

## DETERMINASI ZONA RESERVOIR DENGAN DATA MAGNETOTELURIK DI ZONA PROSPEK PANAS BUMI TELAGA NGEBEL, JAWA TIMUR

Zelya Agitha H.<sup>1\*</sup>, Agus Dudit Haryanto<sup>1</sup>, Yusi Firmansyah<sup>1</sup>,

Muhammad Kurniawan Alfadli<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Geologi Universitas Padjadjaran, Bandung

\*Korespondensi: zelyaagitha@gmail.com

### ABSTRAK

Penelitian mengenai determinasi zona reservoir yang telah dilakukan di daerah Telaga Ngebel, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui persebaran resistivitas sehingga dapat diketahui sistem panas bumi pada daerah penelitian. Metode yang digunakan dalam pengolahan data ini adalah metode magnetotellurik, akuisisi data magnetotellurik dilakukan sebanyak 40 titik yang terbagi menjadi 4 lintasan. Berdasarkan hasil pengolahan data magnetotellurik diperoleh rentang nilai resistivitas berkisar antara  $0 \Omega \cdot m$  –  $2000 \Omega \cdot m$ . Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem panas bumi di daerah Telaga Ngebel terdiri dari lapisan penudung dengan nilai resistivitas kurang dari  $10 \Omega \cdot m$ , lapisan reservoir dengan nilai resistivitas  $10 \Omega \cdot m$  hingga  $239 \Omega \cdot m$ , dan lapisan sumber panas dengan nilai resistivitas lebih dari  $239 \Omega \cdot m$ .

**Kata kunci:** magnetotellurik, panas bumi, reservoir, Telaga Ngebel

### ABSTRACT

The research has been done in Telaga Ngebel, Ponorogo, East Java. The purpose of this research is to determine the distribution of resistivity to identify the geothermal system of research area. This research using magnetotelluric method, acquisition of magnetotelluric data done in 40 points is divided into 4 sections. Based on the result of data processing given range resistivity value in research area between  $0 \Omega \cdot m$  –  $2000 \Omega \cdot m$ . The result of modeling geothermal system in Telaga Ngebel indicated of caprock with a resistivity value of less than  $10 \Omega \cdot m$ , reservoir with a resistivity value between  $10 \Omega \cdot m$  until  $239 \Omega \cdot m$ , and heat source with a resistivity value of more than  $239 \Omega \cdot m$ .

**Keywords:** geothermal, magnetotelluric, reservoir, Telaga Ngebel

### 1. PENDAHULUAN

Panasbumi adalah sumber daya alam baru yang ramah lingkungan dan bersifat terbarukan dan dibutuhkan untuk pemenuhan energi listrik di seluruh pelosok Indonesia. Pengembangan dan pemanfaatan energi baru dan energi terbarukan mempunyai peranan penting dalam kemandirian energi di Indonesia. Kebutuhan Indonesia akan energi listrik akan terus meningkat setiap tahunnya, namun sebaliknya persediaan sumber daya energi konvensional yang tidak terbarukan seperti minyak dan gas bumi terus berkurang dan berpotensi merusak lingkungan. Oleh karena

itu, Indonesia membutuhkan sumber energi yang terbarukan, melimpah, dan ramah lingkungan. Salah satu sumber energi yang memiliki karakteristik seperti itu adalah energi panas bumi. Akan tetapi, perkembangan pemanfaatan geothermal di Indonesia sebagai energi alternatif terbarukan dapat dikatakan berjalan lambat padahal penggunaan energi panasbumi ini tampaknya lebih ramah lingkungan dibandingkan energi fosil konvensional lainnya.

Sistem panasbumi memiliki tiga elemen penting yaitu sumber panas, reservoir, dan fluida pembawa panas. Sumber panas dapat

berupa intrusi magma yang memiliki temperatur sangat tinggi ( $>600^{\circ}\text{C}$ ), reservoir tersusun atas batuan yang bersifat permeabel yang merupakan tempat terakumulasinya fluida pembawa panas dan dilingkupi oleh lapisan penudung.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

### Geologi Regional Daerah Penelitian

Daerah penelitian berada di bagian barat geologi lembar Madiun, Jawa skala 1 : 100.000 yang tersusun oleh batuan gunungapi yang berumur Plistosen Awal. Batuan gunungapi tersebut terdiri dari Morfosept Ngebel yang tersusun oleh breksi gunungapi berkeping andesit piroksen, andesit hornblende dan diorite, tuf dan konglomerat gunungapi (U. Hartono, Baharuddin dan K. Brata, 1992).

