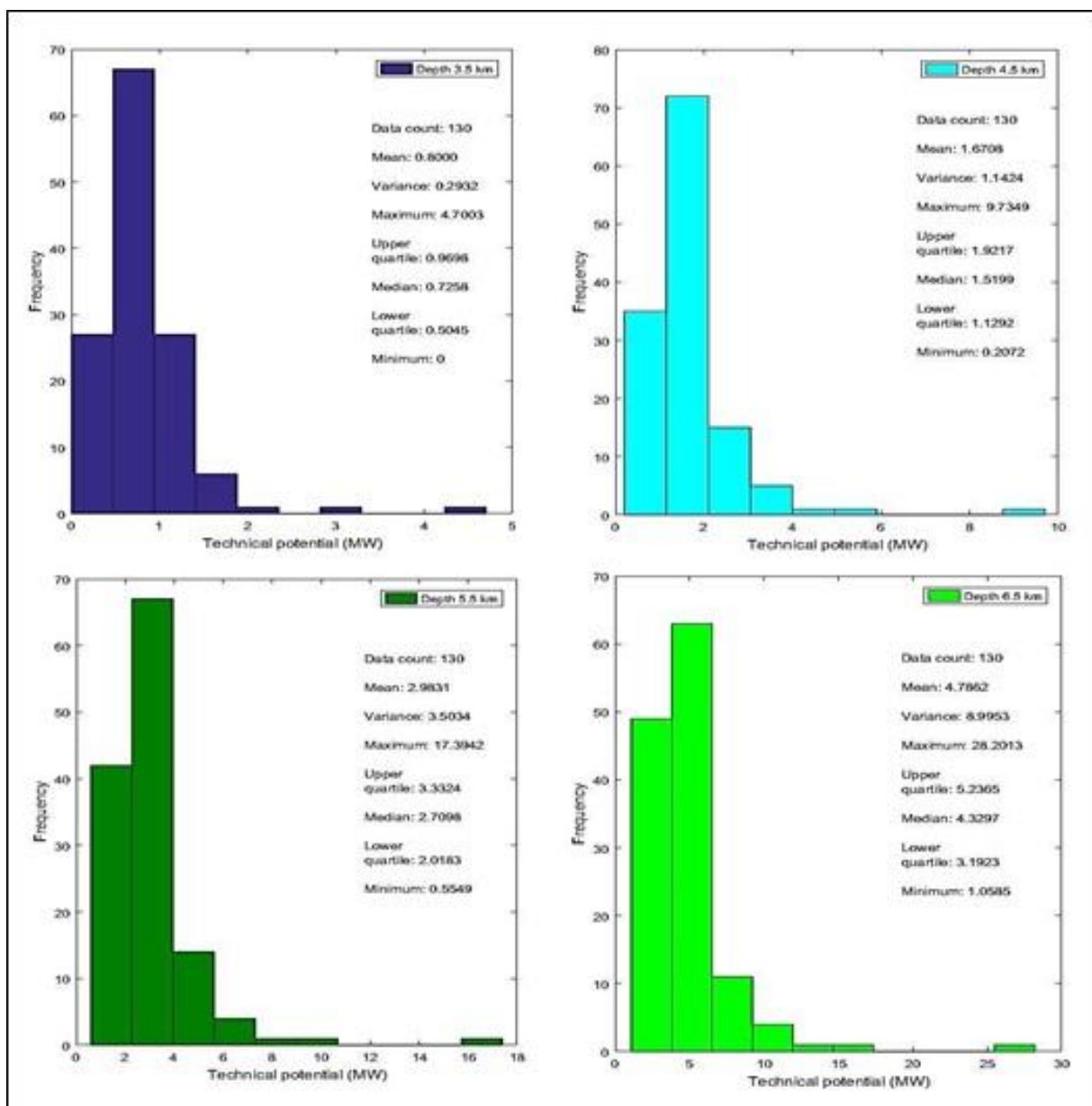


Figure 8. The Histogram Bar Charts of 3.5 km to 6.5 km depth slice

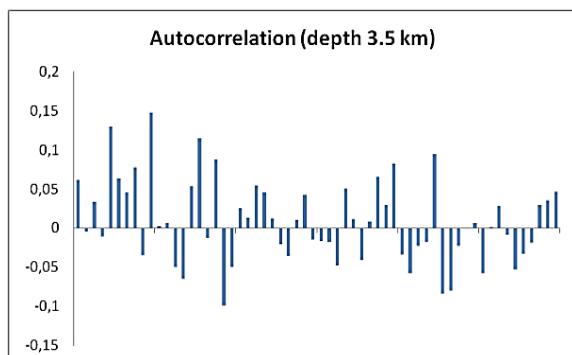


Figure 9. Autocorrelation result test at depth 3.5 km

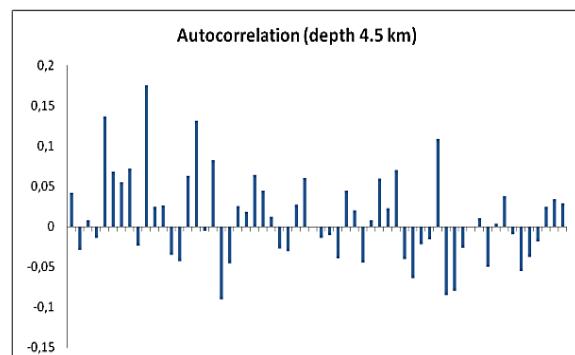


Figure 10. Autocorrelation result test at depth 4.5 km

Spatial Relationship

The spatial relationships were described by covariance and variogram to assist in choosing lag-numbers and lag-separation of kriging estimation. The ordinary kriging is chosen due to the condition of stationary of the data based on previous autocorrelation analysis. The kriging is aimed to estimate values of the technical potential of an unsampled location with minimized variance.

Theoretical Variogram Analysis

The theoretical variogram analysis was conducted in 3.5 km and 4.5 km depth due to the recommendation depth for drilling

(Figure 11) and (Figure 12). The data visualize the covariance and semivariogram to know the prediction error value. The covariance is a statistical measure of the linear association between two random variables X and Y (Lee, C.F. et al., 2000). Whereas, semivariogram is a function that relates semivariance to sampling lag (Curran, P.J., 1988). This function can be estimated using remotely sensed data or ground data and represented as a plot that gives a picture of the spatial dependence of each point on its neighbor. As the result analysis, the prediction error in 3.5 km depth is 0.000719 and 0.000828 in 4.5 km depth, respectively.

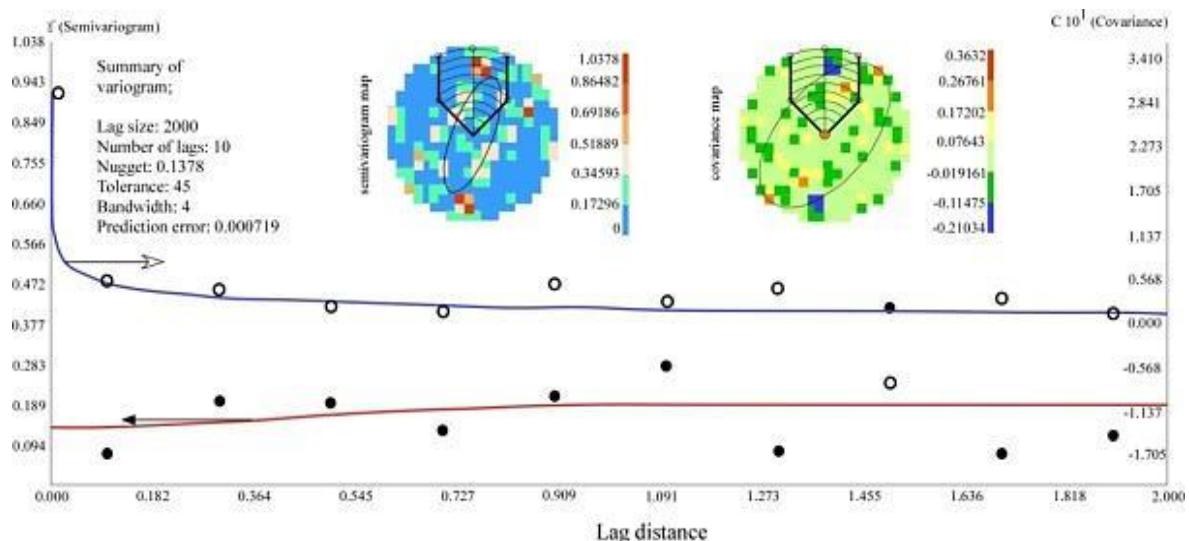


Figure 11. The Theoretical Variogram in 3.5 km depth

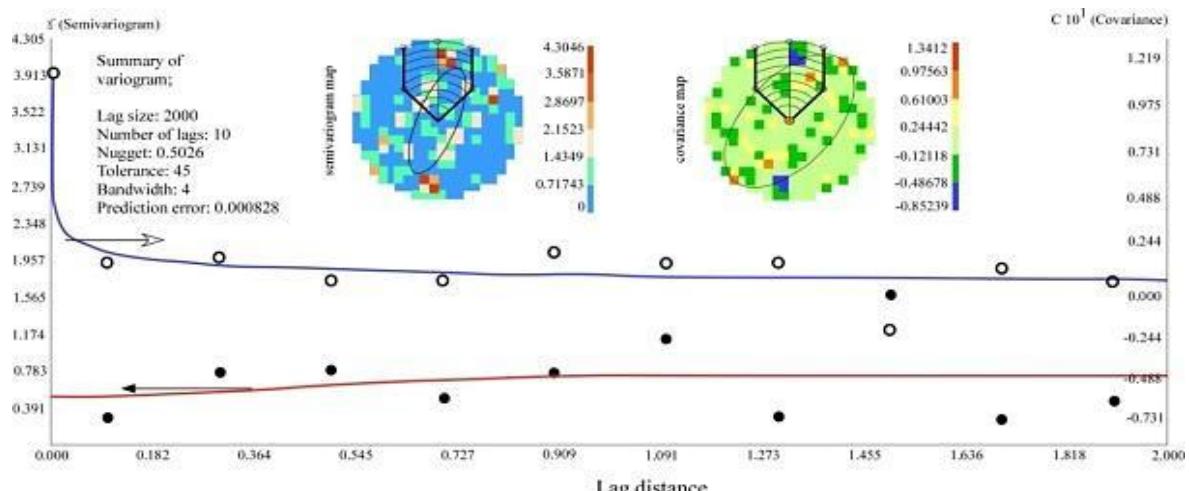


Figure 12. The Theoretical Variogram in 4.5 km depth

CONCLUSION

The Central Sumatra Basin has the potential for Enhanced Geothermal Systems (EGS) Utilization. The technical potential was classified into two slice depths that are 3.5 and 4.5 km. This was consider due to the thickness of sedimentary rock was 2,542 m and the basement rock could produce higher heat generation than sedimentary rock.

The recommended depth to drill is started from 2,600 m, which is 3.5 km and 4.5 km depth, have the low error correction and variance deviation.

The Technical Potential in Central Sumatra Basin was calculated by using the Beardsmore Protocol. The calculation was used the average cycle thermal efficiencies for a range of inlet fluid temperatures from 150 to 350°C. In 3.5 km depth, the lowest Technical Potential in this depth is 0.5 MW and the highest is 4.7 MW. In 4.5 km depth, the lowest Technical Potential is 0.66 MW and the highest is 5.76 MW. The total of technical potential in 3.5 km and 4.5 km depths are 103.5 MW and 217.9 MW, respectively. This potential could be used to fulfill the energy demands in Central Sumatra Area.

REFERENCE

- Beardsmore, G.R., Rybach, L., Blackwell, D. and Baron, C., 2010. A protocol for estimating and mapping global EGS potential. *GRC Transactions*. 34. p. 301-312.
- Busby, J. and Terrington, R., 2017. Assessment of the resource base for engineered geothermal systems in Great Britain. *Geothermal Energy*. 5(1). p. 7.
- Clauser, C., 2006. Geothermal energy. Landolt-Börnstein, group VIII: advanced materials and technologies, 3, p. 493-604.
- Curran, P. J., 1988. The Semivariogram in Remote Sensing: An Introduction. *Remote Sensing of Environment*. 24(3). p. 493-507.
- Eubank, R.T. and Makki, A.C., 1981. Structural Geology of the Central Sumatra Back-arc Basin. Indonesian Petroleum Association, Proceeding 10th Annual Convention, p. 153-196.
- Heidrick, T.L. and Aulia, K., 1993. A structural and Tectonic Model of The Coastal Plain Block, Central Sumatera Basin, Indonesia. Indonesian Petroleum Association, Proceeding 22th Annual Convention, 1, p. 285-316.
- Hendrawan, R.N. and Draniswari, W.A., 2016. Assessing the possibility of Enhanced Geothermal System in western Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 42. 012021.
- Lee, C. F., Lee, J. C., and Lee, A. C., 2000. Statistics for business and financial economics. World Scientific. 1. Singapore. p. 712.
- Limberger, J., Calcagno, P., Manzella, A., Trumpy, E., Boxem, T., Pluymaekers, M.P.D. and van Wees, J.D., 2014. Assessing the prospective resource base for enhanced geothermal systems in Europe. *Geothermal Energy Science*. 2(1). p. 55.
- Pambudi, N.A., 2017. Geothermal power generation in Indonesia, a country within the ring of fire: Current status, future development and policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81, p. 2893-2901.
- Royal Holloway South East Asia Research Group. All Heat Flow Data (Open Access). (<http://searg.rhul.ac.uk/current-research/heat-flow/>, accessed November, 20th 2017)
- Rybach, L., 2010. The future of geothermal energy and its challenges. *Proceedings World Geothermal Congress Bali 2010*, 29, p. 4.
- Slagstad, T., 2008. Radiogenic heat production of Archaean to Permian geological provinces in Norway. *Norwegian Journal of Geology*, 88, p. 149-166.

Tester, J. W., Anderson, B. J., Batchelor, A. S., Blackwell, D. D., DiPippo, R., Drake, E. and Petty, S., 2006. The future of geothermal energy: Impact of enhanced geothermal systems (EGS) on the United States in the 21st century. *Massachusetts Institute of Technology*, p. 209.

Van Wees, J., Boxe, T., Angeloni, L., and Duas, P., 2013. A Prospective Study on the Geothermal Potential in the EU. *Geoelect Report*.

Submitted	: May 23, 2019
Reviewed	: June 18, 2019
Accepted	: August 28, 2019

PREDIKSI NILAI **FIXED CARBON** SEBAGAI VARIABEL DALAM KUALITAS BATUBARA DENGAN METODA **ORDINARY POINT KRIGING** MENGGUNAKAN APLIKASI R

FIXED CARBON ESTIMATION AS VARIABLES IN COAL QUALITY BY MEANS ORDINARY POINT KRIGING METHOD USING R PROGRAMMING

Budi Nurani Ruchjana¹, Annisa Nur Falah¹, Endang Rusyaman¹, dan Nur Hamid²

¹Departemen Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran

²Departemen Geologi, Fakultas Teknik Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Mineral Indonesia
budi.nurani@unpad.ac.id

ABSTRAK

Data spasial adalah data yang diperoleh dari hasil pengukuran yang berisi informasi tentang lokasi, umumnya berdasarkan peta yang berisikan interpretasi dan proyeksi seluruh fenomena yang berada di bumi. Metoda *Ordinary Point Kriging* adalah salah satu metoda yang dapat digunakan untuk analisis data spasial dalam Geostatistika yang digunakan untuk mengestimasi nilai dari sebuah titik di lokasi tidak tersampel sebagai kombinasi linear dari nilai contoh yang terdapat di sekitar titik yang akan diestimasi. Bobot kriging diperoleh dari hasil variansi estimasi minimum menggunakan semivariogram sebagai input. Untuk studi kasus penerapan Metoda *Ordinary Point Kriging*, digunakan data karbon tertambat (*fixed carbon*) sebagai variabel kualitas batubara dari hasil uji laboratorium di PT Bumi Merapi yang menunjukkan bahwa kualitas batubara berada dalam peringkat *Lignite*. *Fixed carbon* menyatakan banyaknya karbon yang terdapat dalam material sisa setelah zat terbang (*volatile matter*) dihilangkan. Nilai *fixed carbon* sangat mempengaruhi kualitas suatu batubara, karena semakin tinggi nilai *fixed carbon* maka kualitas batubara semakin meningkat. Proses perhitungan estimasi *fixed carbon* di lokasi yang tidak tersampel menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging* dapat diselesaikan dengan package *gstat* pada Aplikasi R, dan memberikan nilai hasil estimasi mendekati nilai data sampel. Oleh karena itu, perhitungan Metoda *Ordinary Point Kriging* menggunakan aplikasi R memberikan perhitungan yang lebih mudah, cepat, dan akurat.

Kata kunci: *Ordinary Point Kriging*, *Fixed Carbon*, Aplikasi R, estimasi, lokasi yang tidak tersampel

ABSTRACT

Spatial data is a type of measurement data with location information, based on maps which contain interpretations and projections of all earth phenomena. Ordinary Point Kriging method can be used for spatial data analysis in Geostatistics. It is used to estimate the value of a point in an unobserved location as a linear combination of sample values found around the point to be estimated. Kriging quality is obtained from the results of the minimum estimation variance using semivariogram as input. As a case study, fixed carbon data are used as a variable of coal quality from the results of laboratory test at PT Bumi Merapi which indicates Lignite. Fixed carbon represents the amount of carbon in residual material after the volatile matter is removed. Coal quality increases as increasing Fixed Carbon. Fixed carbon estimation in unobserved locations using the Ordinary Point Kriging Method can be solved by package gstat on R programming, resulting in an estimated values close to the value of the sampled data. Therefore, calculations on Ordinary Point Kriging Method using the R programming provide easier, faster, and more accurate estimation.

Keywords: *Ordinary Point Kriging*, *Fixed Carbon*, *R Programming*, *estimation*, *unobserved location*

MAKALAH ILMIAH

PENDAHULUAN

Geostatistika merupakan perpaduan ilmu pertambangan, geologi, matematika, dan statistika yang awalnya dikembangkan dalam industri mineral untuk menaksir cadangan-cadangan mineral yang ada di bumi (Cressie, 1993). Dalam Geostatistika sering kali digunakan Pengali Lagrange untuk menentukan nilai maksimum atau nilai minimum dari suatu fungsi yang memiliki kendala (Varberg, et. al., 2007). Kegunaan Pengali Lagrange pada bidang Geostatistika tersebut salah satunya digunakan untuk meminimumkan variansi estimasi pada Metoda estimasi di lokasi tidak tersampel, atau yang dikenal dengan Metoda Kriging (Olea, 1999). Metoda Kriging terdiri dari beberapa macam, yaitu: Metoda *Ordinary Point Kriging* dan Metoda *Ordinary Block Kriging* yang mengasumsikan rata-rata tidak diketahui, Metoda *Simple Kriging* yang mengasumsikan rata-rata diketahui dan konstan, Metoda *Universal Kriging* yang mengasumsikan rata-rata diketahui dan tidak konstan, dan Metoda *Co-Kriging* yang merupakan gabungan dari dua atau lebih Metoda Kriging (Ruchjana, dkk. 2017). Metoda *Ordinary Point Kriging* telah digunakan dalam estimasi polutan pada dataran banjir sungai Meuse (Falah, et al., 2017a). Hasil estimasi dengan Metoda *Ordinary Point Kriging* telah dibuat konturnya dengan proyeksi ke *google map* (Gunawan, et al., 2016). Estimasi polutan tersebut dikembangkan dengan menggunakan Metoda *Universal Kriging* (Falah, et al., 2017b). Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, pada penelitian ini dibahas kegunaan Metoda *Ordinary Point Kriging* pada tambang batubara (*coal mine*). Para peneliti telah menggunakan Metoda Kriging pada tambang batubara, salah satunya digunakan untuk manajemen risiko pada industri batubara (Srivastava, 2013), kemudian digunakan untuk estimasi kualitas batubara (Ertunc, 2013). Selain itu Metoda Kriging digunakan pula untuk mengestimasi ketebalan lapisan batubara (Youkuo, et al., 2015) dan untuk

mengestimasi kuat geser batuan pada tambang batubara (Hamid, 2017).

