

Pemodelan 2D sistem panas bumi daerah Garut Bagian Timur menggunakan metode magnetotellurik

Riznia Aji Salam¹⁾, Udi Harmoko¹⁾ dan Tony Yulianto²⁾

¹⁾ Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

²⁾ Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia, Bandung

E-mail: ajisalam@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

This research was conducted in the eastern part of the Garut area using magnetotelluric method that aims to create 2D model of the geothermal system based on distribution of rock resistivity value. Magnetotelluric method is used because it is able to identify subsurface structure to a depth of thousands of meters. In this research, the data measured from 9 different targets area and processed based on the flow such as converting time domain data into the frequency domain, identify noise data, perform two-dimensional inversion modeling and create geothermal systems. Based on the results, also compared with the interpretation of geological data and geochemistry of rocks known clay cap, reservoir, and hot rock. Furthermore, Clay cap has a value of 4-32 Ωm resistivity on depth of 3000 m. Reservoir rock with resistivity value of 64-512 Ωm at a depth of 1500-5000 m. While hot rock with 1024-8192 Ωm resistivity value is under the reservoir rock.

Keywords: Magnetotelluric, Eastern section of the Garut, geothermal system, resistivity

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan di daerah Garut bagian Timur menggunakan metode magnetotellurik yang bertujuan untuk membuat model 2D sistem panas bumi berdasarkan sebaran nilai tahanan jenis batuan. Metode magnetotellurik digunakan karena mampu mengidentifikasi struktur bawah permukaan hingga kedalaman ribuan meter. Pada penelitian ini data diperoleh dari 9 titik pengukuran dan diolah dengan beberapa tahap seperti mengkonversi data domain waktu menjadi domain frekuensi, mengidentifikasi data yang menyimpang, melakukan inversi 2D dan membuat pemodelan sistem panas bumi. Berdasarkan hasil interpretasi yang dihubungkan dengan data geologi dan geokimia diketahui batuan penutup (clay cap), batuan sarang (reservoir), dan batuan pemanas (hot rock). Clay cap yang memiliki nilai tahanan jenis 4-32 Ωm berada di kedalaman 3000 m. Batuan reservoir dengan nilai tahanan jenis 64-512 Ωm berada di kedalaman 1500-5000 m. Sedangkan hot rock dengan nilai tahanan jenis 1024-8192 Ωm berada di bawah batuan reservoir.

Kata kunci: Magnetotellurik, Garut bagian Timur, sistem panas bumi, tahanan jenis

PENDAHULUAN

Seiring dengan bertambahnya jumlah penduduk dunia yang pesat mengakibatkan kebutuhan akan energi juga meningkat. Sedangkan ketersediaan energi di bumi jumlahnya semakin berkurang. Konsumsi energi di dunia didominasi berasal dari minyak dan gas alam. Sedangkan minyak merupakan sumber energi yang sifatnya tidak dapat diperbarui dan cadangan minyak dunia juga jumlahnya semakin menipis. Salah satu energi yang dapat berperan sebagai energi alternatif yaitu energi panas bumi. Energi panas bumi

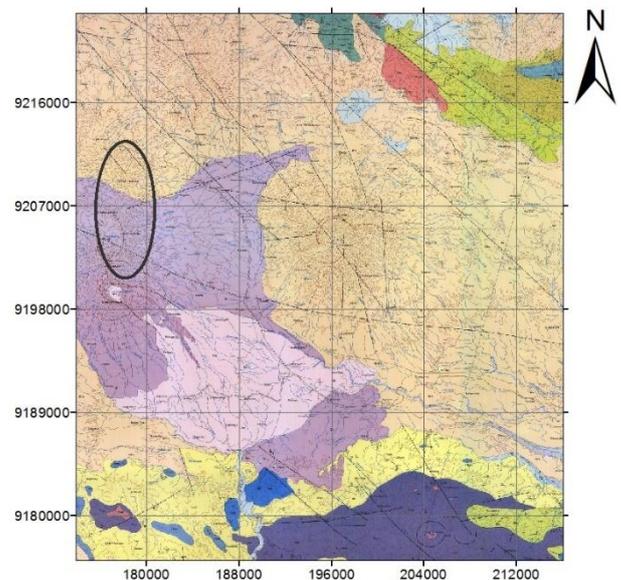
adalah energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) pada tahun 2015, terdapat 276 titik potensi panas bumi yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia. Jika ditotalkan potensi energi panas bumi Indonesia adalah sebesar 29038 MW. Potensi ini setara dengan 40 % dari cadangan panas bumi dunia. Namun hingga saat ini energi panas bumi yang telah dikembangkan sekitar 1341 MW atau setara dengan 4,7 % dari total potensi panas bumi yang ada.