Pulau Jawa merupakan bagian dari kepulauan busur volkanik yang berlokasi di Kepulauan Indonesia di batas selatan Lempeng Eurasia. Pergerakan konvergen dari Lempeng Indo-Australia dan Eurasia menghasilkan subduksi di Busur Sunda. Keberadaan zona subduksi dan deretan gunungapi di sepanjang Pulau Jawa memberikan peranan yang sangat penting terhadap pembentukan sistem panas bumi di Pulau Jawa. Proses magmatisme yang timbul akibat tumbukan lempeng dan pembentukan gunungapi bertindak sebagai sumber panas pada sistem panas bumi yang berada di Pulau Jawa.

### Panas Bumi

Menurut Dickson dan Fanelli (2004), energi panas bumi merupakan energi panas yang berasal dari dalam bumi yang dapat diekstrak dan di eksploitasi oleh manusia. Panas itu sendiri merupakan suhu bumi yang telah ada sejak bumi terbentuk dan bias berasal dari bola gas pijar yang terlepas dari matahari yang kemudian membentuk bumi, proses isotermis bumi atau proses pembusukan mineral radioaktif (Alzwar, 1987).

Pada dasarnya sistem panas bumi terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari suatu sumber panas ke sekelilingnya

yang terjadi secara konduksi melalui batuan dan secara konveksi kontak air dengan sumber panas (Utami, 1998) White (1967) berpendapat, bahwa fluida panas bumi yang terkandung dalam reservoir hidrotermal berasal dari air permukaan dan terpanaskan oleh suatu sumber panas. Air tersebut akan masuk melalui rekahan-rekahan kedalam batuan permeable. Apabila disekitar batuan tersebut terdapat sumber panas, maka panas akan dirambatkan melalui batuan (secara konduksi) dan melalui fluida (secara konveksi). Perpindahan panas secara konveksi pada dasarnya terjadi karena gaya apung (*buoyancy*). Karena adanya gaya gravitasi, air selalu mempunyai kecenderungan untuk bergerak kebawah, akan tetapi apabila air tersebut kontak dengan suatu sumber panas maka akan terjadi perpindahan panas sehingga temperatur air menjadi lebih tinggi dan air menjadi lebih ringan. Keadaan ini menyebabkan air yang lebih panas bergerak ke atas dan air yang lebih dingin bergerak turun ke bawah, sehingga terjadi sirkulasi air atau arus konveksi (Saptadji, 2009).

Suatu sistem panas bumi yang ideal terdiri dari beberapa unsur yakni sumber panas, fluida, lapisan batuan permeable, dan lapisan batuan impermeable. Perpindahan panas secara konduksi terjadi saat sumber panas atau heat source memanaskan batuan permeable yang bertindak sebagai wadah bagi fluida. Proses tersebut memanaskan fluida yang berada dalam batuan permeabel yang selanjutnya menghasilkan aliran konveksi dari fluida yang kemudian tertahan oleh lapisan batuan impermeable yang kemudian terakumulasi atau keluar melalui rekahan – rekahan dalam batuan dan membentuk manifestasi – manifestasi panas bumi di permukaan.

Manifestasi inilah yang umumnya digunakan sebagai petunjuk keberadaan sistem panas bumi di suatu area.