Batubara terbentuk dari bahan organik seperti jejak kulit pohon, daun, akar, struktur kayu, spora, polen, damar, dan lain-lain. Proses pembusukan bahan organik tersebut menyebabkan perubahan baik sifat fisik maupun kimia pada waktu sebelum atau sesudah tertutup oleh endapan lainnya (Tirasonjaya dalam www.geologonesia.com, 2016).

Kualitas dari setiap endapan batubara ditentukan oleh suhu dan tekanan serta lamanya waktu pembentukan. Batubara terbentuk melalui dua tahap mulai dari proses penggambutan yang merupakan tahap biokimia, dan dilanjutkan dengan proses pembatubaraan yang merupakan tahap geokimia. Proses pembatubaraan terjadi pada rawa yang selalu tergenang air (kisaran kedalaman 0,5 – 10 meter) dengan kondisi reduksi dan sistem pengeringan yang buruk (www.geologonesia.com, 2016).

Indonesia merupakan negara yang kaya dengan sumber daya alam, termasuk batubara. Menurut data Badan Geologi, cadangan batubara saat ini mencapai 39,89 miliar ton. Namun cadangan tersebut masih tergolong kecil di tingkat dunia karena masih di kisaran rata-rata 3%-4% cadangan dunia (Kementerian ESDM dalam <https://www.cnbcindonesia.com>, 2019). Batubara dalam suatu tambang terbuka umumnya mencakup wilayah yang cukup luas dengan karakteristik spasial yang homogen. Cadangan batubara di Indonesia pada umumnya termasuk batubara peringkat rendah dengan kadar air total (air bawaan dan air total) yang mencapai 40%. (Arisandy, dkk., 2017).

Berbagai variabel yang memengaruhi kualitas batubara diantaranya adalah Zat terbang (*Volatile Matter*), Karbon Tertambat (*Fixed Carbon*), Kandungan Abu (*Ash Content*), Nilai Kalori (*Calorific Value*), dan kandungan sulfur total (*Total Sulphur*) (Schweinfurth, 2009). Variabel tersebut

diperoleh dari hasil analisis batubara dalam basis ADB (*Air Dried Basis*). Pada kondisi ADB ini *Free Moisture* tidak diikutsertakan.

Volatile matter adalah senyawa organik atau anorganik yang hilang saat batubara yang dihilangkan kandungan airnya dipanaskan pada suhu tinggi dalam waktu tertentu. Sedangkan *Calorific Value* merupakan panas yang dihasilkan, apabila batubara tersebut dibakar. Besaran nilai kalor batubara sangat ditentukan oleh jenis batubara (Arisandy, dkk., 2017). *Fixed carbon* digunakan sebagai indeks hasil kokas dari batubara pada waktu dikarbonisasikan, atau sebagai suatu ukuran material padat yang dapat dibakar di dalam peralatan pembakaran batubara setelah fraksi zat mudah menguap dihilangkan. Apabila *ash* telah dikoreksi, maka kandungan *Fixed Carbon* dapat dipakai sebagai indeks perankingan batubara dan parameter untuk mengklasifikasikan batubara.

Untuk menentukan kualitas batubara dilakukan analisis kimia pada batubara yang diantaranya berupa analisis proksimat dan analisis ultimatif. Analisis proksimat dilakukan untuk menentukan *moisture*, *volatile matter*, *fixed carbon* dan *ash*, sedangkan analisis ultimatif dilakukan untuk menentukan kandungan unsur kimia pada batubara seperti: karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, sulfur, unsur tambahan dan juga unsur jarang (www.geologonesia.com, 2016).

Uji parameter batubara dapat menggunakan analisis dalam berbagai basis analisis yang terdiri dari DMMF (*Dried Mineral Matter Free basis*), DAF (*Dry Ash Free basis*), Db (*Dry Basis*), AD (*Air Dried Basis*), dan AR (*As Received basis*) (Arisandy, dkk., 2017).

Peringkat (*rank*) dan derajat batubara ditentukan berdasarkan proses perubahan atau genesa batubara. Peringkat batubara meningkat seiring proses pembentukan batubara, dimana peningkatan peringkat ini akan meningkatkan kandungan *fixed carbon*. Peringkat batubara secara umum

mulai dari peringkat rendah ke peringkat tertinggi adalah *lignite*, batubara *sub-bituminous*, batubara *bituminous* dan *anthracite*. Secara umum berdasarkan kandungan carbon dan oksigen, klasifikasi batubara dapat diuraikan sebagai berikut:

- Gambut (*Peat*), yang merupakan cikal bakal batubara, Carbon = 60% – 64% (dmmf), Oxygen = 30% (dmmf)
- *Lignite* atau batubara muda, Carbon = 64% – 75% (dmmf), Oxygen = 20% – 25% (dmmf)
- *Sub-bituminous*, Carbon = 75% – 83% (dmmf), Oxygen = 10% – 20% (dmmf)
- *Bituminous*, Carbon = 83% – 90% (dmmf), Oxygen = 5% – 15% (dmmf)
- *Semi-anthracite*, Carbon = 90% – 93% (dmmf), Oxygen = 2% – 4% (dmmf)
- *Anthracite*, Carbon = > 93% (www.geologonesia.com, 2016).

Batubara juga dapat diklasifikasikan berdasarkan *Gross Calorific Value* (*Gross CV*) dan *fixed carbon* seperti yang disajikan pada Gambar 3 (Schweinfurth, 2009).

Berdasarkan Gambar 3, tampak bahwa *fixed carbon* merupakan salah satu variabel yang sangat mempengaruhi kualitas batubara dan perlu diestimasi untuk lokasi yang tidak tersampel dalam suatu tambang batubara. Salah satu Metoda yang dapat digunakan untuk mengestimasi variabel-variabel yang memengaruhi kualitas batubara tersebut adalah Metoda *Ordinary Point Kriging* (Ertunc, et. al., 2013). Dalam penelitian ini diterapkan Metoda *Ordinary Point Kriging* untuk estimasi *fixed carbon* dalam tambang batubara melalui data hasil uji laboratorium di PT Bumi Merapi Barat Lahat Sumatera Selatan.

Perangkat lunak yang dapat digunakan dalam proses estimasi di lokasi tidak tersampel adalah Aplikasi R yang merupakan *software open source* dan menyediakan *package gstat* untuk estimasi dengan Metoda *Ordinary Point Kriging* (Bivand, et al., 2013).

MAKALAH ILMIAH

Penelitian mengenai penerapan Metoda *Ordinary Point Kriging* pada kasus tambang batubara telah banyak dilakukan. Akan tetapi, belum banyak yang membahas mengenai estimasi kualitas batubara menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging* dengan perhitungan menggunakan Aplikasi R. Oleh karena itu, dalam penelitian ini dilakukan estimasi *fixed carbon* dengan Metoda *Ordinary Point Kriging* menggunakan Aplikasi R.

TINJAUAN PUSTAKA

Semivariogram

Semivariogram adalah ukuran korelasi spasial dari observasi di lokasi-lokasi pengamatan yang berjarak h satuan jarak. Taksiran semivariogram eksperimental pada jarak h , dapat dituliskan sebagai berikut (Youkuo, et. al., 2015):

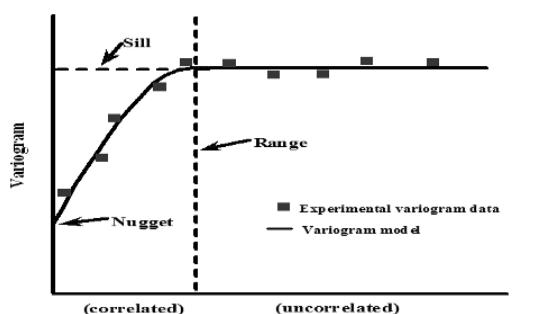
$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (1)$$

dengan:

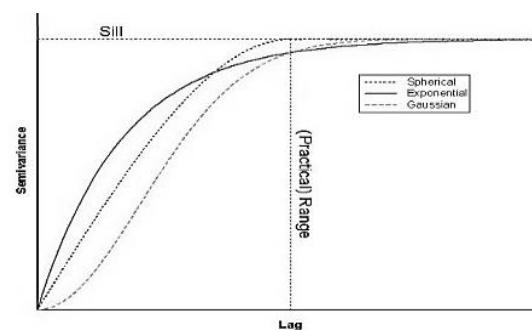
- $\hat{\gamma}(h)$: nilai semivariogram pada jarak h
- $Z(x_i)$: nilai pengamatan di lokasi x_i
- $Z(x_i + h)$: nilai pengamatan di lokasi $x_i + h$
- $N(h)$: banyaknya pasangan titik yang mempunyai jarak h
- h : jarak antara 2 pengamatan

Pasangan jarak Euclidean h dihitung menggunakan persamaan berikut:

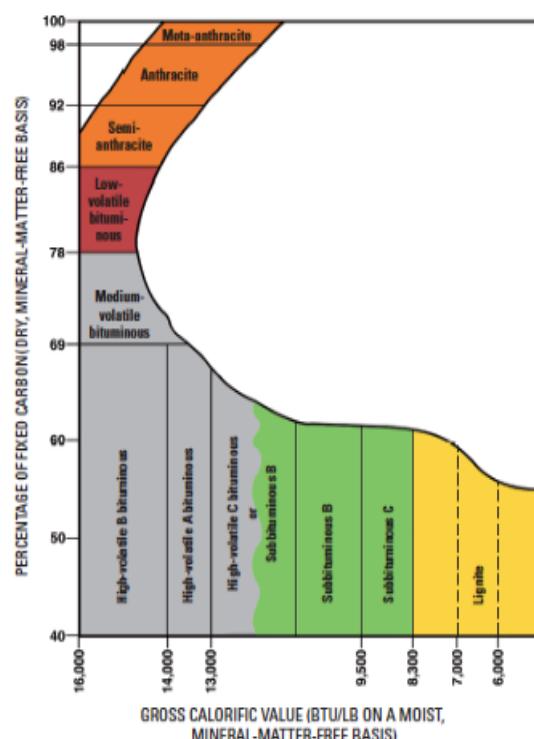
$$|h| = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (2)$$



Gambar 1. Grafik Semivariogram Eksperimental



Gambar 2. Model Semivariogram Teoretis



Gambar 3. Diagram Rank Batubara berdasarkan Calorific Value dan Fixed Carbon (Schweinfurth, 2009)

Model Semivariogram Teoretis

Model Semivariogram Teoretis yang paling umum digunakan ada 3, yaitu: Model Spherical, Model Gaussian dan Model Eksponensial (Youkuo, et al., 2015). Model teoretis tersebut dinyatakan sebagai berikut :

- Model Eksponensial

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right) \right] & , \text{untuk } h \leq a \\ c & , \text{untuk } h > a \end{cases} \quad (3)$$

- Model Gaussian

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[1 - \exp\left(\frac{-h}{a}\right)^2 \right] & , \text{ untuk } h \leq a \\ c & , \text{ untuk } h > a \end{cases} \quad (4)$$

- Model Spherical

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\left(\frac{3h}{2a} \right) - \left(\frac{h^3}{2a^3} \right) \right] & , \text{ untuk } h \leq a \\ c & , \text{ untuk } h > a \end{cases} \quad (5)$$

Dengan menghitung *error* antara model semivariogram teoretis dan semivariogram eksperimental diperoleh model semivariogram terbaik, yaitu yang memiliki jumlah kuadrat error atau *Sum Square Error* (SSE) yang minimum. Selanjutnya parameter dari model semivariogram terbaik tersebut menjadi input dalam Metoda *Ordinary Point Kriging*, yaitu terdiri dari *sill* (variansi) dan *range* (daerah pengaruh). Dengan memasukkan kedua parameter tersebut, maka diperoleh bobot kriging untuk setiap lokasi yang tidak tersampel.

Plot ketiga model semivariogram teoretis yang sering digunakan tersebut disajikan pada Gambar 2. Model spherical dari titik awal sampai mencapai *sill* memiliki plot linear, sedangkan eksponensial berpola melengkung dan Gaussian mempunyai pola kuadratik.

Metoda Ordinary Point Kriging

Metoda *Ordinary Point Kriging* dapat digunakan untuk mengestimasi nilai dari sebuah titik sebagai kombinasi linier dari nilai sampel yang terdapat di sekitar titik yang akan diestimasi. Estimator kriging dapat diartikan sebagai variabel tidak bias dan mempunyai penjumlahan dari keseluruhan bobot adalah satu. Bobot inilah yang dipakai untuk mengestimasi nilai dari berbagai variabel penentu kualitas batubara.

Penaksir atau estimator *Ordinary Point Kriging* memiliki sifat:

- Linear

Berdasarkan Wackernagel (1994) estimator *Ordinary Point Kriging* untuk dua variabel yang diperoleh dari n observasi data yang digunakan membentuk model linear, yaitu:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i)] \quad (6)$$

- Tak bias (*unbiased*)

Berdasarkan Olea (1999) estimator *Ordinary Point Kriging* bersifat tak bias jika *mean* diasumsikan tidak diketahui dan $E[Z_1(x_i) - Z(x)] = 0$, sehingga sifat estimator tak bias terpenuhi oleh Metoda *Ordinary Point Kriging*.

$$\begin{aligned} E[Z(x) - Z(x)] &= E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) - Z(x)\right] \\ &= \sum_{i=1}^n \lambda_i E[Z(x_i) - Z(x)] \\ &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

- Variansi minimum (*Best*)

Pengertian *best* dalam hal ini adalah estimator *Ordinary Point Kriging* memiliki variansi minimum. Variansi estimator dari *Ordinary Point Kriging* dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sigma_{OK}^2 &= \text{Var}[Z(x) - Z(x)] \\ \sigma_{OK}^2 &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] + \\ &\quad \sigma^2 - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z(x_i), Z(x)] \end{aligned} \quad (8)$$

Untuk memperoleh nilai minimum dari variansi error digunakan Metoda Pengali Lagrange dengan parameter Pengali Lagrange μ_1 dan μ_2 , sehingga persamaan Pengali Lagrange dinyatakan sebagai berikut (Olea, 1999):

MAKALAH ILMIAH

$$\begin{aligned} F(\lambda_i, \mu) = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \lambda_i \lambda_j \text{Cov}[Z(x_i), Z(x_j)] + \sigma^2 \\ & - 2 \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z(x_i), Z(x)] \\ & + 2\mu \left[\sum_{i=1}^n \lambda_i - 1 \right] \end{aligned} \quad (9)$$

dengan menurunkan persamaan tersebut terhadap keempat variabel, akan dapat dibentuk matriks bobot kriging sebagai berikut:

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \cdots & C_{1n} & 1 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \cdots & C_{2n} & 1 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & \cdots & C_{3n} & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & C_{n3} & \cdots & C_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} C_{10} \\ C_{20} \\ C_{30} \\ \vdots \\ C_{n0} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

dengan:

C_{nn} : Matriks variansi kovariansi antara variabel tersampel pada lokasi n dengan variabel tersampel pada lokasi n

C_{n0} : Vektor variansi kovariansi antara variabel tersampel pada lokasi n dengan variabel yang akan diestimasi di lokasi tidak tersampel

μ : Parameter Pengali Lagrange

Selanjutnya diperoleh persamaan variansi estimator *Ordinary Point Kriging* sebagai berikut:

$$\sigma_e^2 = \sigma^2 - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z(x_i), Z(x)] - \mu \quad (11)$$

Variansi estimator minimum tersebut biasa disebut dengan variansi estimator *Ordinary Kriging*, dengan demikian sifat best dimiliki oleh Metoda *Ordinary Kriging*.

METODA PENELITIAN

Tahapan Penggunaan Aplikasi R untuk Metoda Ordinary Point Kriging digambarkan melalui prosedur perhitungan

estimasi menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging* pada Aplikasi R dengan langkah-langkah sebagai berikut (Bivand, 2013):

- Aktivasi *package* yang digunakan
Package yang digunakan dalam proses perhitungan Metoda *Ordinary Point Kriging* adalah *package gstat*, *package sp*, *package plot3D*.
- Input Data
Proses input data pada Aplikasi R terdapat 2 cara yaitu, input data set yang berasal dari Aplikasi R atau input data dari file lain. *Package* yang dapat digunakan untuk mempermudah input data dari file lain adalah *package Rcmdr*.
- Periksa Kestasioneran Data
Setelah input data, data tersebut diperiksa apakah stasioner atau tidak. Jika data tersebut stasioner dan univariat maka dapat digunakan Metoda *Ordinary Point Kriging*.
- Menghitung Semivariogram
Menghitung nilai Semivariogram Eksperimental diperlukan untuk data univariat. Hal ini digunakan sebagai acuan untuk memilih Model Semivariogram Teoretis dengan menggunakan vgm.
- *Fitting* Model Semivariogram Teoretis
Memilih Model Semivariogram Teoretis yang terbaik dapat dilakukan berdasarkan plot grafik dan SSE paling minimum. Fungsi untuk memilih model terbaik adalah fit.variogram.
- Estimasi dengan Metoda *Ordinary Point Kriging*
Model Teoretis yang terbaik dijadikan input dalam perhitungan Metoda *Ordinary Point Kriging*, fungsi untuk menghitung estimasi dan variansi estimasi yang minimum adalah fungsi predict.

