

## **KARAKTERISASI DAERAH PANAS BUMI DIWAK DAN DEREKAN BERDASARKAN PENGUKURAN AUDIO- MAGNETOTELURIK**

### *Characterization of Diwak and Derekan Geothermal Area Based on Audio-Magnetotelluric Measurement*

**Elvera Yuanita<sup>1)</sup>, Udi Harmoko<sup>1)</sup>, Nugroho Dwi Hananto<sup>2)</sup>, Lina Handayani<sup>2)</sup>**

<sup>1)</sup>Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

<sup>2)</sup>Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI

**ABSTRAK** Survei audio-magnetotelurik dilakukan pada bulan September 2013 di area panas bumi Diwak dan Derekan dengan tujuan untuk mengidentifikasi sumber panas, *reservoir* dan *cap rock*. Pengukuran dilakukan dengan alat Stratagem pada frekuensi 1Hz-100 kHz, di 17 titik dalam 3 lintasan. Data yang diperoleh antara lain adalah resistivitas semu, fase, dan koherensi sebagai fungsi dari frekuensi yang diolah dengan menggunakan perangkat lunak WinGLink. Karakterisasi panas bumi meliputi sistem cap rock dengan nilai resistivitas 0-10  $\Omega\text{m}$  dimana daerah ini merupakan zona konduktivitas. Selanjutnya daerah reservoir diduga dengan memiliki nilai resistivitas dengan rentang 50-500  $\Omega\text{m}$  dengan kedalaman sekitar 500 m. Sumber panas yang berada dalam sistem panas bumi nilai ini memiliki resistivitas > 500  $\Omega\text{m}$ , dengan kedalaman sekitar 1,5 km. Selain itu, dari model ketiga lintasan tersebut dapat ditarik garis struktur sesar yang berarah barat daya-timur laut. Sesar ini dapat merupakan penyebab munculnya manifestasi Diwak dan Derekan.

**Kata Kunci:** Audiomagnetotelurik, resistivitas, panas bumi, Ungaran.

**ABSTRACT** An Audio-Magnetotellurics (AMT) survey was carried out in September 2013, in the Diwak and Derekan geothermal fields. The

*purpose of the survey was to locate the heat source, reservoir, and cap rock of the geothermal system. Measurements were carried out by Stratagem with frequency range from 1 HZ to 100 kHz, at 17 stations in 3 lines. The data obtained from the field were apparent resistivities, phase differences, and coherences as a function of frequency. The data then were processed using WinGLink software package. Characterizations of geothermal systems include the cap rock with a resistivity of 0-10  $\Omega\text{m}$  where the area is a zone of conductivity. Then, the suspected reservoir area has a resistivity value with a range of 50-500  $\Omega\text{m}$  with a depth of about 500 m. The heat source might be in the area of resistivity values of more than 500  $\Omega\text{m}$  at a depth of about 1.5 km. Based on the sub surface modeling from 3 lines of measurements, there is a possible southwest-northwest fault lineament that might cause the Diwak and Derekan manifestation.*

**Keywords:** Audiomagnetotelluric, geothermal, resistivity, Ungaran,

## **PENDAHULUAN**

Area panas bumi Diwak dan Derekan merupakan salah satu bagian dari manifestasi panasbumi di daerah pegunungan Ungaran. Beberapa manifestasi yang muncul di daerah ini antara lain *fumarole* di daerah Gedongsongo, mata air panas di daerah Banaran, Kaliulo, dan Nglimit (Wahyudi, 2006; Budiardjo *et al.*, 1997). Adanya manifestasi panasbumi tersebut menunjukkan bahwa lokasi ini sesuai untuk penyelidikan eksplorasi panasbumi selanjutnya.

---

Naskah masuk : 27 Januari 2015  
Naskah direvisi : 26 Mei 2015  
Naskah diterima : 3 Juni 2015

---

Elvera Yuanita  
Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Matematika,  
Universitas Diponegoro, Semarang  
E-mail: [elverageophysics@gmail.com](mailto:elverageophysics@gmail.com)

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan dalam peran awal eksplorasi panas bumi seperti pada penelitian ini adalah metode AMT (*Audiomagnetotelluric*). Rasio frekuensi elektromagnetik yang diperoleh dengan bentangan frekuensi rendah dapat memberikan informasi bawah permukaan dalam (Panjaitan, 2010). Dengan metode ini, parameter yang digunakan untuk mengamati atau mencari sumber energi panas adalah harga resistivitas batuan sebagai fungsi frekuensi atau kedalaman, yang ditandai dengan harga yang semakin rendah untuk batuan yang suhunya makin tinggi (Hochstein et al., 1996). Metode AMT ini dilakukan untuk mendukung penelitian sebelumnya (Rezky et al., 2012; Budiardjo et al., 1997) dalam mendapatkan informasi struktur bawah permukaan yang lebih baik.