Secara garis besar sistem panas bumi dikontrol oleh adanya sumber panas (*heat source*), batuan reservoir, lapisan penutup (*caprock*), keberadaan struktur geologi dan daerah resapan air



Menurut Dickson dan Fanelli (2004), sistem panas bumi umumnya terbentuk pada batas – batas pertemuan lempeng yang bergerak karena pada lokasi tersebut magma berada relatif lebih dekat dengan permukaan. Hal ini memudahkan ekstraksi dan eksplorasi dari sumber panas tersebut. Batas – batas lempeng tersebut antara lain pemekaran lempeng (*spreading ridges*), daerah subduksi (*convergent margin*), dan peluruhan batuan di tengah lempeng (*interpolate melting anomalies*). Sistem panas bumi dikategorikan menjadi 3 (tiga) jenis menurut Hocstein dan Browne (2000) yaitu sistem hidrotermal, sistem vulkanik, dan sistem vulkanik – hidrotermal. Sistem panasbumi yang paling banyak dimanfaatkan adalah sistem hidrotermal karena pada sistem tersebut pori – pori batuan mengandung air atau uap atau keduanya dan reservoar umumnya terletak tidak terlalu dalam sehingga masih ekonomis untuk diusahakan.

### Magnetotellurik

Metoda magnetotellurik merupakan salah satu metoda eksplorasi geofisika yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam untuk pencitraan struktur bawah permukaan berdasarkan pada distribusi nilai tahanan jenis batuan di daerah panasbumi hingga kedalaman lebih dari 3.000 meter. Dan metoda Magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode geofisika yang dinilai paling baik digunakan dalam eksplorasi panas bumi karena kemampuannya untuk memetakan nilai resistivitas batuan di sistem panas bumi (Oskooi, et al., 2005). Metoda MT adalah metoda elektromagnetik pasif yang melibatkan pengukuran fluktuasi medan listrik dan medan magnet alami yang saling tegak lurus di permukaan bumi dan dapat digunakan untuk mengetahui nilai resistivitas batuan di bawah permukaan bumi dari kedalaman beberapa meter hingga ratusan kilometer (Simpson & Bahr, 2005). Gelombang elektromagnetik alam menyebar secara vertikal di bumi karena terdapat perbedaan resistivitas antara udara dan bumi yang cukup besar. Sumber medan elektromagnetik dengan frekuensi  $<1$  Hz

berasal dari interaksi antara partikel yang dikeluarkan matahari dengan medan magnet bumi dan sumber medan elektromagnetik dengan frekuensi  $>1$  Hz berasal dari kilat atau petir. Cakupan nilai frekuensi dari medan elektromagnetik alami yang terekam adalah 300 – 0,001 Hz (Hakim, et al., 2011). Tujuan pengukuran adalah untuk mengetahui dan memahami penyebaran lapisan batuan konduktif dan resistif di bawah permukaan baik secara mendatar maupun tegak di bawah permukaan tanah yang kemungkinan berasosiasi dengan parameter utama panas bumi seperti adanya batuan sumber panas (*heat source*), reservoir, atau lapisan tudung/penutup (*caprock*).

Resistivitas merupakan kemampuan material bumi untuk menahan suatu aliran listrik ke dalam batuan di dalam bumi. Hasil yang diberikan oleh batuan dibawah permukaan berbeda-beda bergantung pada sifat kelistrikkannya. Bila suatu batuan tidak mengandung mineral lempung, maka nilai resistivitas nya bergantung pada matriks batuan, porositas, fluida pengisi pori batuan, temperatur air formasi, dan salinitas air formasi, batuan yang mengandung mineral lempung, maka aliran listrik dapat mengalir disebabkan oleh adanya ion-ion negatif dan positif bebas dalam kandungan mineral lempung sehingga resistivitas batuan mengecil.

Menurut (Hersir & Anarson, 2009), batuan yang dekat dengan permukaan, konduksi di dominasi oleh larutan konduksi elektrolit encer dari banyak garam yang terdistribusi melalui pori dari batuan dan/atau di antara batuan dan air. Faktor yang paling penting yaitu porositas, temperatur, salinitas, dan interaksi air dan batuan. Dalam area panas bumi, ion konduktif dalam fluida jenuh bergantung pada jumlah dan pergerakan dari ion dan aliran yang terhubung dengan matriks matuan (Hersir & Anarson, 2009).

### Pemodelan 1-D dan 2-D

Berdasarkan data lapangan yang diperoleh pemodelan dapat menghasilkan dua jenis pemodelan yaitu 1-D dan 2-D.