PEMBAHASAN

Data Penelitian

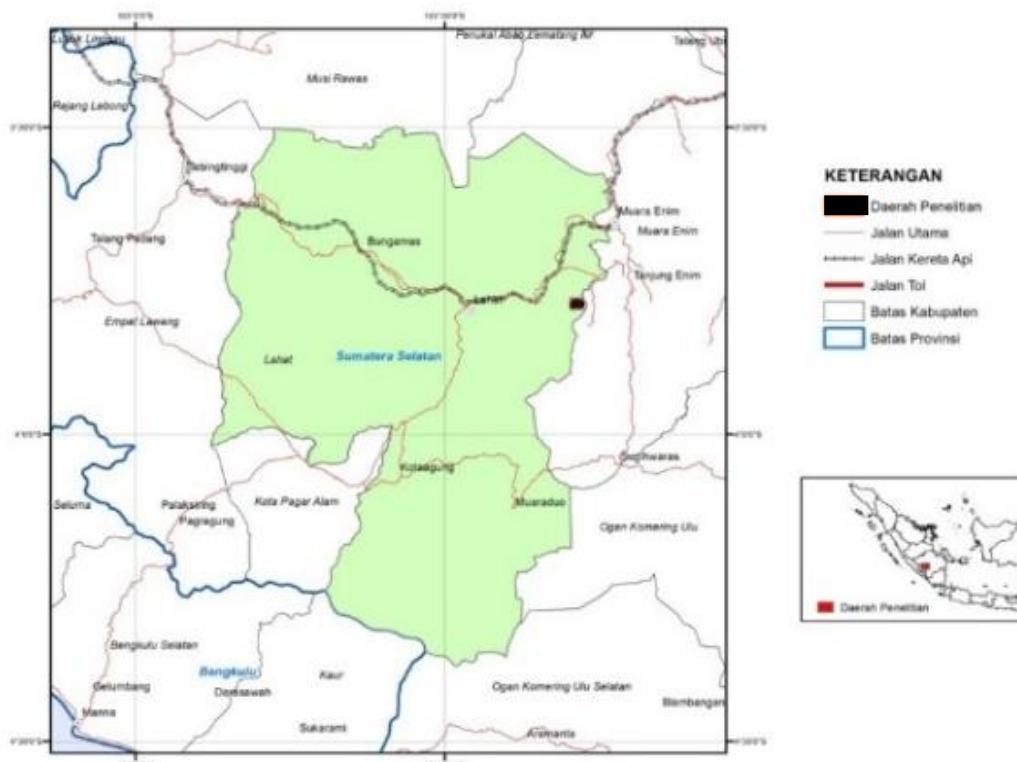
Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder hasil uji laboratorium di PT Bumi Merapi yang berada di Desa Kungkilan, Kecamatan Merapi, Kabupaten Lahat, Sumatera Selatan. Peta dari lokasi penelitian tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.

Lokasi penelitian berjarak sekitar 10 km dari Kota Lahat. Data yang diperoleh dari lokasi penelitian merupakan data hasil uji laboratorium batubara melalui analisis proksimat, sehingga diperoleh variabel-variabel penentu kualitas batubara, berupa *volatile matter* (%), *fixed carbon* (%), *ash content* (%), *calorific value* (cal/gr), dan *total sulphur* (%). Dalam penelitian ini dipilih salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap kualitas batubara, yaitu *fixed carbon*. Estimasi *fixed carbon* dilakukan dengan menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging*. Tabel 1 memperlihatkan data *fixed carbon* dalam

satuan % yang tersebar di 31 lokasi lubang bor dalam bidang 2 dimensi dengan koordinat x dan y dalam satuan meter. Untuk mengetahui ringkasan data tersebut digunakan fungsi `>summary(data)` pada Program R, hasilnya diperoleh statistika deskriptif seperti yang disajikan pada Tabel 2.

Statistika deskriptif data kualitas batubara di lokasi penelitian berdasarkan kandungan minimum dari *fixed carbon* sebesar 43,20% dan maksimum sebesar 44,00% dengan rata-rata sebesar 43,46% serta rata-rata *calorific value* 6340 cal/gr menunjukkan bahwa batubara di daerah penelitian termasuk klasifikasi *lignite* sesuai dengan kriteria pada Gambar 3. Nilai koefisien variasi yang relatif kecil (0,01) menunjukkan bahwa data tersebut relatif tidak bervariasi.

Nilai rata-rata *Fixed Carbon* selanjutnya digunakan sebagai batas ukur, jika rata-rata hasil estimasi mendekati rata-rata data sampel maka hasil estimasi tersebut bersifat akurat.



Gambar 4. Peta Lokasi Penelitian (Sumber: PT Bumi Merapi)

MAKALAH ILMIAH

Tabel 1. Data Fixed Carbon (% adb) (Sumber: PT Bumi Merapi)

Lokasi	Lubang Bor	x (meter)	y (meter)	Fixed Carbon (%)
1	SR_01	350064.6	9579122	42.8
2	SR_02	349636.2	9578921	42.5
3	SR_03	349118.7	9578758	42.9
4	SR_04	348663.5	9578788	43.9
5	SR_05	348053.6	9579045	43.5
...
27	SR_27	345990.5	9579857	44.2
28	SR_28	347376.8	9579781	42.9
39	SR_29	348982.8	9578847	44.2
30	SR_30	349854.5	9579416	42.7
31	AR_30	350059.8	9578964	43

Tabel 2. Statistika Deskriptif Data Fixed Carbon

Statistics Descriptive	Fixed Carbon (%)
Minimum	43,20
1 st Quartil	43,43
Median	43,46
Mean	43,46
3 rd Quartil	43,48
Maximum	44,00
Variansi	0,3396989
Koef. Variansi	0,01341088

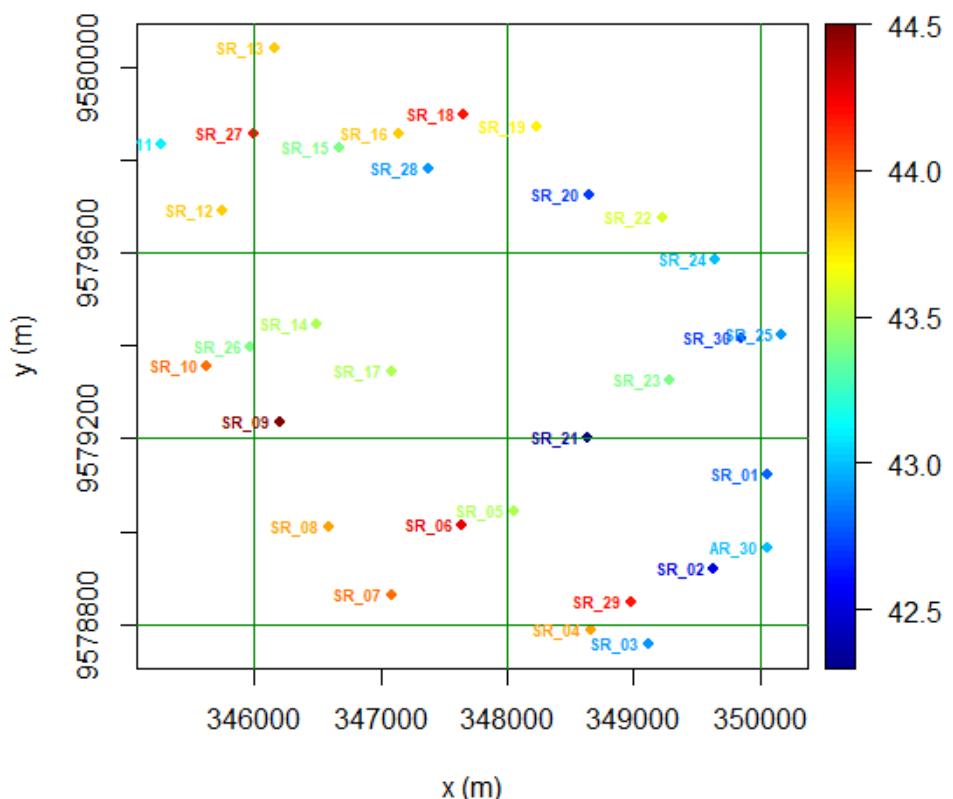
Berdasarkan Tabel 1 dibuat plot sebaran data *fixed carbon* pada 31 lokasi lubang bor terhadap lokasi koordinat x dan y seperti disajikan pada Gambar 5.

Untuk estimasi nilai *fixed carbon* di lokasi tidak tersampel menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging* diperlukan analisis struktural yang merupakan sebuah proses pencocokan semivariogram eksperimental dengan semivariogram teoretis. Nilai semivariogram eksperimental dihitung berdasarkan semua pasangan jarak yang mungkin dimana fungsi jarak yang digunakan adalah jarak *Euclidean*, sehingga diperoleh hasil seperti pada Tabel 3 dan membentuk plot semivariogram eksperimental yang ditunjukkan pada Gambar 6.

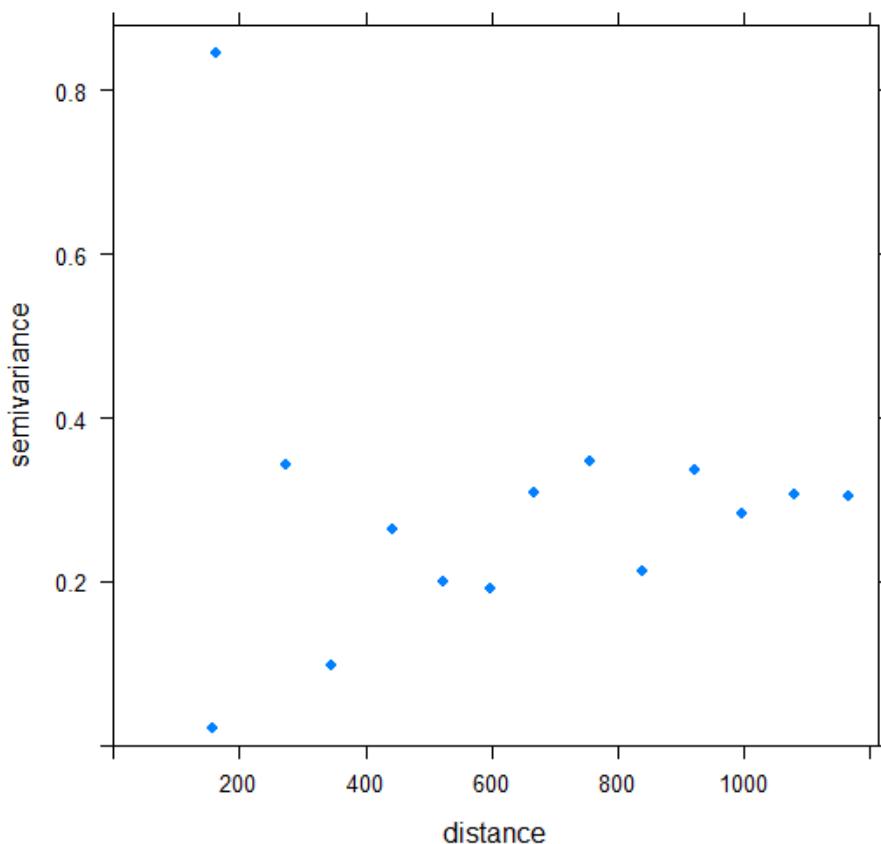
Tabel 3 di atas memperlihatkan bahwa pasangan data yang terbanyak adalah pasangan data yang memiliki jarak rata-rata sekitar 997,1352 m yang artinya bahwa kebanyakan titik-titik di lokasi tersampel yang menyebar pada tambang batubara memiliki jarak tersebut. Selanjutnya diperoleh plot rata-rata dari nilai semivariogram terhadap jaraknya

dimana semua informasi disintesa dalam satu titik per kelas jarak. Kemudian dapat dilakukan *fitting* model semivariogram eksperimental dengan semivariogram teoretisnya.

Berdasarkan Gambar 6 plot semivariogram eksperimental dijadikan sebagai grafik acuan untuk menentukan model semivariogram teoretis yang terbaik dan paling sesuai dengan plot semivariogram eksperimental. Model semivariogram teoretis yang biasa digunakan para ahli Geostatistika diantaranya Model Eksponensial, Model Gaussian, dan Model Spherical. Proses perhitungan untuk memperoleh model teoretis yang terbaik dengan menggunakan input nilai, *sill*, dan *range*. Nilai *sill* sama dengan nilai variansi dari data sampel, sedangkan *range* merupakan hasil *trial and error* untuk memperoleh model teoretis terbaik dengan nilai *Sum Square Error* (SSE) yang paling minimum. Berdasarkan hasil uji coba diperoleh nilai range sebesar 700 m yang menghasilkan model teoretis dengan SSE paling minimum yang dipilih dari ketiga model semivariogram seperti pada Gambar 7 sampai Gambar 9.



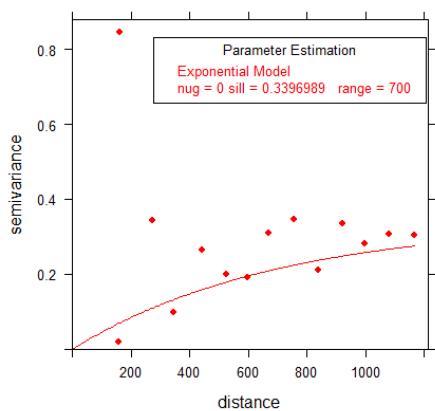
Gambar 5. Plot Sebaran Data *Fixed Carbon*



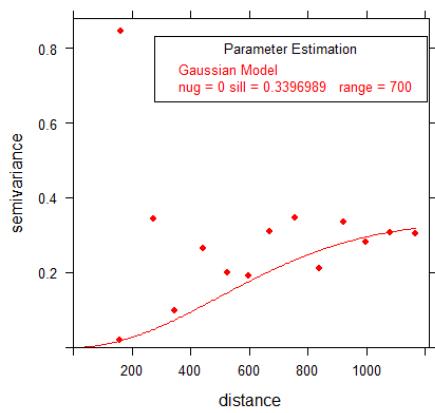
Gambar 6. Plot Semivariogram Eksperimental Data *Fixed carbon*

Tabel 3. Nilai Semivariogram Eksperimental

No	Banyaknya pasangan data yang berjarak sama	Jarak (m)	Nilai Semivariogram Eksperimental
1	1	158,0729	0,0200
2	1	162,4494	0,8450
3	6	272,6208	0,3433
4	9	346,8611	0,0972
5	14	443,0466	0,2643
6	16	523,3654	0,2003
7	15	597,9616	0,1923
8	13	667,4613	0,3092
9	11	756,7730	0,3473
10	15	838,7399	0,2117
11	12	920,6316	0,3363
12	25	997,1352	0,2820
13	18	1080,09	0,3064
14	8	1165,526	0,3050



Gambar 7. Model Eksponensial

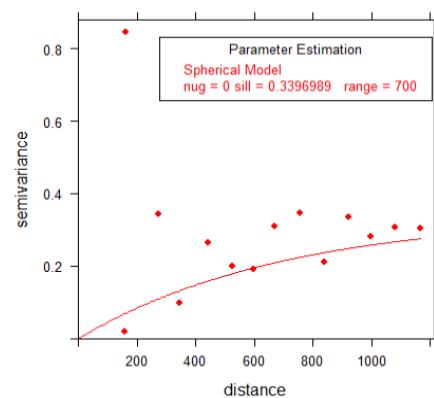


Gambar 8. Model Gaussian

Berdasarkan hasil *fitting* ketiga model semivariogram teoretis secara kasat mata dapat dilihat bahwa Model Gaussian yang paling cocok dengan plot semivariogram eksperimental. Untuk memperoleh

perhitungan yang lebih akurat dihitung SSE dari ketiga model tersebut pada Tabel 4.

Berdasarkan Tabel 4 dapat dilihat bahwa dari ketiga model semivariogram teoretis yang memiliki SSE paling minimum adalah Model Gaussian sama seperti hasil *fitting* berdasarkan grafik, sehingga dapat disimpulkan bahwa parameter model semivariogram terbaik digunakan sebagai input pada perhitungan estimasi dengan Metoda *Ordinary Kriging* adalah parameter *sill* dan *range* Model Gaussian; sedangkan untuk 120 posisi lokasi tidak tersampel berikut koordinatnya diperoleh hasil seperti yang disajikan pada Tabel 5.



Gambar 9. Model Spherical

Tabel 4. SSE Model Semivariogram Teoretis

SSE		
Eksponensial	Gaussian	Spherical
0,00033	0,000160	0,000191

Tabel 5. Estimasi di Lokasi Tidak Tersampel

Lokasi	Koordinat	Estimasi (%)
1	(349425, 9579763)	43,00135
2	(349426, 9579764)	43,00086
3	(350063, 9578921)	43,06954
4	(350065, 9579123)	43,01693
5	(349212, 9578992)	43,25032
6	(349213, 9578993)	43,24983
7	(349635, 9578920)	43,17007
8	(349637, 9578922)	43,16908
9	(349468, 9579543)	43,04818
10	(349469, 9579544)	43,04769
11	(349117, 9578757)	43,33318
12	(349119, 9578759)	43,3322
13	(349530, 9579917)	42,93701
14	(349531, 9579918)	42,93651
15	(348662, 9578787)	43,43144
16	(348664, 9578789)	43,43046
17	(347899, 9579850)	43,33362
18	(347900, 9579851)	43,33313
19	(348052, 9579044)	43,50669
20	(348054, 9579046)	43,50571
21	(348738, 9579978)	43,10585
22	(348739, 9579979)	43,10535
23	(347644, 9579011)	43,60968
24	(347646, 9579013)	43,6087
25	(348216, 9579113)	43,45083
26	(348217, 9579114)	43,45033
27	(347088, 9578861)	43,77682
28	(347090, 9578863)	43,77585
29	(347277, 9579502)	43,56741
30	(347278, 9579503)	43,56692
31	(346588, 9579010)	43,85333
32	(346590, 9579012)	43,85235
33	(345591, 9579511)	43,95189
34	(345592, 9579512)	43,9514
35	(346197, 9579234)	43,88506
36	(346199, 9579236)	43,88408
37	(346666, 9579995)	43,58035
38	(346667, 9579996)	43,57986
39	(345624, 9579355)	43,98478
40	(345626, 9579357)	43,9838
41	(349061, 9578790)	43,33772
42	(349062, 9578791)	43,33723
43	(345268, 9579833)	43,94205
44	(345271, 9579835)	43,94085
45	(346262, 9579964)	43,68106
46	(346263, 9579965)	43,68057
47	(345753, 9579688)	43,86903
48	(345755, 9579690)	43,86806
49	(348799, 9579707)	43,16176
50	(348810, 9579708)	43,15895

MAKALAH ILMIAH

Lokasi	Koordinat	Estimasi (%)
51	(346160, 9580039)	43,68498
52	(346162, 9580041)	43,684
53	(345554, 9579865)	43,86858
54	(345555, 9579866)	43,86809
55	(346501, 9579443)	43,76123
56	(346502, 9579444)	43,76074
57	(349323, 9579534)	43,08437
58	(349324, 9579535)	43,08388
59	(346673, 9579825)	43,62279
60	(346675, 9579827)	43,62181
61	(345511, 9579481)	43,97792
62	(345512, 9579482)	43,97743
63	(347142, 9579856)	43,50686
64	(347144, 9579858)	43,50588
65	(347177, 9579459)	43,60159
66	(347178, 9579460)	43,6011
67	(347088, 9579343)	43,65212
68	(347090, 9579345)	43,65115
69	(348957, 9579639)	43,14257
70	(348958, 9579640)	43,14207
71	(347661, 9579896)	43,37675
72	(347663, 9579898)	43,37577
73	(348276, 9579502)	43,33631
74	(348277, 9579503)	43,33582
75	(348236, 9579871)	43,25011
76	(348238, 9579873)	43,24913
77	(349780, 9578997)	43,11625
78	(349781, 9578998)	43,11575
79	(348646, 9579723)	43,19321
80	(348648, 9579724)	43,19249
81	(350056, 9579631)	42,88784
82	(350057, 9579632)	42,88734
83	(348638, 9579202)	43,32979
84	(348640, 9579203)	43,32907
85	(345737, 9579927)	43,81073
86	(345738, 9579928)	43,81025
87	(349229, 9579673)	43,07037
88	(349231, 9579675)	43,06939
89	(346541, 9578912)	43,88948
90	(346542, 9578913)	43,88899
91	(349287, 9579326)	43,14653
92	(349289, 9579328)	43,14554
93	(346901, 9579824)	43,57063
94	(346902, 9579825)	43,57014
95	(349647, 9579582)	42,99626
96	(349649, 9579584)	42,99527
97	(345976, 9579987)	43,74056
98	(345977, 9579988)	43,74007
99	(350175, 9579422)	42,91392
100	(350177, 9579424)	42,91293
101	(349747, 9578858)	43,15986