Daerah Garut bagian Timur merupakan salah satu daerah di Indonesia yang mempunyai manifestasi panas bumi. Manifestasi tersebut berupa mata air panas, lumpur mendidih dan aktivitas gas seperti solfatar dan fumarol dengan suhu air berkisar 50° - 300°C . Daerah Garut bagian Timur ini berada di wilayah pegunungan dan tersusun atas batuan breksi vulkanik, batuan tufa, dan lava andesit. Berdasarkan kondisi geologinya daerah Garut bagian Timur termasuk dalam sistem panas bumi vulkanik. Pada tahun 2002, di daerah Garut bagian Timur dilakukan penelitian tentang geologi dan geokimia untuk potensi panas bumi oleh Pusat Sumber Daya Geologi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa mata air panas yang ada di sekitar daerah Garut bagian Timur tergolong jenis air bikarbonat dengan (pH 4) sampai netral ($>6,4$). Pada penelitian tersebut juga ditemukan potensi sumber panas bumi di Garut bagian timur, sehingga dirasa perlu dilakukan penelitian dengan membuat pemodelan sistem panas bumi sebagai dasar untuk mengetahui besarnya potensi energi panas bumi di daerah tersebut [1].

Salah satu metode geofisika yang efektif untuk untuk eksplorasi panas bumi adalah metode Magnetotellurik. Karena kemampuan metode magnetotellurik dalam memetakan nilai tahanan jenis batuan pada sistem panas bumi. Metode magnetotellurik merupakan metode pasif yang digunakan untuk mengetahui keadaan bawah permukaan dengan menggunakan induksi elektromagnetik di bawah permukaan bumi. Pasif disini artinya metode magnetotellurik menggunakan sumber alami yaitu sumber yang berasal dari dalam bumi. Metode magnetotellurik melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang digunakan untuk mengukur nilai konduktivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter sampai kedalaman beberapa kilometer. Dari pemetaan bawah permukaan ini dapat diketahui dimana letak sistem panas bumi

dengan lebih akurat, seperti *clay cap*, *reservoir*, dan *hot rock*.

Penelitian dengan metode magnetotellurik ini bertujuan untuk membuat pemodelan sistem panas bumi daerah Garut bagian Timur berdasarkan persebaran nilai tahanan jenis. Penelitian ini menggunakan data magnetotellurik sekunder hasil akuisisi Tim Pusat Penelitian Geoteknologi (LIPI) Bandung yang dilakukan pada tanggal 16 sampai 21 Mei 2016. Hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan untuk mengetahui besarnya potensi energi panas bumi di daerah Garut bagian Timur. Dan data penelitian dapat digunakan sebagai data base kepanasbumian di Indonesia. Daerah penelitian yaitu Garut bagian Timur secara pemerintahan termasuk ke dalam daerah Kabupaten Garut, namun daerah tersebut berada di lembar peta geologi Tasikmalaya.