Pemodelan 1-D digunakan untuk melihat perlapisan dan persebaran dari nilai resistivitas hasil pengolahan data lapangan, namun hasil dari pemodelan 1-D hanya dapat mengetahui distribusi lapisan batuan konduktif dalam arah lateral yang hanya digunakan untuk memperkirakan luas daerah prospek panas bumi di daerah penelitian dan tidak dapat digunakan untuk interpretasi data lapangan, maka dari itu dilakukan pemodelan 2-D untuk melihat data-data yang dapat diinterpretasi.

Hasil dari pengukuran 1-D adalah kurva antara periode dengan resistivitas semu atau *apparent resistivity*. Untuk mendapatkan model resistivitas 1-D, kurva yang dihasilkan dari pengolahan data akan disesuaikan dengan kurva yang akan dibuat ketika membuat model. Dari hasil pencocokan tersebut akan menghasilkan bentuk model bawah permukaan 1-D. Sedangkan penampang MT merupakan hasil pemodelan 2-D yang dapat memperlihatkan distribusi resistivitas batuan dalam arah lateral hingga kedalaman lebih dari 3.000 meter dibawah muka tanah. Dari pemodelan ini dapat menginterpretasikan sebaran lapisan konduktif yang berasosiasi dengan lapisan ubahan. Lapisan batuan konduktif di daerah panas bumi biasanya berfungsi sebagai batuan penudung, dan batuan resistif dapat menggambarkan ketebalan reservoir.

### 3. METODE

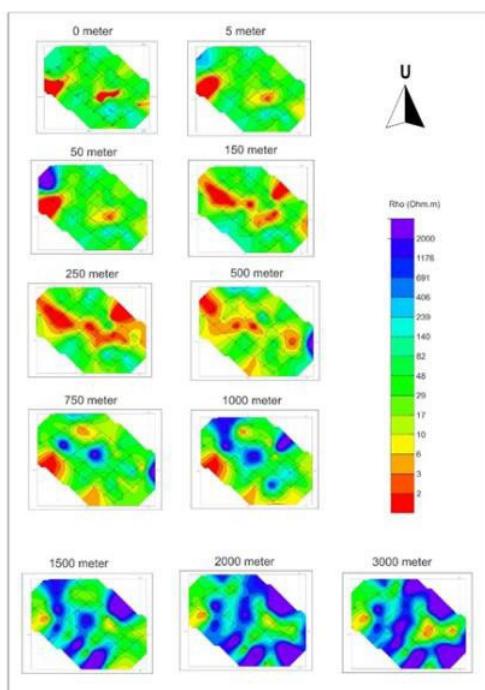
Akuisisi data magnetotellurik dilakukan sebanyak 40 titik dengan kedalaman dari dasar permukaan hingga 3000 m dibawah permukaan dan terbagi menjadi 4 lintasan yang menghasilkan model 2-D berupa penampang resistivitas bawah permukaan terhadap kedalaman dengan kontur resistivitas yang menggunakan iterasi 25 kali dan diperoleh RMS error kurang dari 10%. Pengolahan data lapangan diperoleh menggunakan perangkat lunak. Data yang didapatkan telah ber ekstensi .edi untuk dapat dilakukan pemodelan 1-D dan 2-D. Dataset transfer magnetik (TM) baik digunakan untuk penggambaran model

vertikal, sedangkan dataset transfer elektrik (TE) baik digunakan untuk penggambaran model secara horizontal atau lateral. Dataset TM sangat baik dalam penggambaran batas struktur pada analisa 2-D. Data hasil pengukuran merupakan data awal kurva sounding yang berisikan data *apparent resistivity phase* yang menunjukkan kurva dengan sumbu X *apparent rho/resistivity* dan sumbu Y periode atau waktu dari pengukuran lapangan. Setelah diperoleh resistivitas semu dan fase dalam domain frekuensi, kemudian dilakukan tahap proses pemodelan 2-D inversi yang bertujuan untuk mencari model yang paling halus dan sesuai dengan data. hasil akhir dari pengolahan data berupa model inversi 2-D struktur bawah permukaan yang berisi informasi berupa resistivitas terhadap kedalaman. Persebaran nilai resistivitas ditentukan oleh warna-warna yang sudah ditetapkan.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Isoresistivitas