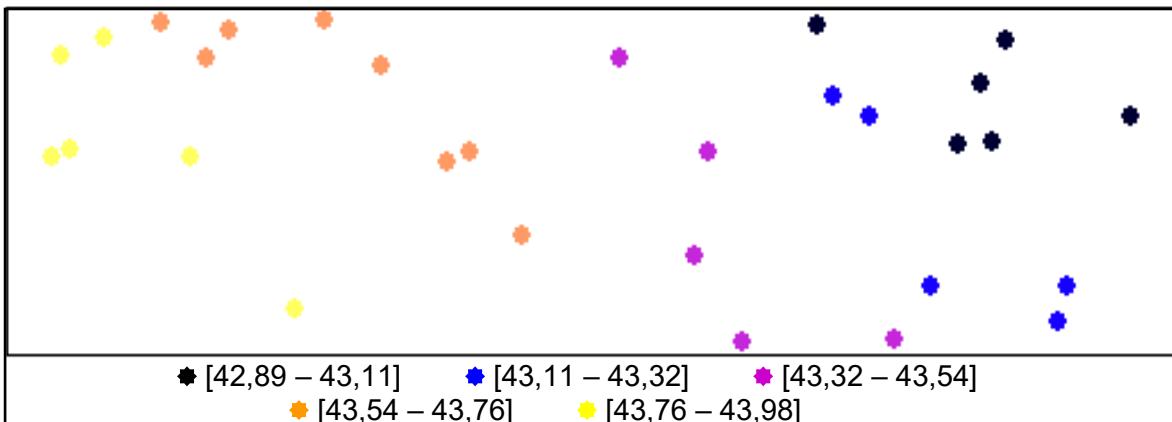
Lokasi	Koordinat	Estimasi (%)
102	(349748, 9578859)	43,15936
103	(345974, 9579394)	43,89468
104	(345975, 9579396)	43,89394
105	(347497, 9579183)	43,59917
106	(347498, 9579182)	43,5992
107	(345989, 9579856)	43,77155
108	(345991, 9579858)	43,77057
109	(346102, 9579485)	43,84182
110	(346103, 9579486)	43,84133
111	(347375, 9579780)	43,47283
112	(347377, 9579782)	43,47185
113	(348420, 9578789)	43,4872
114	(348421, 9578790)	43,4867
115	(348981, 9578846)	43,34191
116	(348983, 9578848)	43,34093
117	(346168, 9579856)	43,73058
118	(346169, 9579857)	43,73009
119	(349853, 9579415)	42,9912
120	(349855, 9579417)	42,99021

Tabel 6. Statistika Deskriptif Data Estimasi *Fixed Carbon*

Statistics Descriptive	Fixed Carbon (%)
Minimum	42,89
1 st Quartil	43,16
Median	43,48
Mean	43,46
3 rd Quartil	43,75
Maximum	43,98
Variansi	0,1039567
Koef. Variansi	0,00741885

Berdasarkan Tabel 5 diperoleh hasil estimasi *Fixed Carbon* pada 120 lokasi tidak tersampel dengan perhitungan menggunakan Metoda *Ordinary Point Kriging* dengan rata-rata hasil estimasi 43,46 % yang nilainya sama dengan rata-rata data sampel yang sebenarnya, yaitu di sekitar nilai 43,46%. Kualitas *Fixed Carbon* yang kurang dari 60% ini menunjukkan bahwa klasifikasi batubara di lokasi penelitian merupakan rank *Lignite*. Koefisien variasi data estimasi di 120 lokasi tidak tersampel bernilai 0,007 menunjukkan data estimasi memiliki variasi cukup kecil, sehingga estimasi di 120 lokasi tidak tersampel juga mendukung hasil penelitian bahwa variabel tersebut merupakan *Fixed Carbon*. Secara keseluruhan hasil penerapan Metoda *Ordinary Point Kriging* menggunakan

Aplikasi R, dalam perhitungan estimasi nilai variabel di lokasi tidak tersampel dapat dilakukan dengan mudah dan cepat serta memberikan hasil yang akurat. Hal ini ditunjukkan dengan rata-rata nilai estimasi mendekati rata-rata nilai sebenarnya. Hasil estimasi variabel *Fixed Carbon* tersebut selanjutnya dipetakan berupa plot dalam nilai interval yang digambarkan berupa titik-titik dalam warna yang berbeda seperti disajikan pada Gambar 10. Hasil plot menunjukkan posisi lokasi yang memiliki estimasi dari interval terendah ke interval tertinggi, semakin ke kiri nilai estimasi semakin tinggi. Estimasi *fixed carbon* tersebut dapat digunakan sebagai rekomendasi bagi pengambil kebijakan dalam eksplorasi pertambangan batubara di suatu wilayah berdasarkan kajian Geostatistika menggunakan Aplikasi R.



Gambar 10. Plot Hasil Estimasi menggunakan Metoda OK

KESIMPULAN

Estimasi *fixed carbon* sebagai variabel dalam kualitas batubara dengan Metoda *Ordinary Point Kriging* di 120 lokasi tidak tersampel memberikan nilai rata-rata mendekati rata-rata data sampel. Hal ini menunjukkan bahwa Metoda *Ordinary Point Kriging* tepat digunakan untuk mengestimasi nilai observasi di lokasi tidak tersampel secara teoritis. Hasil penerapan pada data lapangan dengan bantuan package gstat pada Aplikasi R memberikan perhitungan yang lebih cepat, lebih mudah dan akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Rektor Universitas Padjadjaran yang telah mendanai penelitian ini melalui *Academic Leadership Grant* (ALG) dan RKDU 2018/2019 serta kepada reviewer atas masukan dan saran yang sangat berharga dalam penyempurnaan paper ini.

DAFTAR PUSTAKA

Arisandy, A. A., Nugroho, W., Winaswangusti A. U. (2017). Peningkatan Kualitas Batubara Sub *Bituminous* Menggunakan Minyak Residu Di PT X Samarinda, Kalimantan Timur. *Jurnal Teknologi Mineral FT UNMUL*, **5** (1), 1-6.

- Bivand, R. S., Pebesma, E., & Rubio, V. G. (2013). *Applied Spatial Data Analysis with R Second Edition*. New York: Springer.
- Cressie, N. A. (1993). *Statistics For Spatial Data*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Ertunc, G., Tercan, A. E., Hindistan, M. A., Unver, B., Unal, S., Atalay, F., & Killioglu, S. Y. (2013). Geostatistical estimation of coal quality variables by using covariance matching constrained kriging. *International of Coal Geology*, **112**, 14-22, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2012.11.014>.
- Falah, A. N., Abdullah, A. S., Parmikanti, K., & Ruchjana, B. N. (2017a). Prediction of Cadmium Pollutant With Ordinary Point Kriging Method Using GStat-R. *AIP Conference Proceedings: The 2nd International Conference on Applied Statistics (ICAS II 2016)*, **1827**, 020019 <https://doi.org/10.1063/1.4979435>.
- Falah, A. N., Subartini, B., & Ruchjana, B. N. (2017b). Application of universal kriging for prediction pollutant using GStat R. *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, **893**, doi :10.1088/1742-6596/893/ 1/012022, 1-7.

- Gunawan, A. A., Falah, A. N., Faruk, A., Lutero, D. S., Ruchjana, B. N., & Abdullah, A. S. (2016). Spatial Data Mining for Predicting of Unobserved Zinc Pollutant using Ordinary Point Kriging. *IEEE: International Workshop on Big Data and Information Security* 978-1-5090-3477-2/16/\$31.00 83-88.
- Hamid, N. (2017). *Distribusi Kuat Geser Batuan pada Formasi Muara Enim di Kecamatan Merapi Barat, Kabupaten Lahat, Provinsi Sumatera Selatan Menggunakan Metoda Kriging, Disertasi, Tidak Diterbitkan*. Bandung: Aplikasi Pascasarjana Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran.
- Olea, R. A. (1999). *Geostatistics for engineers and earth scientists*. New York: Kluwer Academic Publishers.
- Ruchjana, B. N., Abdullah, A. S., & Falah, A. N. (2017). *Penerapan Aplikasi GStat Berbasis R untuk Geostatistika dengan Pendekatan Spasial Data Mining*. ISBN 602640827-4 Jatinangor: ALQAPRINT.
- Schweinfurth, S. P. (2009). *An Introduction to Coal Quality*. Virginia.
- Srivastava, R. M. (2013). Geostatistics: A toolkit for data analysis, spatial prediction and risk management in the coal industry. *International Journal of Coal Geology*, **112**, 2-13, <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2013.01.011>.
- Varberg, D., Purcell, E., & Rigdon, S. (2007). *Calculus Ninth Edition*. Pearson Education, Inc.
- Wackernagel, H. (1994). Cokriging versus kriging in regionalized multivariate data analysis. *Elsevier Science B. V.*, 83-92.
- Youkuo, C., Yongguo, Y., & Wangwen, W. (2015). Coal Seam Thickness Prediction based on Least Squares Support Vector Machines and Kriging Method. *EJGE*, **20** Bund. 1 167-176. <https://www.geologonesia.com/2016/01/tempat-dan-proses-pembentukan-batubara.html>
- <https://www.cnbcindonesia.com/news/20190624120905-4-80160/cadangan-batu-barai-naik-jadi-3989-miliar-ton>

Diterima	: 19 Februari 2019
Direvisi	: 08 Juni 2019
Disetujui	: 30 Agustus 2019

PEMODELAN INVERSI 2-D DAN 3-D MENGGUNAKAN DATA MAGNETOTELURIK DAERAH PANAS BUMI MASSEPE KABUPATEN SIDENRENG RAPPANG, PROVINSI SULAWESI SELATAN

2-D AND 3-D INVERSION MODELLING USING MAGNETOTELLURIC DATA AT MASSEPE GEOTHERMAL AREA, SIDENRENG RAPPANG REGENCY, SOUTH SULAWESI PROVINCE

Wiwid Joni dan Rina Wahyuningsih

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi

joniwiwid@gmail.com

ABSTRAK

Pemodelan inversi 2-D dan 3-D data magnetotelurik (MT) dari daerah panas bumi Massepe memberikan hasil delineasi area prospek yang lebih jelas yaitu di sekitar mata air panas Pajalele seluas $\pm 8 \text{ km}^2$. Zona *upflow* sistem panas bumi Massepe ini diperlihatkan oleh adanya anomali tahanan jenis rendah $< 20 \text{ Ohm-m}$ di kedalaman 250 m yang semakin tinggi mulai kedalaman 700 m s.d. 800 m. Zona transisi nilai tahanan jenis ini diduga sebagai kedalaman puncak reservoir sistem panas bumi Massepe yaitu di kedalaman 800 m. Anomali tahanan jenis data magnetotelurik juga menunjukkan pola yang sesuai dengan keberadaan struktur geologi di daerah ini terutama struktur Sesar Massepe berarah relatif utara-selatan yang mengontrol kemunculan mata air panas di Pajalele dan Alakuang.

Kata Kunci: Massepe, magnetotelurik, Inversi 2-D dan 3-D, panas bumi

ABSTRACT

2-D and 3-D inversion modeling using magnetotelluric data from Massepe geothermal area gives a clearer delineation of the prospect area $\pm 8 \text{ km}^2$ located around Pajalele hot spring. The Massepe geothermal upflow zone is shown by the presence of a low resistivity anomaly of $< 20 \text{ Ohm-m}$ at a depth of 250 m which is getting higher from a depth of 700 m - 800 m. The transition zone of the resistivity value at 800 m deep is thought to be the top of reservoir of Massepe geothermal system. Resistivity anomalies of these magnetotelluric data also indicate a pattern that is consistent with the presence of geological structures in this area, especially the relatively north-south direction of the Massepe Fault structure that controls the emergence of Pajalele and Alakuang hot springs.

Keywords: Massepe, magnetotelluric, 2-D and 3-D inversion, geothermal

PENDAHULUAN

Tatanan geologi Indonesia yang membentuk busur vulkanik memanjang dari utara Pulau Sumatera, Pulau Jawa, Kepulauan Nusa Tenggara hingga Pulau Sulawesi bagian utara dan Kepulauan Maluku memberikan kontribusi terhadap besarnya potensi panas bumi di Indonesia. Namun demikian potensi panas bumi di Indonesia juga muncul di luar jalur vulkanik tersebut, yang umum disebut sebagai potensi panas bumi non-vulkanik. Sebagai

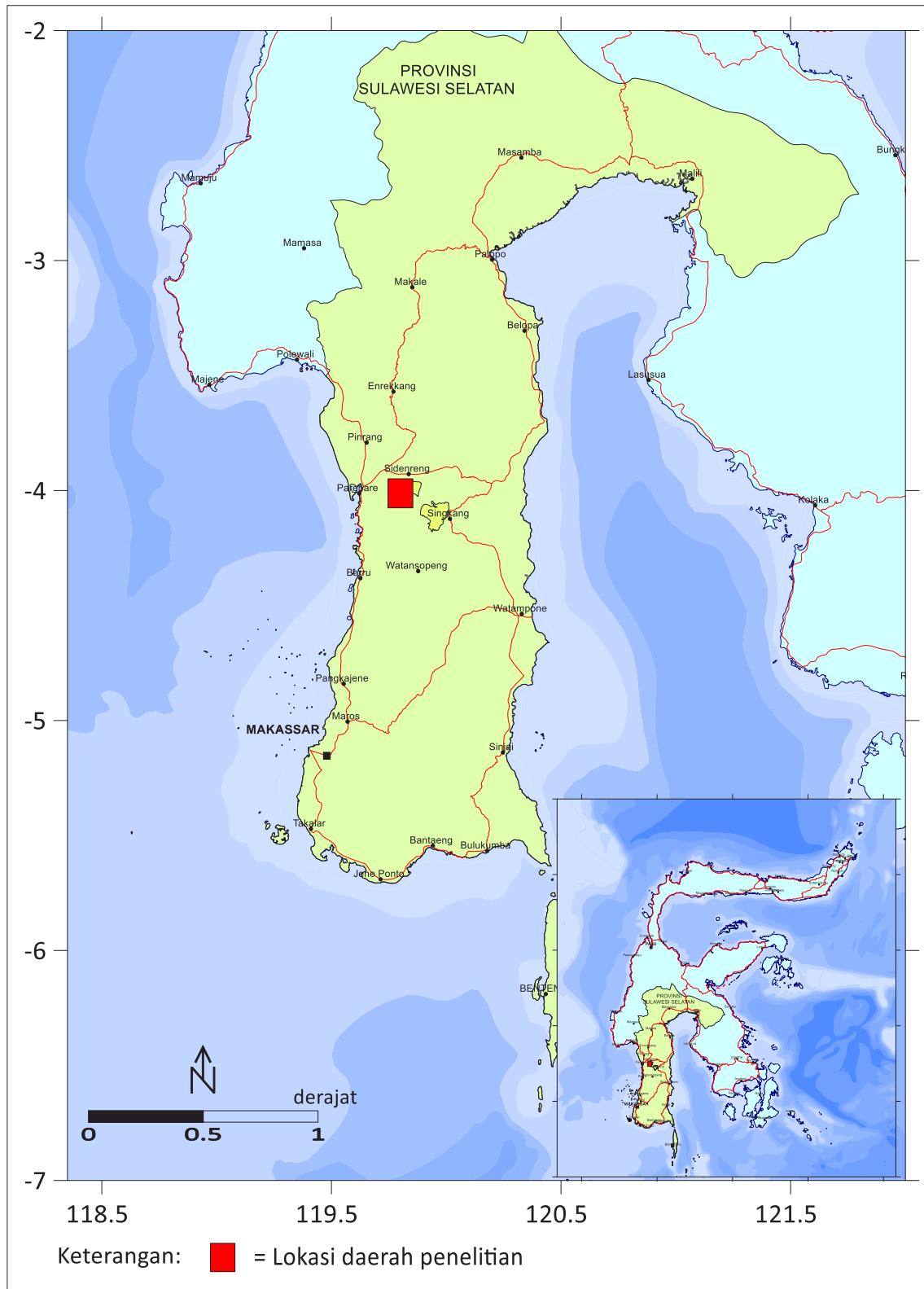
contoh, potensi panas bumi non-vulkanik ini terdapat di sebagian wilayah Pulau Sulawesi. Beberapa sumber panas dari sistem panas bumi non-vulkanik diperkirakan berasosiasi dengan munculnya tubuh-tubuh plutonik dan sisa panas dari aktifitas vulkanik berumur Tersier (Anonim, 2015).

Salah satu potensi panas bumi tersebut muncul di daerah Massepe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Provinsi Sulawesi Selatan. Secara geografis, daerah panas

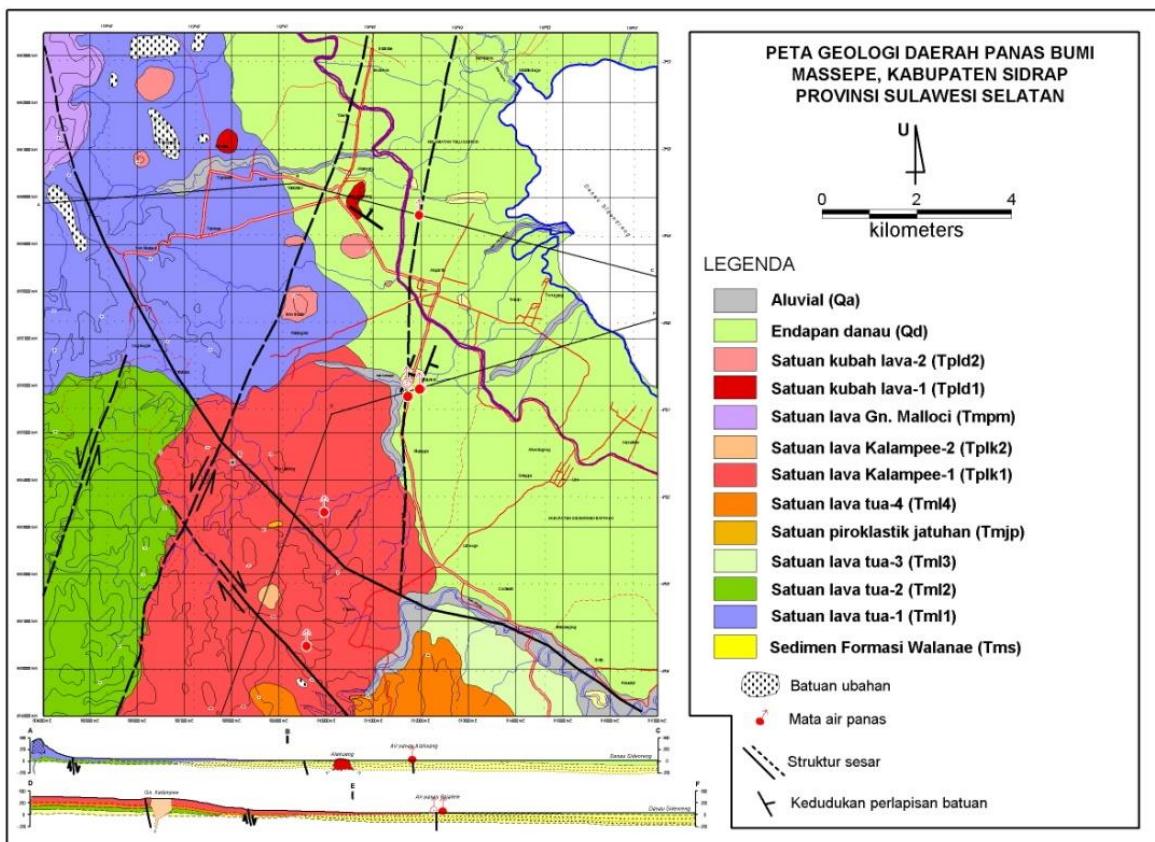
MAKALAH ILMIAH

bumi ini berada pada koordinat 807000 mT – 816000 mT dan 955100 mU – 9562000 mU pada proyeksi peta Universal

Transverse Mercator (UTM) Datum WGS 1984 zona 50 S (Gambar 1).