Gambar 1. Peta Geologi Tasikmalaya, lingkaran hitam menunjukkan daerah penelitian

DASAR TEORI

Sistem panas bumi tersusun atas komponen penyusun sistem panas bumi seperti batuan pemanas (*hot rock*), batuan sarang (*reservoir*) dan batuan penudung (*clay cap*)

serta fluida atau air. *Hot rock* berfungsi sebagai sumber panas, yang dapat berwujud tubuh terobosan granit maupun bentuk-bentuk batolit lainnya. Panas yang dihasilkan oleh pergerakan sesar aktif kadang-kadang juga berfungsi sebagai sumber panas, seperti sumber mata air panas di sepanjang jalur sesar aktif. *Reservoir* berfungsi sebagai penampung air yang telah terpanasi atau uap yang telah terbentuk. *Clay cap* berfungsi sebagai penutup air panas atau uap sehingga tidak merembes ke luar. Batuan *clay cap* yang bersifat impermeabel menyebabkan batuan tersebut tidak mudah ditembus atau dilalui baik oleh fluida maupun uap [2].

Terdapat berbagai klasifikasi sistem panas bumi yang diajukan oleh peneliti. Umumnya pembagian klasifikasi sistem panas bumi didasarkan pada beberapa aspek seperti asal fluida, suhu fluida di *reservoir* dan jenis sumber panas.

Asal Fluida

Sistem panas bumi berdasarkan asal fluida dibagi menjadi dua yaitu *cyclic system* dan *storage system*. *Cyclic system* yaitu sistem panas bumi dimana fluidanya berasal dari air meteorik yang mengalami infiltrasi dan masuk jauh ke bawah permukaan, kemudian terpanaskan, dan bergerak naik ke permukaan sebagai fluida panas. Sedangkan *storage system* sistem panas bumi yang fluidanya terbentuk apabila air tersimpan pada batuan dalam skala waktu geologi yang cukup lama dan terpanaskan secara insitu, baik sebagai fluida dalam formasi maupun sebagai air dari proses hidrasi pada mineral [3].

Suhu Reservoir

Sistem panas bumi berdasarkan suhu reservoirnya dibagi menjadi tiga yaitu suhu rendah, sedang (*intermediate*) dan tinggi. Sistem bersuhu rendah memiliki temperatur *reservoir* <125°C, sistem bersuhu sedang memiliki rentang temperatur *reservoir* antara

125°-225°C, sedangkan sistem bersuhu tinggi memiliki suhu *reservoir* >225°C [4].

Jenis Sumber Panas

Terdapat dua jenis sistem panas bumi berdasarkan sumber panasnya yaitu *volcanogenic* dan *non-volcanogenic*. *Volcanogenic system* adalah sistem panas bumi yang sumber panasnya berasal dari aktivitas magma. Dan *non-volcanogenic system* adalah sistem panas bumi yang sumber panasnya tidak berkaitan dengan aktivitas vulkanisme [5].

Sistem panas bumi di Indonesia berdasarkan tatanan geologinya, dikelompokkan menjadi 3 yaitu sistem panas bumi vulkanik, sistem panas bumi vulkanotektonik, dan sistem panas bumi non-vulkanik. Sistem panas bumi vulkanik adalah sistem panas bumi yang berasosiasi dengan gunung api kuartar, biasanya tersusun oleh batuan vulkanik menengah (andesit-basaltis) hingga asam dengan karakteristik temperatur *reservoir* yang tinggi (240°C – 370°C). Sistem panas bumi vulkanotektonik adalah sistem panas bumi yang berasosiasi dengan struktur graben dan kerucut vulkanik yang umumnya ditemukan pada daerah jalur Sesar Sumatra (Sesar Semangko). Sistem panas bumi non-vulkanik adalah sistem panas bumi yang tidak berkaitan langsung dengan proses vulkanisme dan pada umumnya berada pada jalur vulkanik kuartar [6].