Peta isoresistivitas merupakan peta yang dapat memperlihatkan pola sebaran resistivitas secara vertikal. Peta isoresistivitas daerah penelitian dianalisa dimulai dari dasar permukaan, 5 m, 50 m, 150 m, 250 m, 500 m, 750 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m dan 3000 m dibawah permukaan dan memiliki nilai resistivitas dari  $0 \Omega\text{m}$  hingga  $\geq 2000 \Omega\text{m}$ . Ketinggian dari peta isoresistivitas yang dibuat telah ditentukan berdasarkan ketinggian – ketinggian yang memiliki nilai resistivitas yang cukup signifikan. Peta isoresistivitas ini dapat menunjukkan perubahan nilai resistivitas yang mengindikasikan adanya kontrol struktur terhadap mata air hangat.



**Gambar 1** Peta Isoresistivitas menunjukkan perubahan resistivitas terhadap kedalaman

#### 4.2 Pemodelan 2-D

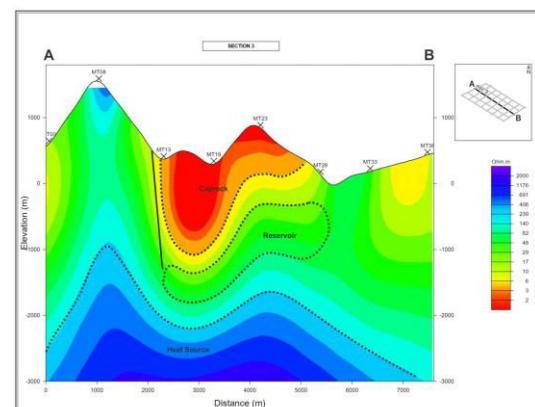
Pemodelan resistivitas dilakukan dengan inversi model dimana menghasilkan model 2-dimensi dengan menggunakan perangkat lunak. Hasil model 2-D inversi berupa penampang resistivitas bawah permukaan terhadap kedalaman. Kontur resistivitas untuk semua lintasan menggunakan iterasi 25 kali dan diperoleh RMS *error* kurang dari 10%.

Pemodelan resistivitas dibuat menjadi empat lintasan dengan arah tegak lurus dan sejajar dengan dugaan letak manifestasi.

#### Model Penampang 2-D Lintasan 1

Model penampang lintasan 3 terdiri dari titik MT03, MT08, MT13, MT18, MT23, MT28, MT33, dan MT38. Pemilihan lintasan 3 ini disesuaikan dengan arah barat laut – tenggara. Berdasarkan penampang lintasan 3, teridentifikasi adanya lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah ( $<10 \Omega\text{m}$ ) yang ditandai dengan lapisan yang

berwarna merah. Terdapat terobosan nilai resistivitas sedang ( $17 \Omega\text{m} – 406 \Omega\text{m}$ ) dan tinggi ( $>406 \Omega\text{m}$ ). Pada titik MT13 dan MT18 dengan kedalaman 1000 m dibawah permukaan sampai 50 m diatas permukaan memiliki nilai resistivitas rendah, lalu terdapat terobosan nilai resistivitas yang sedang di sekitar titik MT08 dari dasar permukaan sampai 1000 m diatas



**Gambar 2** Model Penampang 2-D Lintasan 1

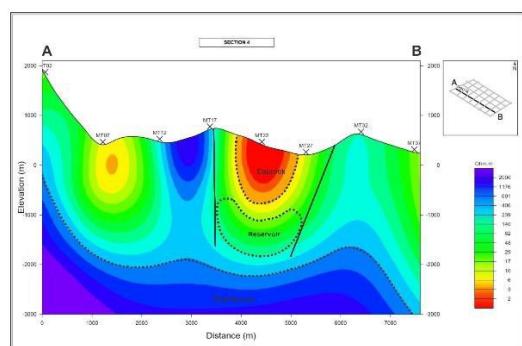
permukaan yang ditunjukkan oleh warna hijau. Pada model penampang 2-D lintasan 1 pada kedalaman 50 m hingga 1500 m dibawah permukaan telah muncul dugaan *reservoir* yang ditandai oleh nilai resistivitas rendah.