Gambar 1. Peta indeks lokasi penelitian daerah panas bumi Massepe



Gambar 2. Peta geologi daerah panas bumi Massepe (Anonim, 2008)

Gambar 2 memperlihatkan bahwa batuan tertua di daerah panas bumi Massepe berupa batuan sedimen laut Formasi Walanae berumur Miosen yang terdiri dari perselingan batupasir, batulempung dan batugamping. Batuan vulkanik yang terdapat di daerah ini berupa aliran lava dan piroklastik didominasi komposisi andesitik hingga dasitik berumur Tersier. Batuan vulkanik termuda berupa kubah lava yang dari hasil pentarikan (*dating*) berumur 1.8 ± 0.6 juta tahun (Pliosen-Plistosen). Satuan Kubah Lava ini menerobos batuan sedimen dan batuan vulkanik yang lebih tua. Satuan Batuan Kubah Lava ini diperkirakan berasosiasi dengan tubuh intrusi yang diyakini sebagai sumber panas sistem panas bumi Massepe. Satuan batuan termuda merupakan endapan permukaan yang terdiri dari endapan danau dan aluvial (Anonim, 2008).

Sesar Normal Walanae merupakan sesar utama yang berkembang di daerah panas bumi Massepe dan membentuk depresi

Sidenreng berarah baratlaut - tenggara. Sesar normal lainnya adalah Sesar Alakuang dan Sesar Masepe yang berperan mengontrol munculnya manifestasi di permukaan. Sesar-sesar ini juga diperkirakan mengontrol terbentuknya kubah-kubah lava di daerah ini (Anonim, 2008).

Keberadaan sistem panas bumi Massepe diindikasikan oleh munculnya manifestasi kelompok mata air panas Pajalele, Alakuang dan Warede dengan temperatur berkisar antara 29°C hingga 68°C . Air panas di daerah Massepe mempunyai tipe klorida hingga bikarbonat. Hasil pendugaan temperatur berdasarkan geotermometer air panas, reservoir sistem panas bumi Massepe diperkirakan mempunyai temperatur sebesar 193°C yang dikategorikan sebagai sistem panas bumi temperatur sedang (Anonim, 2008).

Pola kelurusan yang ditunjukkan dari hasil survei gaya berat maupun geomagnet menunjukkan tren arah yang sama yaitu

barat laut - tenggara. Data tahanan jenis diperoleh dari survei geolistrik (konfigurasi Schlumberger). Namun dalam analisis data tahanan jenis untuk melokalisir area prospek ditemui kendala karena daerah ini juga didominasi oleh batuan sedimen yang terdiri dari batupasir, batulempung dan batugamping. Batuan sedimen seperti batulempung memberikan nilai tahanan jenis rendah seperti batuan ubahan hidrotermal. Selain itu hasil analisis data tahanan jenis ini belum bisa menentukan kedalaman puncak reservoir.

Dengan adanya keterbatasan data diatas, dan untuk memperoleh informasi struktur tahanan jenis yang lebih dalam maka dilakukan survei magnetotelurik. Dengan menggunakan data tahanan jenis hasil survei magnetotelurik dilakukan pemodelan inversi 2-D dan 3-D. Pemodelan inversi 2-D dan 3-D data magnetotelurik ini diharapkan dapat membantu dalam menggambarkan model sistem panas bumi Massepe yang lebih akurat.

METODE

Metode Magnetotelurik (MT) adalah metode yang memanfaatkan gelombang elektromagnetik (EM) sebagai sumber gelombang, sehingga dapat mencitrakan kondisi struktur tahanan jenis batuan di bawah permukaan bumi. Akuisisi kedua metoda ini dilakukan dengan mengukur secara simultan variasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) di permukaan bumi sebagai fungsi periода (Simpson dan Bahr, 2005).

Medan magnet bumi yang berfluktuasi akan menginduksi arus listrik di dalam bumi yang besarnya bergantung pada konduktivitas, dan dari hukum Ampere, pengukuran fluktuasi medan magnet di permukaan menentukan total arus listrik di

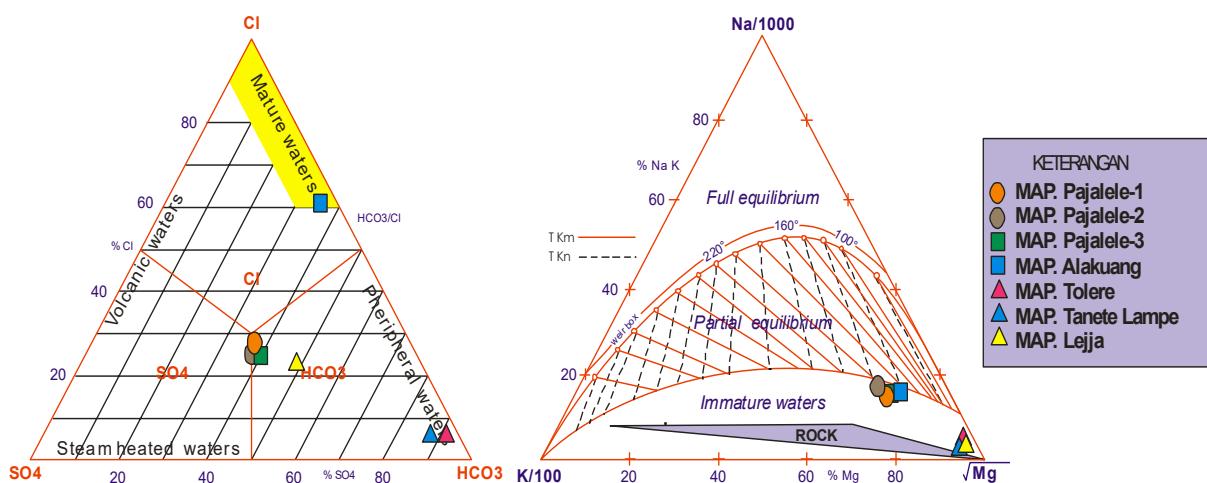
bawah permukaan. Pengukuran medan listrik pada permukaan bumi akan menghasilkan konduktivitas di titik pengukuran. Transformasi dari medan listrik dan medan magnet yang terukur kedalam domain frekuensi, sehingga dapat memetakan konduktivitas sebagai fungsi kedalaman dan posisi (Chave, A. dan Jones, A.G., 2012). Pemodelan 2-D menggunakan perangkat lunak WinGLink versi 2.21.03. Pemodelan ini menggunakan algoritma NLCG (*Nonlinear Conjugate Gradients*). Namun model tahanan jenis untuk bagian yang lebih dalam dari struktur reservoir seringkali ambigu. Untuk mengatasi hal tersebut teknik inversi 3-D telah dipelajari secara intensif dalam beberapa tahun terakhir (Sasaki, Y., 1999; Zhdanov M. S., Fang, S., and Hursin, G., 2000; Mackie, R., Rodi, W., Watts, M. D., 2001). Disamping itu, lingkungan geologi yang kompleks yang sering ditemui di daerah panas bumi terkadang salah dalam menginterpretasi pemodelan 2-D yang realistik (Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006).

Pemodelan inversi 3-D menggunakan perangkat lunak WSINV3-DMT. Perangkat lunak tersebut merupakan kelanjutan dan implementasi dari inversi Occam 2-D (Siripunvaraporn and Egbert, 2006).

Penyelesaian inversi adalah mencari parameter model \mathbf{m} sehingga cocok dengan data \mathbf{d} (Grandis, H., 2009). Maka suatu fungsi yang merupakan hasil selisih forward \mathbf{m} dengan data harus diminimumkan atau disebut sebagai *misfit function* atau fungsi objektif (Rodi, W. dan Mackie, R.L., 2001),

$$\begin{aligned}\psi(\mathbf{m}) = & (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}))^T \mathbf{V}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m})) \\ & + \lambda \mathbf{m}^T \mathbf{L}^T \mathbf{L} \mathbf{m}\end{aligned}$$

dimana nilai λ = parameter regularisasi, \mathbf{V} = matrik ko-variansi, dan \mathbf{L} = operator regularisasi.



Gambar 3. Tipe air panas daerah Massepe hasil plotting dalam diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ dan Na-K-Mg (Anonim, 2008)

MODEL AWAL 2-D DAN 3-D

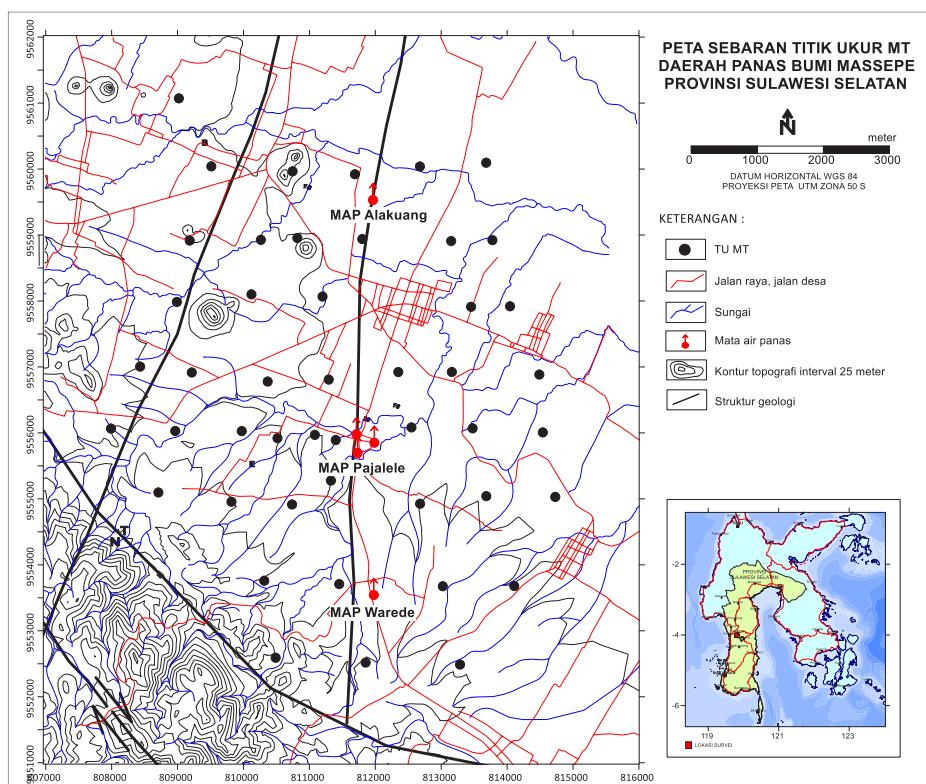
Data yang akan dipergunakan dalam pemodelan ini merupakan hasil survei magnetotellurik pada 47 titik pengukuran di daerah panas bumi Massepe yang meliputi daerah manifestasi Alakuang, Pajalele, dan Warede (Gambar 4). Pemodelan inversi 2-D menggunakan tahanan jenis invariant dengan alasan mode TE relatif tidak sensitif terhadap perubahan tahanan jenis yang berarti bahwa komponen ini kurang sensitif dalam mendekripsi variasi 3-Dimensi dengan tajam untuk sasaran sistem panas bumi. Sebaliknya, mode TM terlalu kuat dipengaruhi oleh perubahan tahanan jenis secara lateral (Anderson, E., Crosby, D., dan Ussher, G., 2000). Pemodelan ini menggunakan parameter $\tau = 1$ yang dianggap dapat mewakili untuk proses inversi pada semua lintasan. Parameter lain yang digunakan yaitu parameter *data error* dan *error floor* untuk *rho* sama dengan 5% dan *phase* sama dengan 10%. Parameter *data error* berfungsi untuk memberikan batasan *error* dari data kalkulasi terhadap data observasi pada kurva, sedangkan parameter *error*

floor menyatakan pemberian batasan *error* pada data (Geosystem SRL, 2011).

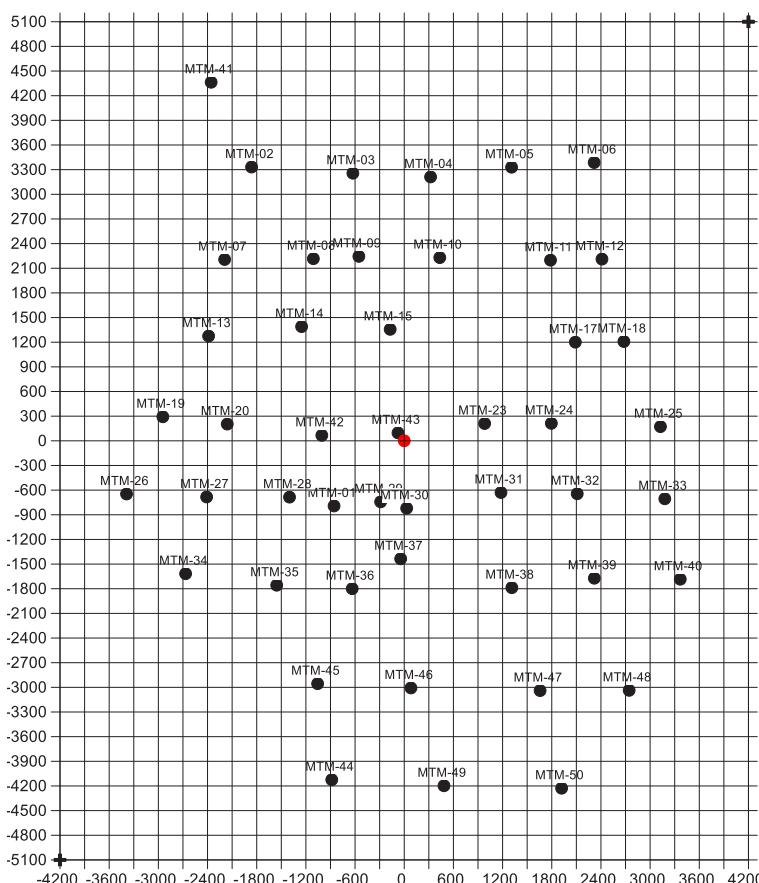
Nilai model awal tahanan jenis sebesar 30 Ohm.m digunakan dalam proses inversi ini. Lintasan yang dibuat berarah barat - timur dengan alasan meminimalkan gangguan (*noise*) karena lokasi survei pengukuran berada di daerah padat penduduk dan juga terdapat jalur sutet hampir berarah utara - selatan di tengah daerah penelitian. Namun keberadaan struktur di daerah panas bumi ini, yaitu struktur utama berupa Sesar Normal Walanae berarah barat laut - tenggara, dan struktur yang berperan penting dengan kemunculan hampir semua manifestasi Massepe kepermukaan yaitu Sesar Massepe berarah hampir utara - selatan.

Pada model awal 3-D dari data magnetotellurik dibuat dengan spasi grid 300 meter, dengan jumlah grid 28×34 sel (Gambar 5). Pemodelan inversi ini hanya melibatkan impedansi tensor 2-D dan menggunakan 12 frekuensi (97 hingga 0.04 Hz).

MAKALAH ILMIAH



Gambar 4. Peta sebaran titik ukur Magnetotelurik

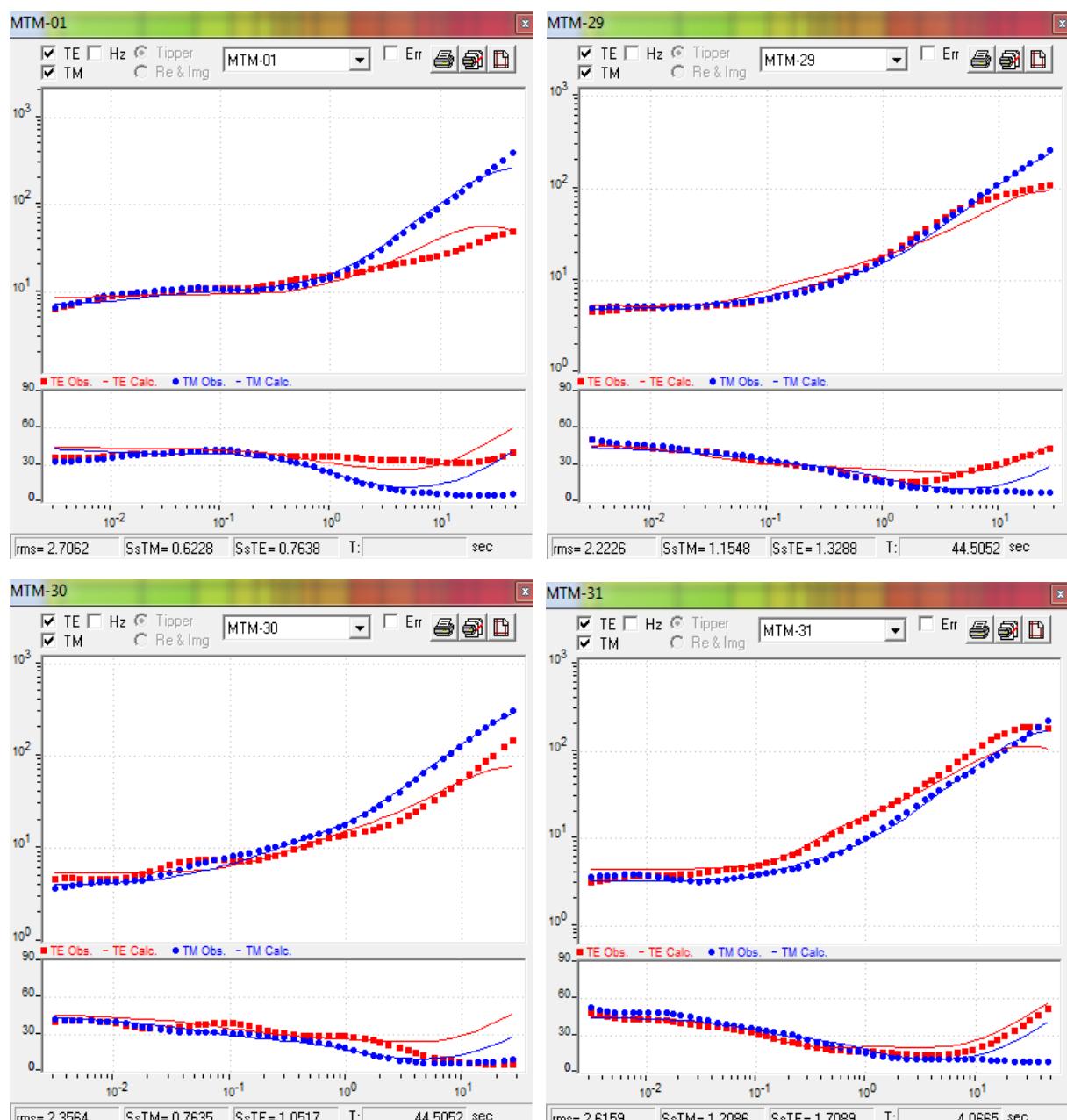


Gambar 5. Model awal untuk inversi 3-D, grid 300 meter, dengan jumlah grid 28×34 sel terhadap sebaran titik ukur magnetotelurik