Metode magnetotellurik (MT) merupakan metode elektromagnetik pasif yang mengukur fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi yang dapat digunakan untuk mengetahui nilai konduktivitas bawah permukaan bumi dari kedalaman puluhan meter hingga ribuan meter [7]. Pada metode ini gelombang elektromagnetik (EM) yang digunakan adalah gelombang elektromagnetik alami yang berasal dari ionosfer yang kemudian berinteraksi dengan medium yang memiliki nilai tahanan jenis tertentu sehingga

dapat dimanfaatkan untuk mencitrakan kondisi struktur tahanan jenis batuan bawah permukaan bumi [8].

Dengan memanfaatkan gelombang EM, metode ini dapat mencitrakan kondisi bawah permukaan pada tingkat kedalaman yang cukup tinggi. Karena frekuensi yang digunakan pada gelombang EM tersebut sangat rendah yaitu 300 – 0,001 Hz. Sehingga kemampuan gelombang tersebut untuk dapat masuk ke bagian bawah permukaan bumi memiliki tingkat penetrasi yang tinggi.

Sifat penjalaran gelombang elektromagnetik ke bawah permukaan bumi memenuhi persamaan Maxwell dalam kaitannya dengan medan magnet dan medan listrik. Persamaannya dirumuskan sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad \text{Hukum Faraday} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad \text{Hukum Ampere} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \text{Hukum Gauss Magnetik} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad \text{Hukum Gauss} \quad (4)$$

Dengan \vec{E} merupakan medan listrik (V/m), \vec{B} adalah induksi magnetik (W/m²), \vec{H} adalah medan magnetik (A/m), \vec{D} adalah perpindahan muatan listrik (C/m²), \vec{j} adalah rapat arus listrik (A/m²), dan q adalah rapat muatan listrik (Coulomb/m³) [9].

Sumber sinyal metode magnetotellurik berasal dari medan elektromagnetik yang berubah-ubah terhadap waktu yaitu berasal dari petir dan *solar wind*. Besar medan elektromagnetik dengan frekuensi diatas 1 Hz berasal dari petir sedangkan frekuensi dibawah 1 Hz berasal dari interaksi *solar wind* dengan medan magnetik bumi [10].

Untuk mengetahui jangkauan penetrasi gelombang EM digunakan *skin depth*. *Skin depth* diartikan sebagai kedalaman pada suatu medium homogen dimana amplitudo gelombang elektromagnetik telah tereduksi menjadi 1/e dari amplitudo di permukaan bumi (ln e = 1 atau e = 2.718...). Besaran tersebut dirumuskan pada Persamaan (5).

$$\delta = 0,5 \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu\sigma}} \quad (5)$$

Atau dapat juga ditulis seperti pada Persamaan (6).

$$\delta \approx 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (6)$$

dengan δ dalam meter, ρ adalah tahanan jenis suatu medium homogen atau ekuivalensinya dalam Ωm , dan $\omega = 2\pi f$. Besaran skin depth digunakan untuk memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman jangkauan gelombang elektromagnetik [11].

Dalam penelitian ini yang dicari adalah sebaran nilai tahanan jenis batuan bawah permukaan. Untuk mengetahui nilai tahanan jenis bawah permukaan dengan memanfaatkan gelombang EM yaitu menggunakan impedansi. Impedansi merupakan besaran fisika yang mampu mendeskripsikan resistansi terhadap gelombang elektromagnetik. Impedansi (Z) merupakan *tensor* yang menghubungkan medan listrik dengan medan magnet.

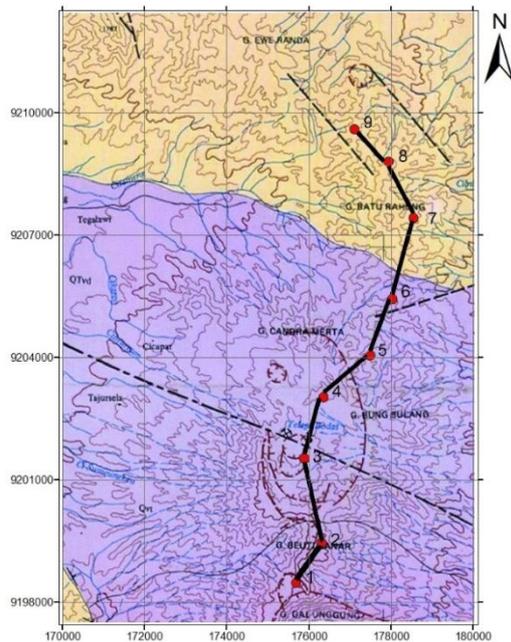
$$\vec{E} = \vec{Z} \cdot \vec{H} \quad (7)$$