#### Model Penampang 2-D Lintasan 2

Model lintasan 2 terdiri dari titik MT02, MT07, MT12, MT17, MT22, MT27, MT32, dan MT37. Pemilihan lintasan 2 ini disesuaikan dengan arah barat laut – tenggara. Hasil dari model penampang pada lintasan 2 juga diperoleh adanya lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah ( $<10 \Omega\text{m}$ ) yang berada di titik MT07, MT12, MT22 dan MT27 pada kedalaman 0 meter sampai 1000 meter dibawah permukaan. Lapisan dengan nilai resistivitas rendah ini lebih sedikit dibandingkan pada lintasan 3. Pada lintasan ini juga teridentifikasi adanya lapisan yang memiliki nilai resistivitas sedang ( $17 \Omega\text{m} – 406 \Omega\text{m}$ ), pada model

penampang ini nilai resistivitas sedang lebih tebal dibandingkan dengan lintasan 3. Dibawah lapisan resistivitas sedang tersebut, terdapat lapisan yang memiliki nilai resistivitas tinggi ( $> 406 \Omega\text{m}$ ) pada kedalaman 2000 m sampai 3000 m dibawah permukaan yang ditandai oleh lintasan yang berwarna ungu. Pada model penampang 2-D lintasan 2 pada kedalaman 500 m hingga 1800 m di bawah permukaan telah muncul dugaan adanya *reservoir* (MT17) yang

ini juga teridentifikasi lapisan yang memiliki nilai resistivitas tinggi ( $> 406 \Omega\text{m}$ ) di bagian timur laut, selatan, dan barat laut penampang yang ditandai oleh lapisan yang berwarna ungu. Pada model penampang 2-D lintasan 3 ini terdapat dugaan adanya kegiatan intrusi yang terlihat dari nilai resistivitas tinggi pada kedalaman 3000 m sampai 1000 m dibawah permukaan yang membentuk seperti menyudut kearah utara.

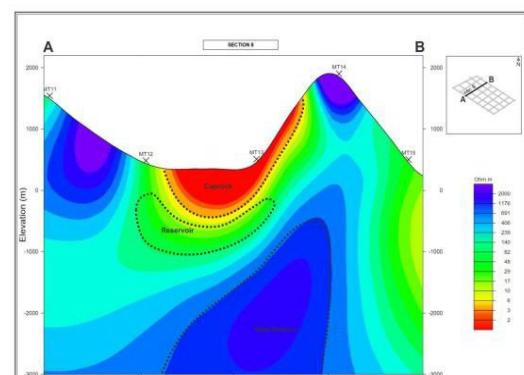


**Gambar 3** Model Penampang 2-D Lintasan 2

memiliki nilai resistivitas rendah yang ditandai oleh warna hijau dan terdapat adanya indikasi struktur yang terlihat adanya perbedaan nilai resistivitas yang signifikan pada titik MT17 yang menjadi dugaan jalur keluarnya fluida.

### Model Penampang 2-D Lintasan 3

Model penampang untuk lintasan 3 terdiri dari titik MT11, MT12, MT13, MT14, dan MT15. Pemilihan arah lintasan 3 disesuaikan dengan arah barat daya – timur laut. Pada penampang lintasan 3 teridentifikasi lapisan yang memiliki nilai resistivitas rendah ( $< 10 \Omega\text{m}$ ) yang hanya berada disekitar titik MT13 pada kedalaman permukaan sampai 400 m dibawah permukaan. Pada lintasan ini juga teridentifikasi adanya lapisan yang memiliki nilai resistivitas sedang ( $17 \Omega\text{m} – 406 \Omega\text{m}$ ) yang lebih luas dibandingkan dengan lintasan – lintasan sebelumnya. Penampang



**Gambar 4** Model Penampang 2-D Lintasan 3

### Model Penampang 2-D Lintasan 4

Model penampang 4 melalui titik MT16, MT17, MT18, MT19, dan MT20. Hasil dari penampang lintasan 4 terdapat lapisan dengan nilai resistivitas rendah ( $< 10 \Omega\text{m}$ ) yang muncul pada titik MT18, MT19, dan MT20 pada permukaan sampai kedalaman 1000 m dibawah permukaan. Dari titik MT18, MT19, dan MT20, nilai resistivitas rendah yang muncul menipis kearah timur. Teridentifikasi juga lapisan yang memiliki nilai resistivitas sedang ( $17 \Omega\text{m} – 406 \Omega\text{m}$ ) dan nilai resistivitas tinggi berada pada kedalaman yang lebih besar yaitu 2000 m hingga 3000 m dibawah permukaan.