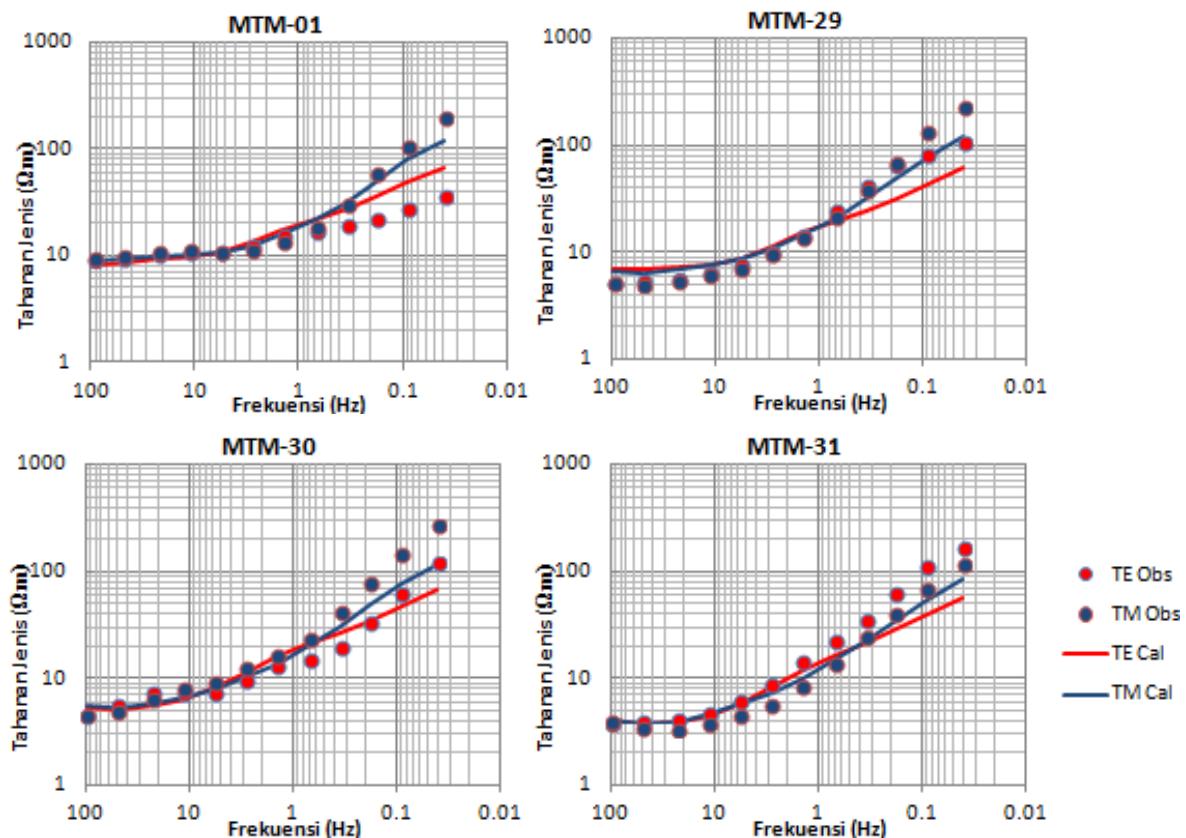
HASIL PEMODELAN 2-D DAN 3-D DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan inversi 2-D (Gambar 10) pada lintasan 5 menghasilkan *rms error* sebesar 2,35%, lintasan 6 sebesar 2,99%, dan lintasan 9 sebesar 2,25%. Hasil Pemodelan inversi 3-D dipilih pada iterasi ke 7 dari 12 total iterasi yang dilakukan dengan *rms error* sebesar 2,24. Gambar 6

dan Gambar 7 menunjukkan kurva tahanan jenis TE dan TM untuk membandingkan data observasi (data pengukuran) terhadap data kalkulasi (*forward model*) untuk beberapa titik pengukuran yang mewakili. Beberapa hasil inversi menunjukkan hasil kedua kurva yang relatif berimpit, namun pada frekuensi rendah relatif berbeda (*misfit*).



Gambar 6. Perbandingan respon kurva hasil Inversi 2-D terhadap modus TE (merah) dan TM (biru) pada beberapa titik ukur yang mewakili.



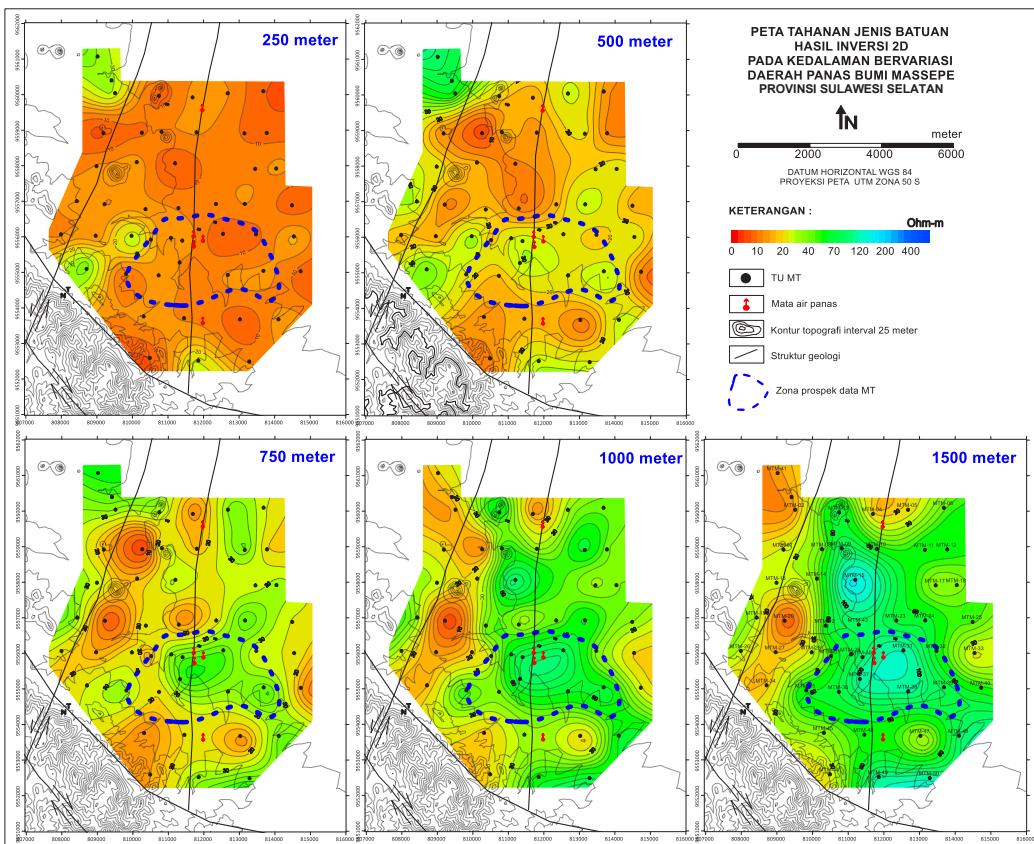
Gambar 7. Perbandingan respon kurva hasil Inversi 3-D terhadap data pengukuran pada beberapa titik ukur yang mewakili.

Hasil inversi 2-D dan 3-D dipetakan secara lateral pada kedalaman 250 meter, 500 meter, 750 meter, 1000 meter, dan 1500 meter (Gambar 8 dan Gambar 9). Sebaran tahanan jenis hasil inversi 2-D dan 3-D memperlihatkan pola relatif sama. Sebaran tahanan jenis rendah $< 20 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ mendominasi daerah penelitian, kecuali di bagian barat yang dibatasi oleh keberadaan sesar normal Alakuang. Pada kedalaman 500 meter, sebaran tahanan jenis di sekitar mata air panas Pajalele relatif meninggi $< 30 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. Sebaran tahanan jenis di sekitar mata air panas Pajalele secara tegas menjadi tahanan jenis sedang berupa spot memanjang berarah barat - timur pada kedalaman 750 meter.

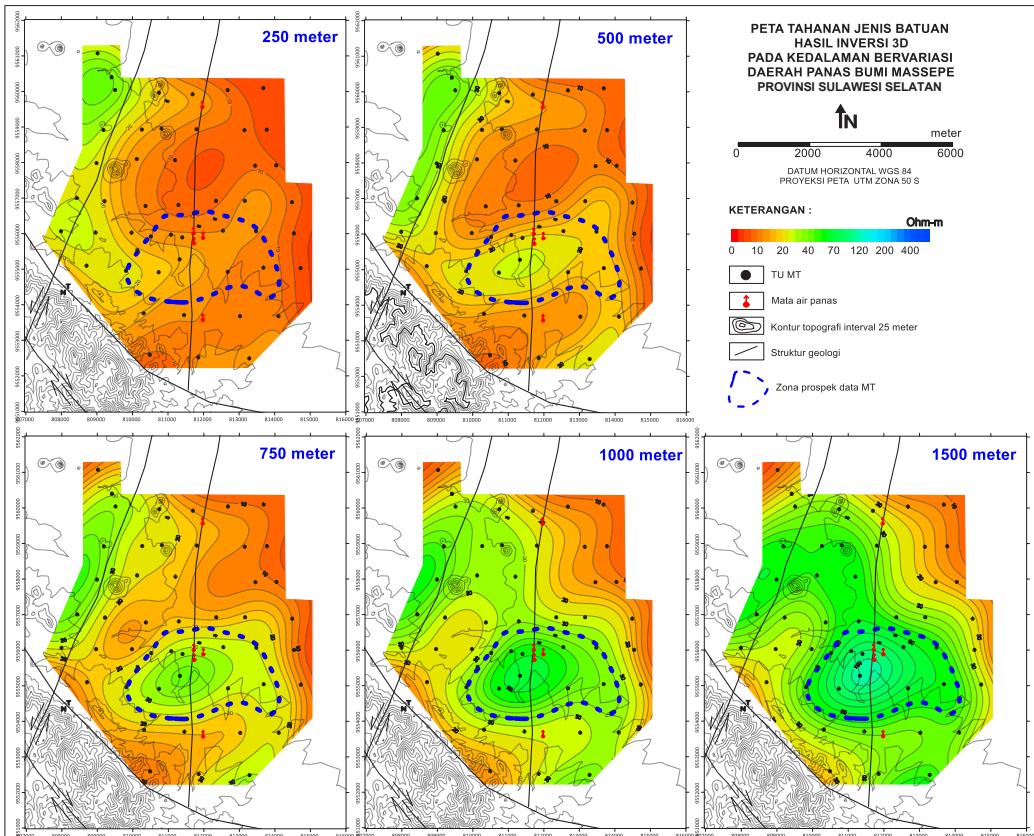
Selanjutnya pada kedalaman 1000 meter hingga 1500 meter, sebaran tahanan jenis tersebut semakin meninggi terutama di sekitar mata air panas Pajalele. Perubahan zona anomali tahanan jenis inilah yang diduga sebagai zona yang telah

terubah sifat fisis batuan disekitarnya oleh fluida panas yang naik kepermukaan. Nilai tahanan jenis rendah di dalam zona tersebut diduga sebagai lapisan konduktif yang biasanya berupa batuan ubahan hidrotermal dan umumnya merupakan lapisan penudung (*clay cap*) pada suatu sistem panas bumi.

Pada kedalaman 500 meter hingga 700 meter terlihat nilai tahanan jenis yang semakin tinggi diduga sebagai zona transisi antara lapisan penudung dan reservoir. Dengan demikian keberadaan puncak reservoir dari sistem panas bumi diperkirakan pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter. Keberadaan zona dalam lingkaran garis biru putus-putus diperkirakan sebagai zona menarik untuk sistem panas bumi berdasarkan penarikan dari hasil sebaran tahanan jenis perkedalaman hasil pemodelan 2-D dan 3-D (Gambar 8). Kemungkinan zona tersebut masih membuka ke arah utara daerah penelitian.

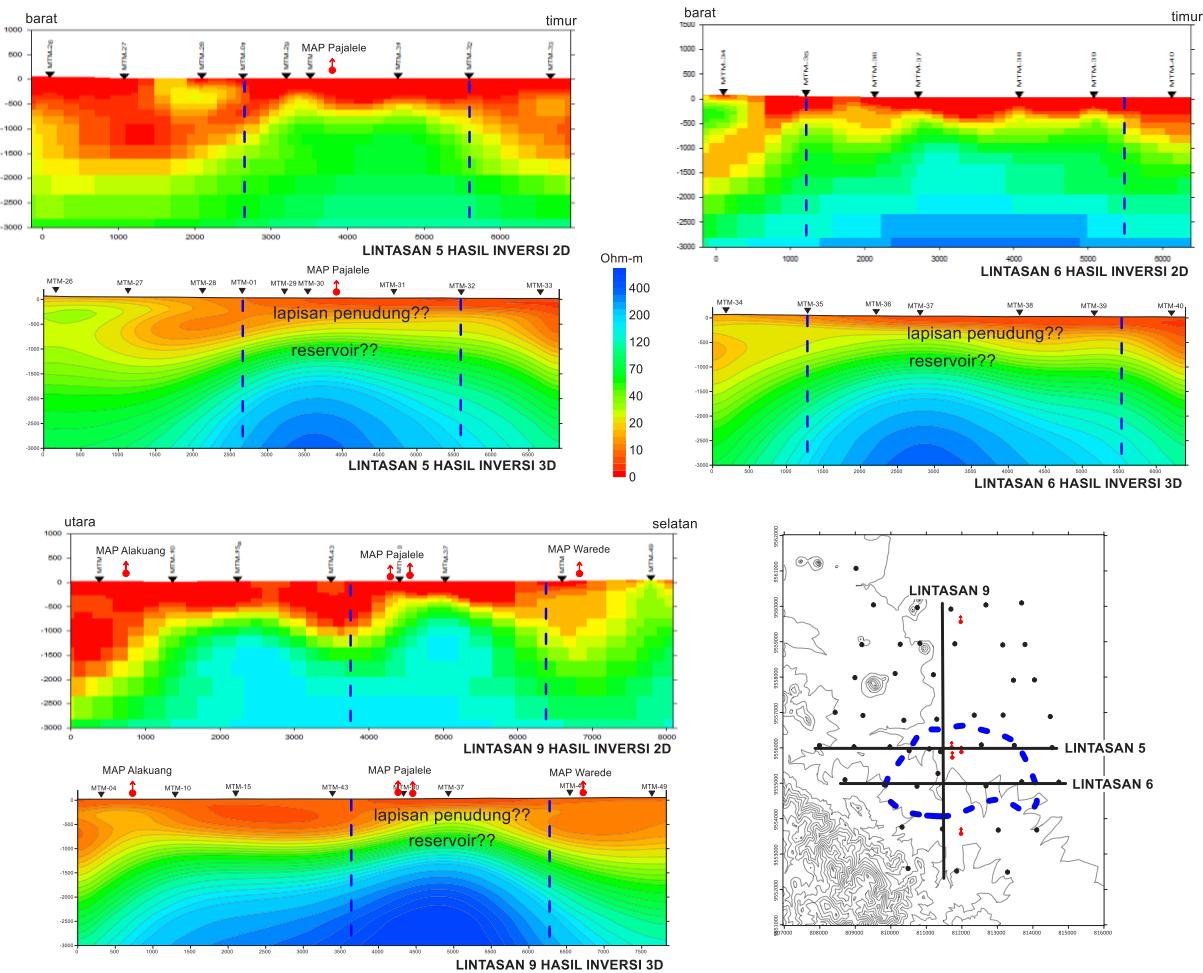


Gambar 8. Peta tahanan jenis batuan hasil pemodelan 2-D dengan kedalaman bervariasi



Gambar 9. Peta tahanan jenis hasil pemodelan 3-D dengan kedalaman bervariasi

MAKALAH ILMIAH



Gambar 10. Penampang tahanan jenis hasil pemodelan 2-D dan 3-D pada lintasan 5, lintasan 6, dan lintasan 9

Gambar 10 merupakan penampang hasil pemodelan data MT lintasan 5 dan 6 berarah barat - timur, dan lintasan 9 berarah utara - selatan. Model ketiga penampang tersebut yang memiliki nilai lapisan tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m (yang dibatasi oleh garis biru putus-putus) diasumsikan sebagai batuan penudung sesuai dengan hasil analisis batuan ubahan oleh tim geologi bahwa batuan tersebut kaya akan mineral lempung (argilik) berupa *nontronite*, *halloysite*, dan *montmorillonite* (Anonim, 2008). Litologi pembentukan reservoir diduga berupa batuan sedimen Formasi Walanae yang kaya akan rekahan dan bersifat permeabel. Sifat *permeabel* ini diakibatkan oleh rekahan hasil aktifitas Sesar Massepe yang bertindak sebagai pengontrol munculnya mata air panas Pajalele dan Alakuang, atau akibat sifat fisis batuan itu sendiri yang

banyak mengandung pori (*porous*) terutama pada batuan sedimen klastik. Sebaran tahanan jenis secara lateral hasil pemodelan 3-D menghasilkan perubahan zona tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m di sekitar mata air panas Pajalele yang dianggap sebagai zona alterasi yang lebih tegas dibandingkan hasil pemodelan 2-D (Gambar 8 dan Gambar 9). Demikian juga hasil penampang tahanan jenis hasil pemodelan 3-D juga menunjukkan pola sebaran tahanan jenis yang relatif lebih tinggi pada kedalaman yang dalam terutama lintasan 5 dan lintasan 9 (Gambar 10). Model 3-D menunjukkan batas yang lebih halus, sedangkan model 2-D menunjukkan anomali tahanan jenis sedang menerus kedalaman yang lebih dalam, sehingga tidak dapat menginterpretasi ketebalan reservoir dari sistem panas bumi tersebut. Dalam