Impedansi bergantung pada tahanan jenis medium atau batuan, maka impedansi sebagai sebagai fungsi dari periode memberikan informasi tahanan jenis medium sebagai fungsi kedalaman (12).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 12 September hingga 11 November 2016 di Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Geoteknologi Bandung, Jawa Barat. Pada pengolahan data ini, alat yang digunakan adalah komputer dan beberapa perangkat lunak atau *software* seperti Synchro Time Series View, SSMT 2000, MT Editor 90, WinGlink, dan CoreIDRAW X8. Dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder magnetotellurik Garut bagian Timur dengan 9 titik pengukuran dengan jarak antar titik yaitu 1-2 km. Akuisisi data dilakukan tanggal 16 hingga 19 Mei 2016.

Pengolahan data dilakukan melalui beberapa tahap yaitu: *pre-processing*, inversi 2D, pemodelan, dan interpretasi data.



Gambar 2. Titik pengukuran metode magnetotellurik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pre-Processing

Pre-processing yaitu melakukan pengolahan data yang hasilnya akan menjadi data masukan dalam melakukan inversi 2D. Yaitu melakukan seleksi data *time series* hasil akuisisi menggunakan *software* Synchro Time Series View sehingga didapatkan data *time series* terbaik. Kemudian dilakukan transformasi *Fourier* menggunakan *software* SSMT 2000. Transformasi *Fourier* yaitu mengubah data *time series* menjadi data domain frekuensi. Karena dalam melakukan interpretasi diperlukan nilai tahanan jenis terhadap kedalaman. Oleh karena itu data yang memiliki domain waktu harus ditransformasikan menjadi domain frekuensi agar dapat memperlihatkan persebaran nilai tahanan jenis bawah permukaan sehingga

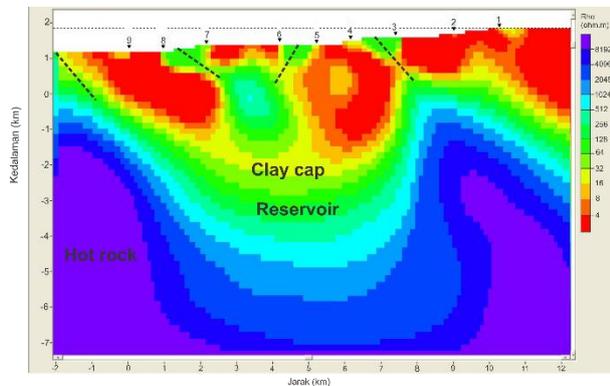
dapat diketahui komponen sistem panas buminya. Pada *software* ini juga dilakukan *Robust processing* yaitu pemrosesan statistik terhadap data magnetotellurik untuk mereduksi data-data yang menyimpang dari pola data utama. Data keluaran dari *software* ini yaitu berformat “.MTH” untuk frekuensi tinggi dan “.MTL” untuk frekuensi rendah. Selanjutnya dilakukan seleksi *crosspower* dengan menggunakan *software* MT Editor 90. Yaitu melakukan pembersihan *noise* dengan menggunakan prinsip *robust processing* secara manual. Seleksi ini dilakukan supaya kurva *crosspower* memiliki *trend* yang baik dengan cara menempatkan bagian-bagian dari *crosspower* sesuai dengan *trend* yang seharusnya. *Trend* dari kurva ini diharapkan dapat memperlihatkan kondisi geologi daerah penelitian.