Lintasan 2 dan lintasan 4 (gambar 5) saling berpotongan pada titik MT17 sehingga terdapat kesesuaian hasil model penampang. Pada titik MT18 terdapat manifestasi air panas yang muncul ke permukaan diduga berasal dari intrusi atau struktur yang menyebabkan fluida di dalam reservoir muncul ke permukaan.

Berdasarkan morfostratigrafi daerah penelitian yang telah dikorelasikan dengan nilai resistivitas, terdapat nilai resistivitas rendah yang diduga sebagai lapisan penudung atau *caprock* adalah breksi vulkanik, nilai resistivitas sedang yang diduga sebagai reservoir adalah litologi tuff dan nilai resistivitas tinggi yang diduga sebagai lapisan sumber panas atau *heat source* adalah litologi lava.

## 5. KESIMPULAN

Dari hasil pengolahan 2-D inversi data magnetotellurik diperkirakan adanya sistem panas bumi di daerah Telaga Ngebel dengan nilai resistivitas yang berbeda setiap lapisan. Nilai resistivitas rendah dengan nilai  $\leq 10 \Omega\text{m}$  yang diduga merupakan lapisan penudung atau *caprock*, nilai resistivitas dari

$10 \Omega\text{m}$  hingga  $239 \Omega\text{m}$  diduga memiliki peran sebagai lapisan reservoir dan nilai resistivitas yang tinggi  $\geq 239 \Omega\text{m}$  diduga sebagai lapisan sumber panas atau *heat source*.

## UCAPAN TERIMAKASIH

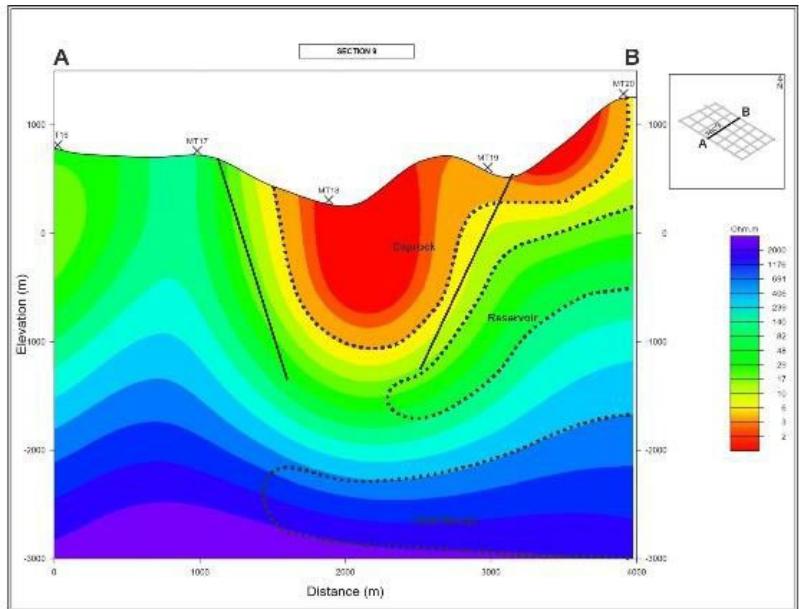
Penulis menyampaikan terima kasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penelitian hingga proses penulisan. Ucapan terima kasih disampaikan kepada PT Gaia Energi Baik yang telah memberikan saya kesempatan untuk melakukan penelitian