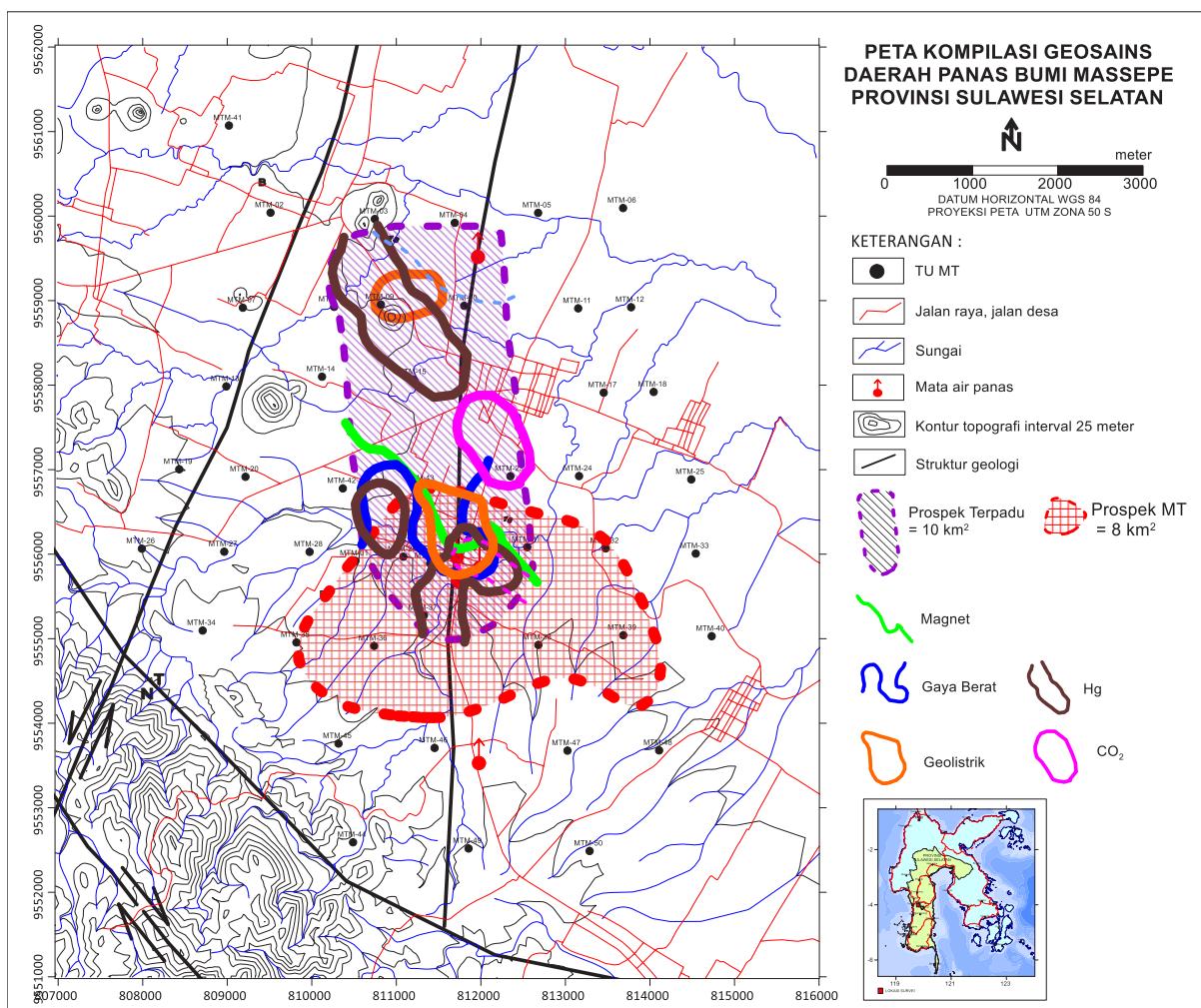
pengertian ini, model 2-D di daerah ini kurang sensitif terhadap struktur yang dalam. Faktor lingkungan geologi yang kompleks juga akan menghasilkan interpretasi model 2-D yang tidak optimal. Sehingga pada kasus daerah ini, model 3-D lebih realistik daripada model 2-D yang dihasilkan (Uchida, T., dan Sasaki, Y., 2006).

Hasil pemodelan 2-D dan 3-D data MT menunjukkan zona perubahan nilai tahanan jenis rendah $< 20 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ di sekitar mata air panas Pajalele diduga sebagai zona alterasi argilik yang kaya akan mineral lempung yang merupakan zona depresi dan terisi oleh sedimen Formasi Walanae dan sebagian tertindih oleh produk vulkanik tua di bagian barat mata air panas Pajalele. Produk lempung konduktif dari alterasi hidrotermal adalah penyebab menjadi zona tahanan jenis rendah diatas reservoir. Keberadaan top reservoir dari sistem panas bumi Massepe diperkirakan berada mulai kedalaman 700 meter hingga 800 meter.

Survei terpadu geologi, geokimia dan geofisika terdahulu memberikan hasil hasil delineasi area prospek yang luas yaitu 10 km^2 meliputi sekitar mata air panas Pajalele dan mata air panas Alakuang. Berdasarkan data tahanan jenis hasil survei geolistrik (konfigurasi Schlumberger) menunjukkan bahwa sebaran tahanan jenis semu pada $AB/2 = 1000 \text{ meter}$ terlihat sebaran tahanan jenis rendah terkonsentrasi berupa spot-spot di sekitar mata air panas Pajalele dan di bagian baratdaya mata air panas Alakuang. Anomali negatif data gaya berat dan anomali negatif geomagnet juga cenderung terkonsentrasi di sekitar

mata air panas Pajalele (Anonim, 2008). Ketiga anomali geofisika tersebut dikompilasikan dengan anomali sebaran CO_2 dan Hg didelineasi sebagai area prospek panas bumi Massepe. Namun demikian delineasi ini mempunyai batasan yang kurang tegas.

Berdasarkan hasil data MT, perubahan anomali tahanan jenis rendah yang mengindikasikan adanya aktivitas fluida panas bumi yang membentuk batuan bersifat konduktif hanya berada di sekitar mata air panas Pajalele dan meluas ke arah barat dan timur daerah penelitian berupa spot memanjang relatif berarah barat - timur. Pada kedalaman 250 meter, sebaran tahanan jenis rendah $< 20 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$ relatif melingkupi seluruh daerah penelitian. Pada kedalaman 500 meter, perubahan anomali tahanan jenis rendah terjadi di sekitar mata air panas Pajalele menjadi relatif meninggi, dan pada kedalaman 750 meter hingga 1000 meter. Perubahan anomali tahanan jenis rendah tersebut terlihat tegas meluas ke arah barat dan timur daerah penelitian dengan luas keprospekan sekitar 8 km^2 . Perkiraan daerah prospek hasil data MT ini masih bersesuaian dengan keberadaan anomali-anomali hasil penyelidikan sebelumnya, sehingga makin mempertegas keyakinan luasan anomali sistem panas bumi di bagian selatan daerah panas bumi Maseppe (Gambar 11). Selain itu, anomali tahanan jenis hasil MT juga cukup tegas memperlihatkan perubahan nilai tahanan jenis di kedalaman sehingga dapat untuk memperkirakan kedalaman puncak reservoir dari sistem panas bumi Massepe yang diduga berada pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter.



Gambar 11. Perkiraan area prospek hasil pemodelan inversi MT dikompilasikan dengan area prospek hasil data geosains pada penyelidikan sebelumnya

KESIMPULAN

Hasil pemodelan inversi 2D dan 3D data magnetotelurik di daerah panas bumi Massepe menunjukkan area prospek atau zona *upflow* berada di sekitar mata air panas Pajalele seluas 8 km². Hasil delineasi ini diyakini lebih akurat dibandingkan dengan area prospek hasil delineasi menggunakan data tahanan jenis survei geolistrik, karena pada survei magnetotelurik penetrasi jauh lebih dalam. Perubahan anomali tahanan jenis di kedalaman dari data magnetotelurik juga lebih tegas memperlihatkan kedalaman puncak reservoir dimulai pada kedalaman 700 meter hingga 800 meter yang berada pada satuan batuan sedimen laut Formasi Walanae. Pola anomali tahanan jenis dari

data magnetotelurik juga dapat menjelaskan keberadaan struktur geologi di daerah panas bumi Massepe terutama struktur Sesar Massepe berarah relatif utara-selatan yang mengontrol kemunculan mata air panas di Pajalele dan Alakuang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi atas pemberian ijin untuk penulisan makalah ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Kepala Bidang Panas Bumi dan rekan-rekan di Bidang Panas Bumi.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, E., Crosby, D., dan Ussher, G. (2000): Bulls Eye - Simple Resistivity Imaging to Reliably Locate the Geothermal Reservoir, Proceeding World Geothermal Congress, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000
- Anonim, 2008, Survei Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Massepe, Kabupaten Sidenreng Rappang, Sulawesi Selatan, Prosiding Hasil Kegiatan Lapangan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun Anggaran 2008, Bandung.
- Anonim, 2015, Sistem Panas Bumi Non-Vulkanik di Sulawesi, ISBN: 978-602-7928-114.
- Chave, A. dan Jones, A.G. (2012): The Magnetotelluric Method, Cambridge University Press.
- Geosystem SRL, 2011, A guide to using WinGLink, the User's Manual
- Grandis, H., 2009, Pengantar pemodelan inversi geofisika, Himpunan Ahli Geofisika Indonesia (HAGI).
- Mackie, R., Rodi, W., dan Watts, M. D., 2001, 3-D magnetotelluric inversion for resource exploration, Expanded Abstracts, Society of Exploration Geophysicists 71st Annual Meeting, 1501-1504.
- Simpson, F. dan Bahr, K, 2005, *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press.
- Siripunvaraporn, W., 2006, "WSINV3-DMT version 1.0.0 for Single Processor Machine, User Manual, Department of Physics, Faculty of Science Mahidol University, Rama 6 Rd., Rachatawee, Bangkok 10400.
- Rodi, W., dan Mackie, R.L., 2001, Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion, *Geophysics Journal International*, 66(1):174-187
- Sasaki, Y., 1999, 3-D inversion of electrical and electromagnetic data on PC, Proceedings of 2nd International Symposium on Three-Dimensional Electromagnetics, 128-131.
- Uchida, T, dan Sasaki, Y., 2006, Stable 3-D Inversion of MT data and its application to geothermal exploration, *Exploration Geophysics*, 223-230.
- Zhdanov M. S., Fang, S., dan Hursin, G., 2000, Electromagnetic inversion using quasi-linear approximation, *Geophysics*, 65, 1501-1513.

Diterima	: 22 Maret 2019
Direvisi	: 12 April 2019
Disetujui	: 30 Agustus 2019

UCAPAN TERIMA KASIH

Dewan Redaksi mengucapkan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para Editor dan Mitra Bestari atas kerjasama yang baik dalam proses *review* lima buah artikel untuk Buletin Sumber Daya Geologi edisi kedua. Secara khusus, kami mengucapkan terima kasih kepada para Mitra Bestari yang berkontribusi sesuai keahliannya untuk edisi ini, antara lain Dr. Chairul Nas, M.Sc, Dr. Ir. Rukmana Nugraha Adhi, DESS, Dr. Ir. Dicky Muslim, M.Sc, Dr. Eng. Agus Didit Haryato, Ir, M.T dan Edi Suhanto, S.Si, M.T.

Kami juga mengucapkan terimakasih kepada semua unsur Dewan Redaksi atas usaha yang sangat baik dalam menyelesaikan penerbitan Buletin Sumber Daya Geologi Volume.14 Nomor.2 Tahun 2019. Semoga kehadiran Buletin Sumber Daya Geologi kepada masyarakat umum dalam bentuk cetakan maupun digital secara *on line* dapat memberikan informasi yang bermanfaat dan akurat tentang potensi sumber daya mineral dan energi di Indonesia.

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 14 Nomor 2 Tahun 2019

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS PENULIS

Akhmad Fauzan
Fakultas Teknik Geologi, Universitas
Padjadjaran
Email: akhmadfn06@gmail.com

Annisa Nur Falah
Departemen Matematika, Fakultas
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran
Email: annisanurfalalah02@gmail.com

Asri Arifin
Fakultas Teknik Geologi Universitas
Padjadjaran
Email: asri15008@mail.unpad.ac.id

Boy Yoseph CSSSA
Fakultas Teknik Geologi Universitas
Padjadjaran
Email: boy.yoseph@unpad.ac.id

Budi Nurani Ruchjana
Departemen Matematika, Fakultas
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran
Email: budi.nurani@unpad.ac.id

Dwie H. Saputra
PT Freeport Indonesia
Email: dsaputra1@fmi.com

Endang Rusyaman
Departemen Matematika, Fakultas
Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Padjadjaran
Email: rusyaman@unpad.ac.id

Euis Tintin Yuningsih
Fakultas Teknik Geologi Universitas
Padjadjaran
Email: e.tintin@unpad.ac.id

Fernandy Meiriyanto
PT Freeport Indonesia
Email: fmiriya@fmi.com

Josua Washington Sihotang
Faculty of Geological Engineering
Padjadjaran University
Email: josua16005@mail.unpad.ac.id

Mega Fatimah Rosana
Fakultas Teknik Geologi Universitas
Padjadjaran
Email: mega.fatimah.rosana@unpad.ac.id

Nur Hamid
Departemen Geologi, Fakultas Teknik
Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Mineral
Indonesia
Email: nurhamid361rl@gmail.com

Rina Wahyuningsih
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: rinagea85@gmail.com

Syaiful Alam
Laboratory of Stratigraphy Padjadjaran
University
Email: syaifulalam61@gmail.com

Wiwid Joni
Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara
dan Panas Bumi
Email: joniwiwid@gmail.com

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Volume 14 Nomor 2 Tahun 2019

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

INDEKS KATA KUNCI

- Alterasi hidrotermal 94, 97, 99, 153
Analytical Spectral Devices (ASD) 79, 80
Aplikasi R 127, 129, 130, 132, 139, 140
Big Gossan 97-101, 103, 105-107, 109-111
Central Sumatra Basin 113-116, 124
Enhanced Geothermal Systems (EGS) 113, 114, 124, 125
Estimasi 113, 127-134, 136-140
Fixed Carbon 127-131, 133-135, 137, 139-141
Geostatistics 113, 115, 117, 119, 121, 123, 125, 127, 141
Inversi 2-D dan 3-D 143-147, 149-151, 153, 155
Lokasi yang tidak tersampel 127, 129, 131
Magnetotellurik 143, 145-149, 151, 153, 155
Martabe 79-83, 85, 87, 89, 91, 93-95
Massepe 143-147, 152-155
Mineralisasi 79-82, 88, 93, 94, 97-99, 101, 103, 105-109, 111
Ordinary Point Kriging 127-134, 139-141
Panas bumi 111, 143-147, 150, 152-155
Paragenesis Sulfida 79
Pulau Papua 97
Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive (SEM EDS) 79, 80
Skarn 97, 99, 101, 103, 107, 109, 111
Sulfidasi Tinggi 79, 81

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Agustus 2019

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

DDC:

Asri Arifin, Mega Fatimah Rosana, Euis Tintin Yuningsih, dan Boy Yoseph CSSSA
(Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran)

GEOLOGI DAN KARAKTERISTIK BIJIH PIT RAMBA JORING DEPOSIT MARTABE, SUMATERA UTARA**Buletin Sumber Daya Geologi****BSDG Agustus 2019 Vol. 14 No. 2 Hal. 79 - 95**

Deposit Ramba Joring merupakan bagian dari wilayah Kontrak Karya (KK) pertambangan umum PT Agincourt Resources yang terletak di Kelurahan Aek Pining, Kecamatan Batangtoru, Kabupaten Tapanuli Selatan, Provinsi Sumatera Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kondisi geologi meliputi geomorfologi, stratigrafi dan struktur geologi serta karakteristik bijih yang mengandung emas-perak pada deposit Ramba Joring. Penelitian dilakukan pada 44 lubang bor dan 15 conto permukaan. Penelitian menggunakan metode analisis petrografi sayatan tipis dan poles, Analytical Spectral Devices (ASD), Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive (SEM EDS) serta pengolahan statistik data geokimia assay berupa nilai kadar kandungan Au, Ag, Cu, SxS (sulfide sulphur) yang didapatkan melalui analisis Atomic Absorption Spectrometry (AAS). Daerah penelitian tersusun oleh litologi, diurutkan dari tua ke muda, berupa satuan andesit hornblende dan breksi polimik-monomik. Satuan batuan andesit hornblende dan breksi polimik-monomik teralterasi kuat oleh empat jenis alterasi yaitu, silisifikasi (kuarsa-kalsedon-alunit-kaolinit±dikit), argilik lanjut (alunit±kuarsa-kaolinit±dikit-pirofilit), argilik (ilite±mektit-alunit-kaolinit-kuarsa) dan propilitik (klorit-epidot-kalsit). Terdapat enam jenis mineral sulfida pada daerah penelitian, paragenesa dimulai dari pirit, enargit, tennantit, tetrahedrit dan kovelit bersamaan dengan pengendapan emas-perak serta pirit dengan kristal berbentuk sempurna yang terbentuk paling akhir. Hasil uji pada data assay geokimia menunjukkan adanya korelasi antara kandungan unsur Au, Ag, Cu dan SxS (sulfide sulphur) terhadap jenis alterasi. Diketahui bahwa mineralisasi emas dan logam lainnya berasosiasi dengan mineral sulfida yang melimpah pada alterasi silisifikasi namun semakin berkurang pada jenis alterasi argilik hingga menghilang pada alterasi propilitik.

Kata kunci: Martabe, Sulfidasi Tinggi, Paragenesis Sulfida, Scanning Electron Microscopy with Energy Dispersive (SEM EDS), Analytical Spectral Devices (ASD)

DDC:

Akhmad Fauzan¹, Mega F. Rosana¹, Euis Tintin Yuningsih¹, Dwie H. Saputra², dan Fernandy Meiriyanto²
(¹Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran, ²PT Freeport Indonesia)

ALTERASI DAN MINERALISASI CEBAKAN BIG GOSSAN, KABUPATEN MIMIKA, PROVINSI PAPUA**Buletin Sumber Daya Geologi****BSDG Agustus 2019 Vol. 14 No. 2 Hal. 97 - 112**

Aktifitas magmatik dan tektonik yang diikuti oleh proses hidrotermal di Pulau Papua dimulai pada zaman Tersier yang menghasilkan batuan intrusi dan mineralisasi Cu-Au di wilayah Ertsberg – Grasberg dan berpengaruh terhadap proses pembentukan Cebakan Big Gossan. Dalam penelitian ini, dilakukan pemetaan alterasi, analisis petrografi dan minerografi untuk mengetahui karakteristik dan penyebaran alterasi dan mineralisasi di Cebakan Big Gossan pada kedalaman 2.600 mdpl dan 2.640 mdpl. Berdasarkan himpunan mineral ubahannya dibedakan menjadi delapan zona, yaitu: Zona Diopsid – K-feldspar, Zona Kuarsa – Diopsid – Garnet, Zona Garnet – Diopsid + Epidot, Zona Biotit – K-feldspar + Epidot, Zona Garnet – Diopsid, Zona Aktinolit – Tremolit, Zona Kuarsa – Dolomit dan Zona Epidot – Klorit. Berdasarkan asosiasi mineral logamnya, dapat dikelompokan menjadi lima zona, yaitu: Zona Pirit, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Sfalerit, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit – Sfalerit – Galena, Zona Kalkopirit – Pirit – Magnetit – Hematit serta Zona Magnetit – Hematit. Penyebaran zona alterasi dan mineralisasi di daerah penelitian menunjukkan arah baratlaut – tenggara yang dikontrol oleh Sesar Big Gossan yang memiliki kesamaan arah.