Setelah melakukan serangkaian langkah dalam *pre-processing* MT (Synchro Time Series View, SSMT2000, MTEditor90), diperoleh kurva untuk 9 titik pengukuran. Dari ke-9 data tersebut, masing-masing kurva memiliki kualitas yang berbeda-beda. Kriteria dari kualitas kurva MT dilihat berdasarkan *trend* dan *error bar*. Dalam penelitian ini terdapat 3 kriteria dari kualitas kurva MT, yaitu Very good, Good dan Fair. Very good merupakan kurva yang mempunyai kualitas kurva yang sangat baik, yaitu memiliki *trend* yang sangat baik namun memiliki *error bar* yang kecil. Good merupakan kurva dengan kualitas baik, yaitu memiliki *trend* yang baik namun memiliki *error bar* yang besar. Dan Fair adalah kualitas kurva yang cukup baik, masih terlihat adanya *trend* dan memiliki *error bar* yang sangat besar. Dari semua hasil kurva MT yang diperoleh, maka penulis dapat mengelompokkan kurva-kurva tersebut berdasarkan kriteria kualitas yang telah dijelaskan sebelumnya. Hasilnya yaitu ada 3 kurva yang masuk dalam kriteria kualitas kurva Very good yaitu kurva Titik 1, Titik 7 dan Titik 9. Ada 3 kurva yang dapat masuk kriteria kualitas kurva Good yaitu kurva Titik 3, Titik 4 dan Titik 5. Sedangkan kurva yang

masuk dalam kriteria kualitas kurva Fair adalah kurva Titik 2, Titik 6 dan Titik 8.

Inversi 2D

Proses inversi ini menggunakan algoritma inversi NLCG atau *non linier conjugate gradients* yang digunakan untuk menstabilkan proses inversi dan mengurangi solusi ketidak mungkinan dengan menggunakan model *smoothing* pada data MT yang terukur. Inversi 2D ini menghasilkan gambaran tentang struktur bawah permukaan daerah penelitian berdasarkan sebaran nilai tahanan jenis batuan penyusunnya.

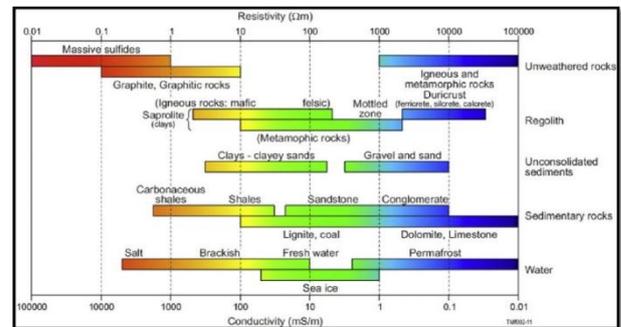


Gambar 3. Hasil inversi 2D struktur bawah permukaan Garut bagian Timur

Hasil inversi 2D ini menggunakan iterasi sebanyak 180 kali dengan nilai RMS sebesar 2.6 %. Dari gambar tersebut kita dapat mengetahui letak komponen penyusun sistem panas bumi seperti *clay cap*, *reservoir* dan *hot rock*.

Sebelumnya dilakukan korelasi antara nilai tahanan jenis batuan dengan sistem panas bumi. Batuan dengan nilai tahanan jenis 1 sampai >10 Ω m menjadi batuan penutup (*clay cap*) dalam sistem panas bumi. Batuan yang memiliki nilai tahanan jenis sekitar 50 sampai >100 Ω m dan menjadi batuan *reservoir* dalam sistem panas bumi. Sedangkan batuan yang mempunyai nilai tahanan jenis sekitar 1000 sampai >1000 Ω m dan menjadi batuan pemanas (*hot rock*) dalam sistem panas bumi [13]. Dan juga melakukan korelasi nilai

tahanan jenis untuk mengetahui batuan yang menjadi penyusun komponen sistem panas bumi.