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonim. 1989. *Studi Volcanostratigrafi dan Evolusi Mmagmatik Regional Deretan G. Lawu – G. Wilis – G. Pandan Jawa Timur*, PT. Geode Pataka Alam, Jakarta: (tidak dipublikasikan)
- Anonim. 1992. *Pengumpulan Data Geologi, Geokimia, Geofisika serta Pengukuran Landaian Suhu dan Tekanan Sumur WSH-02, Ngebel- Wilis, Jawa Timur*, PT. Mitrayasa Kelana Sejati. Cirebon: (tidak dipublikasikan)
- Alzwar, M., Samodra, H., dan Tarigan, J, 1987, *Pengantar Dasar Ilmu Gunung Api*, Bandung: Penerbit Nova
- Bemmelen Van, R. W. 1949. *The Geology of Indonesia*, Vol I-A, Gov. Printed Office, The Hague, 732 p.
- Dickson, M., Fanelli , M, 2003, *Geothermal Energy*. London: Routledge
- Fahmi, A.A., *Potensi Panasbumi Telaga Ngebel Ponorogo : Pembangkit dan Managemen Energi Listrik*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh November
- Giggenbach, W. F., (1988). *Geothermal solute equilibria. Derivation of Na- K- Mg-Ca geoindicator*. Geochim. Cosmochim. Acta, 52, 2749-2765
- Grandis, H., Sudarman, S., & Hendro, A. 2002. *Aplikasi Metoda Magnetotellurik (MT) dalam Eksplorasi Geothermal*. Bandung: Program Studi Geofisika, Departemen Geofisika dan Meteorologi ITB
- Haty.I.P. *Penyelidikan Pendahuluan Manifestasi Panasbumi Ngebel Ponorogo, Jawa Timur*. Yogyakarta: Universitas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta
- Hersir G. ., Anarson K., 2009, *Geothermal Training Program*, Santa Tecla, El Salvador.
- Hochstein, M. P, and Browne, 2000, *Surface Manifestations of Geothermal System with Volcanic Heat Sources*. In Encyclopedia of Volcanoes
- Jiracek, G.R., *The Magnetotelluric Method*. California: Department of Geological Sciences
- Kurniawan, P., Wibowo, H.T. 2016. *Geokimia Panas Bumi di Kecamatan Ngebel Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur*. Surabaya: Institut Teknologi Adhi Tama
- Oskooi, Behrooz. 2011. *2D inversion of the Magnetotelluric data from Travale Geothermal Field in Italy*. Italia: Journal of the Earth and Space Physics

- Palacky, G. J. ( 1987), Resistivity characteristics of geological targets, in *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics—Theory*, vol. 1, Invest. Geophys. Ser., vol. 3, edited by M. N. Nabighian, pp. 53– 129, Soc. of Exp. Geophys., Tulsa, Okla.
- Saepuloh, A, Saputra, R.A, & Sumintadireja, P. 2017. *Pemetaan Geologi Gunung api Dijital Daerah Ngebel, Madiun berdasarkan Data Reflektansi dan Suseptibilitas Magnetik Batuan*. Bandung: LIPI
- Santoso, A. B. & Sidiq, H. 2017. *Perhitungan Sumberdaya Batuan Andesit Berdasarkan Ukuran Fragmen dengan Menggunakan Metode Geolistrik (Studi Kasus Lahan 52 Ha, Desa Mekarsari, Kecamatan Merak, Kabupaten Cilegon, Provinsi Banten)*. D.I. Yogyakarta: Jurusan Teknik Pertambangan Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta
- Saptadji, NM, 2009, *Geothermal Education for Supporting Geothermal Development in Indonesia*, Proceedings World Geothermal Congress 2010: Bali
- Simpson, F., Bahr, K. 2005. *Practical Magnetotellurics*. United Kingdom: Cambridge University Press
- Telford, W.M., Geldart, L.P., & Sheriff RE. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press
- U. Hartono, Baharuddin & K. Brata. 1992. *Peta Geologi Lembar Madiun, Jawa, Lembar 1508-2*. Bandung: Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jenderal Geologi dan Sumber Daya Mineral, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Utami, P., 1998, *Energi: Energi Panas Bumi*, pp 39-42
- White, D.E, 1967, *Some Principles of Geyser Activity, Mainly from Steamboat Springs*. Nevada
- Xiao, W. 2004. *Magnetotelluric Exploration in the Rocky Mountain Foothills, Alberta*. Edmonton: Department of Physics University of Alberta

## Lampiran



**Gambar 5** Model Penampang 2-D Lintasan 4