Kata kunci: Alterasi hidrotermal, big gossan, mineralisasi, skarn, Pulau Papua

DDC:

Josua Washington Sihotang¹ and Syaiful Alam²
(¹Faculty of Geological Engineering Padjadjaran University, ²Laboratory of Stratigraphy Padjadjaran University)

APPLIED GEOSTATISTICS TO THE ASSESSMENT OF ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) IN CENTRAL SUMATRA BASIN**Buletin Sumber Daya Geologi****BSDG Agustus 2019 Vol. 14 No. 2 Hal. 113 - 125**

Thick sediment (over 2,500 m), fractured basement and high thermal gradient (up to 19.10 oC/100 m) of Central Sumatra Basin are suitable factors to have the Enhanced Geothermal System (EGS) potential. A number of 130 wells data were used to evaluate EGS of the basin. The assessment is divided into the number of estimation within grid cell (1 km x 1 km) of sediment thickness, heat flow, thermal conductivity and technical potential calculated starting from basement-sediment layer interface. The distribution of heat flow and gradient thermal values correspond to the sediment layer. The autocorrelation test indicate the data is stationary. The variance of data gets bigger after a depth over 5.5 km. According to the Breadsmore protocol, the technical potential value ranged from 0.5 MW up to 4.7 MW at the depth of 3.5 km. In addition, the lowest technical potential is 0.66 MW and the highest is 5.76 MW at a depth of 4.5 km. The ordinary kriging, using number of lags 10 in variogram modeling, estimated the technical potential distribution is higher to the southwest.

Keywords: Enhanced Geothermal Systems (EGS), Central Sumatera Basin, Geostatistics

ABSTRACT

BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

Terbit : Agustus 2019

ISSN 1907-5367, eISSN 2580-1023

DDC:

Budi Nurani Ruchjana¹, Annisa Nur Falah¹, Endang Rusyaman¹, dan Nur Hamid²

(¹Departemen Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Padjadjaran dan

²Departemen Geologi, Fakultas Teknik Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Mineral Indonesia)

PREDIKSI NILAI FIXED CARBON SEBAGAI VARIABEL DALAM KUALITAS BATUBARA DENGAN METODA ORDINARY POINT KRIGING MENGGUNAKAN APLIKASI R

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2019 Vol. 14 No. 2 Hal. 127 - 141

Data spasial adalah data yang diperoleh dari hasil pengukuran yang berisi informasi tentang lokasi, umumnya berdasarkan peta yang berisikan interpretasi dan proyeksi seluruh fenomena yang berada di bumi. Metoda Ordinary Point Kriging adalah salah satu metoda yang dapat digunakan untuk analisis data spasial dalam Geostatistika yang digunakan untuk mengestimasi nilai dari sebuah titik di lokasi tidak tersampel sebagai kombinasi linear dari nilai contoh yang terdapat di sekitar titik yang akan diestimasi. Bobot kriging diperoleh dari hasil variansi estimasi minimum menggunakan semivariogram sebagai input. Untuk studi kasus penerapan Metoda Ordinary Point Kriging, digunakan data karbon tertambat (fixed carbon) sebagai variabel kualitas batubara dari hasil uji laboratorium di PT Bumi Merapi yang menunjukkan bahwa kualitas batubara berada dalam peringkat Lignite. Fixed carbon menyatakan banyaknya karbon yang terdapat dalam material sisanya setelah zat terbang (volatile matter) dihilangkan. Nilai fixed carbon sangat mempengaruhi kualitas suatu batubara, karena semakin tinggi nilai fixed carbon maka kualitas batubara semakin meningkat. Proses perhitungan estimasi fixed carbon di lokasi yang tidak tersampel menggunakan Metoda Ordinary Point Kriging dapat diselesaikan dengan package gstat pada Aplikasi R, dan memberikan nilai hasil estimasi mendekati nilai data sampel. Oleh karena itu, perhitungan Metoda Ordinary Point Kriging menggunakan aplikasi R memberikan perhitungan yang lebih mudah, cepat, dan akurat.

Kata kunci: Ordinary Point Kriging, Fixed Carbon, Aplikasi R, estimasi, lokasi yang tidak tersampel

DDC:

Wiwid Joni dan Rina Wahyuningsih

(Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi)

PEMODELAN INVERSI 2-D DAN 3-D MENGGUNAKAN DATA MAGNETOTELURIK DAERAH PANAS BUMI MASSEPE KABUPATEN SIDENRENG RAPPANG, PROVINSI SULAWESI SELATAN

Buletin Sumber Daya Geologi

BSDG Agustus 2019 Vol. 14 No. 2 Hal. 143 - 155

Pemodelan inversi 2-D dan 3-D data magnetotellurik (MT) dari daerah panas bumi Massepe memberikan hasil delineasi area prospek yang lebih jelas yaitu di sekitar mata air panas Pajalele seluas \pm 8 km². Zona upflow sistem panas bumi Massepe ini diperlakukan oleh adanya anomali tahanan jenis rendah < 20 Ohm-m di kedalaman 250 m yang semakin tinggi mulai kedalaman 700 m s.d. 800 m. Zona transisi nilai tahanan jenis ini diduga sebagai kedalaman puncak reservoir sistem panas bumi Massepe yaitu di kedalaman 800 m. Anomali tahanan jenis data magnetotellurik juga menunjukkan pola yang sesuai dengan keberadaan struktur geologi di daerah ini terutama struktur Sesar Massepe berarah relatif utara-selatan yang mengontrol kemunculan mata air panas di Pajalele dan Alakuang.

Kata kunci: Massepe, magnetotellurik, Inversi 2-D dan 3-D, panas bumi



Aliran piroklastik yang merupakan produk erupsi Gunung Poco Rii di Desa Golomongkok, Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Lano Adhitya P, 2014)



Manifestasi panas bumi berupa endapan sinter karbonat di Daerah Mapos, Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Lano Adhitya P, 2014)

GALERI FOTO



Singkapan batuan yang telah mengalami ubahan hidrotermal menjadi mineral lempung berupa kaolinite dan montmorilonite di Desa Renes, Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Lano Adhitya P, 2014)



Singkapan granit bertekstur fanerik dengan ukuran kristalnya yang mencapai 3 cm di Daerah Permis, Kabupaten Bangka Selatan, Provinsi Bangka Belitung (Lano Adhitya P, 2014)



Manifestasi panas bumi berupa fumarol di Lapangan Panas Bumi Ulumbu, Kabupaten Manggarai, Provinsi Nusa Tenggara Timur (Lano Adhitya P, 2014)



Mata air panas Sosopan di Daerah Pincurak, Kabupaten Pasaman Barat, Provinsi Sumatera Barat yang dapat dimanfaatkan sebagai sarana pariwisata berupa pemandian (Dede lim, 2017)

GALERI FOTO



Singkapan granodiorit yang menunjukkan adanya xenolith berupa batupasir di Daerah Diloniyohu, Kabupaten Gorontalo, Provinsi Gorontalo (Lano Adhitya P, 2015)



Kubah Lava pada Gunung Anak Ranakah di Daerah Mapos, Kabupaten Manggarai Timur, Provinsi Nusa Tenggara Timur. Keberadaan Gunung Anak Ranakah dapat berperan sebagai sumber panas pada sistem panas bumi di Daerah Mapos (Lano Adhitya P, 2014)



Singkapan batuan metamorf berupa sekis dengan sisipan urat – urat kuarsa,
Kabupaten Donggala, Provinsi Sulawesi Tengah (Irwan Muksin, 2017)



Singkapan batuan pembawa kalium di Dusun Lemahjobo, Desa Medani,
Kecamatan Cluwak, Kabupaten Pati, Provinsi Jawa Tengah (Irwan Muksin, 2018)

GALERI FOTO



Singkapan batugamping Kecamatan Mantewe, Kabupaten Tanah Bumbu,
Provinsi Kalimantan Selatan (Irwan Muksin, 2019)



Singkapan batugamping, Kecamatan Pugung, Kabupaten Tanggamus,
Provinsi Lampung (Irwan Muksin, 2017)



Seam batubara thermal premium grade PT MGM, Kabupaten Murung Raya,
Provinsi Kalimantan Tengah (R. Maria Ulfa, 2019)



Pengambilan contoh batubara metallurgi di PT MGM, Kabupaten Murung Raya,
Provinsi Kalimantan Tengah (R. Maria Ulfa, 2019)

GALERI FOTO



Pelamparan seam batubara metalurgi di PT AMC, Kabupaten Murung Raya,
Provinsi Kalimantan Tengah (R. Maria Ulfa, 2019)



Parting pada seam batubara metalurgi PT AMC, Kabupaten Murung Raya,
Provinsi Kalimantan Tengah (R. Maria Ulfa, 2019)



Pengeboran gambut Lokasi PL-23 pada kedalaman 8,7 m.
Dasar gambut perlapisan batulumpur endapan danau
(Agus Subarnas, 2018)



Batas tegas lapisan batubara dengan konglomerat, Kabupaten Ogan Komering Ulu,
Provinsi Sumatera Selatan (M. A. Ibrahim, 2018).

GALERI FOTO



Pengukuran arah jurus dan kemiringan lapisan batubara daerah Tabulako, Provinsi Kalimantan Selatan (Soleh Basuki Rahmat, 2018).



Singkapan batubara daerah Batumarta, Kabupaten Ogan Komering Ulu, Provinsi Kalimantan Selatan (Raden Maria Ulfa, 2018).

PEDOMAN PENULISAN
Makalah/karya tulis ilmiah
BULETIN SUMBER DAYA GEOLOGI

ISI DAN KRITERIA UMUM

Naskah makalah/karya tulis ilmiah untuk publikasi di Buletin Sumber Daya Geologi dapat berupa artikel hasil penelitian, ulas balik (*review*) dan ulasan/tinjauan (*feature*) tentang geologi baik sains maupun terapan terutama berkaitan dengan tugas pokok dan fungsi Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi. Naskah yang diajukan belum pernah dipublikasikan atau tidak sedang diajukan pada publikasi lain.

Naskah ditulis dalam bahasa Indonesia atau Inggris sesuai kaidah masing-masing bahasa yang digunakan. Judul naskah ditulis dengan huruf besar (*capital*) di tengah atas halaman dan di cetak tebal (*bold*). Naskah harus selalu dilengkapi dengan Sari dalam bahasa Indonesia dan *Abstract* dalam bahasa Inggris. Kata-kata bahasa asing yang tidak dapat dialih bahasa/disadur dicantumkan dalam bentuk asli dan ditulis dengan huruf miring (*italic font*).

FORMAT

UMUM

Seluruh bagian dari naskah termasuk Sari, *Abstract*, judul tabel dan gambar, catatan kaki tabel, keterangan gambar dan daftar acuan diketik satu spasi dalam bentuk *electronic file* dan dicetak pada kertas HVS A4; menggunakan huruf Arial berukuran 11 *point*. Setiap lembar tulisan dalam naskah diberi nomor halaman dengan jumlah maksimum 15 halaman termasuk tabel dan gambar. Susunan naskah dibuat sebagai berikut:

NO	POKOK BAHASAN	POKOK PIKIRAN
I	Judul (<i>Title</i>)	Pada halaman judul makalah/karya tulis dicantumkan nama setiap penulis dengan jumlah penulis maksimum 5 orang, nama dan alamat institusi bagi masing-masing penulis; disarankan dibuat catatan kaki yang berisi nomor telepon, faximile serta email.
II	Abstrak dan Abstract	Berisi ringkasan pokok bahasan lengkap dari keseluruhan isi naskah seperti latar belakang (yaitu berupa alasan ilmiah ataupun alasan keperluan penting mengapa tulisan ini dipublikasikan), obyek yang diteliti, permasalahan riset, tujuan riset, kegunaan hasil riset, metode yang digunakan dalam mencapai solusi riset tanpa harus memberikan keterangan terlalu rinci dari setiap bab, dengan jumlah maksimum 250 kata. Abstrak dicantumkan terlebih dahulu apabila naskah berbahasa Indonesia, sementara <i>Abstract</i> tercantum di bawah Abstrak; dan berlaku sebaliknya apabila naskah ditulis dalam bahasa Inggris. Disarankan disertai kata kunci/ <i>keyword</i> yang ditulis di bawah Abstrak/ <i>Abstract</i> , terdiri dari 4 hingga 6 kata. <i>Abstract</i> atau abstrak yang ditulis di bawah abstrak atau <i>abstract</i> menggunakan <i>italic font</i> .

PEDOMAN PENULISAN

III	Pendahuluan (Introduction)	Bab ini dapat berisi latar belakang (alasan ilmiah dan maksud penelitian fenomena aktual bermasalah sebagai tema sentral penelitian), masalah aktual yang perlu solusi, pengantar tentang profil wilayah/lokasi kajian/riset, tujuan penelitian, spesifik, metode riset, hipotesis (kalau ada) dengan gaya bahasa lebih populer dengan bab dan sub-bab tidak perlu menggunakan nomor. Bab berisi pernyataan yang mencukupi sehingga pembaca dapat memahami dan mengevaluasi hasil penyelidikan/penelitian yang berkaitan dengan topik makalah/karya tulis.
IV	Metodologi (Methodology)	Metode yang digunakan harus spesifik dan jelas, mencakup uji-uji hipotesis atau model-model uji statistik, dapat menghimpun data primer/ <i>sampling</i> , cara pengukuran dan komputasi.
V	Hasil dan Pembahasan (Results and Discussion)	Berisi hasil-hasil penyelidikan/penelitian yang disajikan dengan tulisan, tabel, grafik, gambar maupun foto diberi nomor secara berurutan. Hindarkan penggunaan grafik secara berlebihan apabila dapat disajikan dengan tulisan secara singkat. Pencantuman foto atau gambar tidak berlebihan dan hanya mewakili hasil penemuan. Semua tabel, grafik gambar dan foto yang disajikan harus diacu dalam tulisan dengan keterangan yang jelas dan dapat dibaca. <i>Font</i> huruf/angka untuk keterangan tabel, gambar dan foto berukuran minimum <i>6 point</i> . Berisi tentang analisis/interpretasi dan bahasan singkat mengenai penjabaran hasil verifikasi/validasi yang ditekankan kepada kejelasan penelitian, keterlibatan aneka variabel dan peristiwa atau produk dari penelitian tersebut.
VI	Kesimpulan dan Saran (Conclusions and Recommendation)	Berisi kesimpulan dan saran dari hasil uji hipotesis tentang penelitian, dan berisi segitiga konsistensi (masalah, tujuan dan kesimpulan).
VII	Ucapan Terima Kasih (Acknowledgements)	Dapat digunakan untuk menyebutkan sumber dana penyelidikan/penelitian dan untuk pernyataan penghargaan kepada institusi atau orang yang membantu dalam pelaksanaan penyelidikan/penelitian dan penulisan makalah/karya tulis.
VIII	Acuan (References)	Acuan ditulis dengan menggunakan sistem nama tahun, nama penulis/pengarang yang tercantum didahului oleh nama akhir (<i>surname</i>), disusun menurut abjad dan judul makalah/karya tulis ditulis dengan huruf miring (<i>italic font</i>)

Beberapa contoh penulisan sumber acuan:

Jurnal

Harvey, R.D. dan Dillon, J.W., 1985. *Maceral distribution in Illinois cals and their palaeoenvironmental implication*. International Journal of Coal Geology, 5, h.141-165.

Buku

Petters, W.C., 1987. Exploration and Mining Geology. John Wiley & Sons, New York, 685 h.

Bab dalam Buku

Chen, C.H., 1970. Geology and geothermal power potential of the Tatun volcanic region. Di dalam : Barnes, H.L. (ed.), 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits, 2nd edition, John Wiley and Sons, New York, h.632-683.

Prosiding

Suwarna, N. dan Suminto, 1999. *Sedimentology and Hydrocarbon Potential of the Permian Mengkarang Formation, Southern Sumatera*. Proceedings Southeast Asian Coal Geology, Bandung.

Skripsi/Tesis/Disertasi

DAM, M.A.C., 1994. The Late Quaternary evolution of The Bandung Basin, West Java, Indonesia. Ph.D Thesis at Dept. of Quaternary Geology Faculty of Earth Science Vrije Universiteit Amsterdam, h.1-12.

Informasi dari Internet

Cantrell, C., 2006. Sri Lanka's tsunami drive blossom : Local man's effort keeps on giving. [Http://www.boston.com/news/local/articles/2006/01/26/sri_lankas_tsunami_Drive_blossoms/](http://www.boston.com/news/local/articles/2006/01/26/sri_lankas_tsunami_Drive_blossoms/)[26 Jan 2006].

Wewenang Redaksi

- Redaksi berwenang penuh melakukan penyuntingan atas naskah yang akan dipublikasikan tanpa mengubah substansi isi naskah.
- Redaksi mempunyai hak dan wewenang penuh untuk menolak naskah dengan isi dan format yang tidak sesuai dengan pedoman penulisan Buletin Sumber Daya Geologi dan tidak berkewajiban untuk mengembalikan naskah tersebut.

Pengiriman Naskah

Penulis dimohon untuk mengirimkan 1 eksemplar naskah asli baik *hardcopy* maupun *softcopy* kepada:

Sekretariat Buletin Sumber Daya Geologi
Bagian Tata Usaha, Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung, 40254
Telepon. (022) 520 2698, 522 6270
Fax. (022) 522 6270, 522 6263
Email: buletinpsdg@gmail.com
OJS: <http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>

SERTIFIKAT

Direktorat Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan,
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi



RISTEKDIKTI

Kutipan dari Keputusan Direktur Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan,
Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia
Nomor: 21/E/KPT/2018, Tanggal 9 Juli 2018
Tentang Hasil Akreditasi Jurnal Ilmiah Periode I Tahun 2018

Nama Jurnal Ilmiah
Buletin Sumber Daya Geologi
E-ISSN: 2580-1023
Penerbit: Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Kementerian ESDM

Ditetapkan sebagai jurnal ilmiah

TERAKREDITASI PERINGKAT 2

Akreditasi berlaku selama 5 (lima) tahun, yaitu
Volume 1 Nomor 1 Tahun 2016 sampai Volume 15 Nomor 3 Tahun 2020

Direktur Jenderal Penguatan Riset dan Pengembangan
JENDERAL
DIREKTORAT
PENGUATAN RISET
DAN PENGEMBANGAN
KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI,
PENDIDIKAN DAN KULTURA
Jakarta, 9 Juli 2018



TERAKREDITASI

Dr. Muhammad Dimyati
NIP. 195912171984021001



Alamat Redaksi

Buletin Sumber Daya Geologi

Bagian Tata Usaha, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
Jalan Soekarno Hatta No. 444 Bandung 40254

Tel. (022) 522 6270, 520 2698, Fax: (022) 522 6263

Website : <http://psdg.geologi.esdm.go.id>

OJS: <http://buletinsdg.geologi.esdm.go.id>

Email: buletinpsdg@gmail.com

ISSN 1907-5367



9 771907 536770

eISSN 2580-1023



9 772580 102009