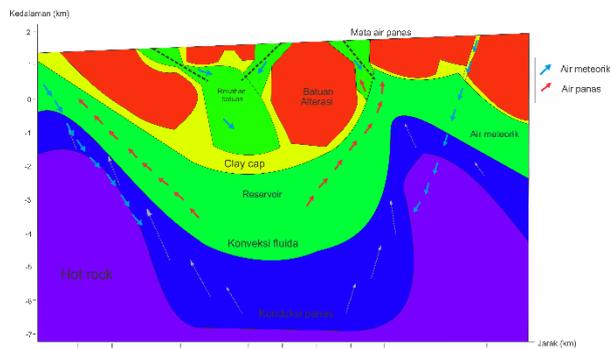
Gambar 4. Nilai tahanan jenis batuan

Hasilnya, Batuan penutup (*clay cap*) pada pemodelan 2D sistem panas bumi daerah Garut bagian Timur ditunjukkan dengan warna merah hingga kuning dengan nilai tahanan jenis berkisar 4 – 32 ohm.m [13]. Batuan penutup ini tersusun atas formasi batuan breksi, tufa dan lempung dan berada di permukaan hingga kedalaman 3000 m dibawah permukaan tanah [14]. Batuan *reservoir* pada pemodelan 2D sistem panas bumi daerah Garut bagian Timur ditunjukkan oleh warna hijau sampai biru muda dengan nilai tahanan jenis berkisar 64 – 512 ohm.m [13]. Tersusun atas formasi batu pasir dan terletak pada kedalaman antara 1500 – 5000 m dibawah permukaan tanah [14]. Batuan pemanas (*hot rock*) pada pemodelan 2D sistem panas bumi bagian Timur ditunjukkan oleh warna biru hingga warna ungu dengan nilai tahanan jenis antara 1024 – 8192 ohm.m [13]. Batuan pemanas yang terdapat pada sistem panas bumi daerah Garut bagian Timur tersusun atas batuan metamorf dan beku (*igneous rock*) [14]. Batuan pemanas terdapat di bawah batuan *reservoir*.

Sistem Panas Bumi Garut Bagian Timur

Berdasarkan asal fluidanya sistem panas bumi daerah Garut bagian Timur termasuk dalam sistem panas bumi *cyclic system* karena berasal dari air meteorik,

sedangkan jenis sumber panasnya Garut bagian Timur termasuk dalam sistem panas bumi *volcanogenic system* karena sumber panas berasal dari aktivitas magma. Dan jika dilihat dari tatanan geologinya Garut bagian Timur termasuk dalam sistem panas bumi vulkanik. Selain letaknya di pegunungan, sistem panas bumi ini tersusun oleh batuan vulkanik menengah (andesit-basal).



Gambar 5. Konseptual model sistem panas bumi Garut bagian Timur

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa terjadinya perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Perpindahan panas secara konduksi terjadi antara *hot rock* dengan *reservoir*, sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi antara *reservoir* yang terpanaskan dengan fluida di dalamnya. Fluida yang berada di dalam *reservoir* merupakan air meteorik yang berasal dari permukaan. Dari perpindahan panas tersebut menghasilkan air panas dan uap yang kemudian muncul di permukaan sebagai manifestasi panas bumi melalui sesar.

Clay cap merupakan penutup pada zona impermeabel yang umumnya berupa batuan yang bersifat kedap air dan tidak memiliki rongga seperti batu lempung. Pada daerah Garut bagian Timur, batuan penutup yang tersusun atas batu lempung berada di kedalaman 3000 m. *Reservoir* merupakan daerah lapisan bawah permukaan yang memiliki batuan yang bersifat permeabel dan tersekat oleh batuan penutup. Pada daerah Garut bagian Timur, batuan *reservoir* terdapat

di kedalaman 1500 m – 5000 m yang tersusun atas batu pasir. Batuan pemanas yang berfungsi sebagai sumber panas pada sistem panas bumi pada daerah Garut bagian Timur terdapat di bawah batuan sarang (*reservoir*) yang tersusun atas batuan beku dan metamorf.

KESIMPULAN

Pemodelan sistem panasbumi daerah Garut bagian Timur menunjukkan bahwa batuan penutup (*clay cap*) yang mempunyai sifat konduktif berada pada kedalaman 3000 m. Batuan *reservoir* terletak di kedalaman 1500 m – 5000 m. Pada batuan *reservoir* terjadi perpindahan panas secara konduksi dan konveksi yang menghasilkan fluida panas yang kemudian bergerak naik ke permukaan melalui rekahan-rekahan batuan membentuk manifestasi panas bumi yaitu manifestasi mata air panas. Di bawah batuan *reservoir* diinterpretasikan sebagai batuan pemanas (*hot rocks*). Pada pemodelan ini juga terdapat adanya sesar yang berfungsi sebagai zona permeabel jalur keluarnya air panas ke permukaan dan menghasilkan manifestasi panas bumi. Berdasarkan nilai tahanan jenisnya, batuan penutup (*clay cap*) daerah Garut bagian Timur tersusun atas batuan breksi, tufa dan batuan lempung. Sedangkan batuan *reservoir* tersusun atas batu pasir, dan batuan pemanas (*hot rock*) tersusun atas batuan beku dan metamorf.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Tambunan, F. A. (2002) *Penafsiran Data Geokimia Untuk Potensi Sumber Panas Bumi Di Daerah Gunung Telaga Bodas, Kabupaten Garut, Provinsi Jawa Barat*, Departemen Energi Dan Sumberdaya Mineral Direktorat Inventarisasi Sumberdaya Mineral, Bandung.
- [2] Broto, S., dan Triadi, P. T. (2011) *Aplikasi Metode Geomagnet Dalam Eksplorasi Panasbumi*, Teknik, Vol. 32, Hal. 80.

- [3] Ellis, A., J, dan Mahon, W. A. (1977) *Chemistry and geothermal systems*, Academic Press, New York.
- [4] Hochstein, M. P., dan Browne, P., L (2000) *Encyclopedia of Volcanoes: Surface Manifestations of Geothermal Systems with Volcanic Heat Sources*, Geothermal Institute, University of Auckland
- [5] Nicholson, K. (1993) *Geothermal Fluids: Chemistry and Exploration Techniques*, The Robert Gordon University, Aberdeen, Scotland.
- [6] Kasbani (2009) *Tipe Sitem Panasbumi di Indonesia dan Estimasi Potensi Energinya*, Kolokium Sumber Daya Geologi Vol. 4 No. 3.
- [7] Simpson, F., dan Bahr, K. (2005) *Practical Magnetotelluric*, Cambridge University Pers, United kingdom.
- [8] Agung, L. (2009) *Pemodelan Sistem Geothermal Dengan Menggunakan Metode Magnetotelurik di Daerah Tawau, Sabah, Malaysia*, Universitas Indonesia, Depok.
- [9] Telford, W. M., Geldart, L. P., dan Sheriff, R. E. (2004) *Applied Geophysics Second Edition*, Cambridge University Press
- [10] Naidu, G. D. (2012) *Deep Crustal of the Son-Narmada-Tapti Lineament*, Hal. 13-35, Springer Verlag Berlin Heidelberg, India.
- [11] Xiao, W., 2004, *Magnetotelluric Exploration in the Rocky Mountain Foothills*, Departemen of Physics, University of Alberta, Alberta.
- [12] Cantwell, T. (1960) *Detection and Analysis of Low Frequency Magnetotelluric Signals*, Massachusets Institute of Technology, Massachusets.
- [13] Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., dan Anderson, E. (2000) *Understanding Resistivity Observed in Geothermal System*, Proceeding World Geothermal Congress, Kyushu – Tohoku, Japan, Hal. 1915 – 1920.
- [14] Palacky, G. J. (1987) *Resistivity Characteristic of Geologic Targets, in Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Theory*, Vol. 1, SEG Publishing.