### Panas Bumi (*Geothermal*)

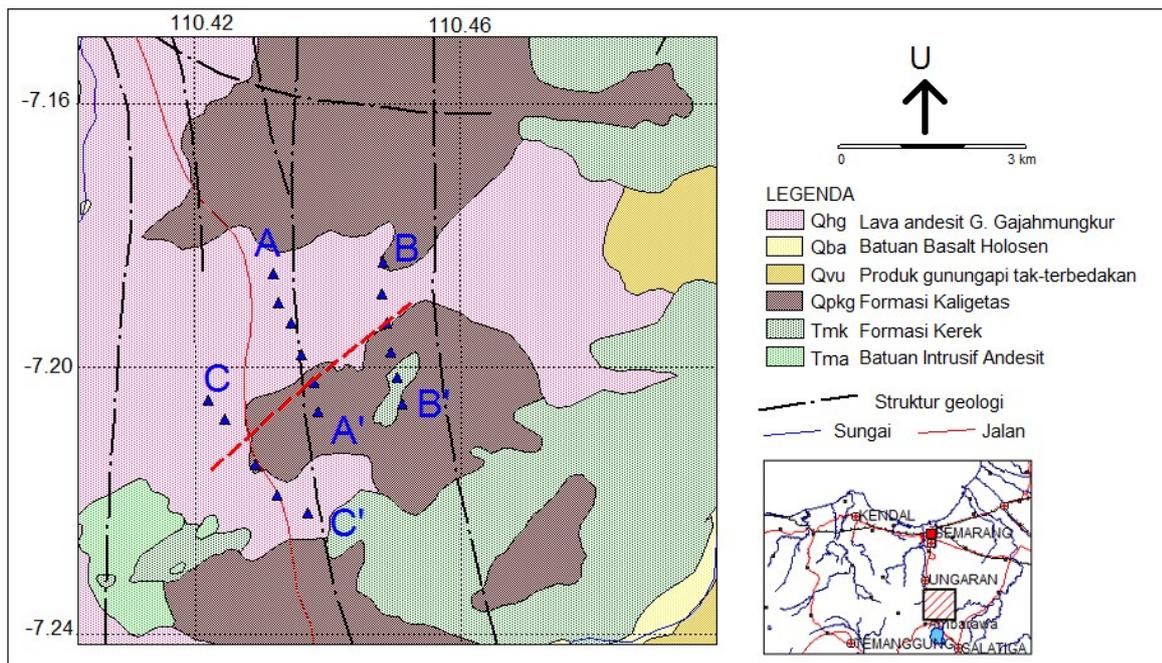
Sistem panas bumi di Indonesia sebagian besar

keberadaan sumber panas (*heat source*), *reservoir* dan fluida (Hochstein et al., 1996).

Pada dasarnya sistem panas bumi memiliki beberapa komponen yaitu:

- Sumber panas (*heat source*), berupa magma atau batuan beku yang masih memiliki energi panas. Magma tersebut menghantarkan panas secara konduksi maupun secara konveksi.
- Batuan *reservoir*, batuan ini memiliki sifat *permeable* yang menimbulkan terjadinya aliran fluida
- Batuan penutup (*cap rock*) yang memiliki sifat *permeable* sehingga memungkinkan terjadinya aliran fluida.
- Fluida thermal* yang sudah terpanaskan dalam *reservoir*.

Dari segi ada atau tidaknya fluida, sistem panas bumi melibatkan sistem hidrotermal dan *hot dry rock*. Syarat suatu sistem hidrotermal adalah tersedianya sumber panas, fluida sebagai



Gambar 1. Keadaan geologi daerah penelitian (Sumber: Thanden et al., 1996). Segitiga-segitiga biru adalah stasiun pengukuran AMT dan garis putus-putus merah adalah kemungkinan sesar yang ditarik dari hasil interpretasi pemodelan resistivitas.

merupakan sistem panas bumi hidrotermal yang mempunyai temperatur tinggi. Komponen utama pada sistem hidrotermal yaitu air, panas, dan lapisan permeabel Heasler (Heasler, 2009). Sistem panas bumi terutama dibangun oleh

pembawa panas dari *recharge area* dan batuan permeabel sebagai zona meresapnya fluida. Pada dasarnya sistem panas bumi jenis hidrotermal terbentuk sebagai hasil perpindahan panas dari

suatu sumber panas ke sekelilingnya yang terjadi secara konduksi dan secara konveksi.

**Keadaan Geologi**

Geologi daerah penelitian terbentuk dari Formasi Kaligetas yaitu breksi vulkanik, aliran lava, tuf, batupasir tufan, dan batu lempung (Gambar 1). Terdapat breksi aliran dan lahar dengan sisipan lava dan tuf halus sampai kasar. Setempat di bagian bawahnya ditemukan batu lempung mengandung moluska dan batu pasir tufan. Batuan gunung api yang melapuk berwarna coklat kemerahan dan sering membentuk bongkah-bongkah besar dengan ketebalan berkisar antara 50 m sampai dengan 200 m (Thanden *et al.*, 1996).

**METODE**

Metode Audiomagnetotellurik (AMT) dilakukan untuk memperoleh data elektromagnetik dengan frekuensi antara 10 kHz dan 0,1 Hz. Kelebihan metode AMT dari metode geofisika lainnya adalah penetrasi dalam sehingga dapat memberikan informasi pada daerah non seismik, memiliki resolusi yang lebih baik, tidak memberikan dampak buruk bagi lingkungan karena memanfaatkan sumber gelombang elektromagnetik (EM) alami, dan juga tidak memerlukan transmitter. Rasio pada bentangan frekuensi tinggi memberikan informasi bawah permukaan dangkal, sedangkan rasio pada bentangan frekuensi rendah memberikan informasi bawah permukaan dalam (Panjaitan, 2010).

Sumber medan EM timbul pada partikel yang dikeluarkan oleh matahari pada frekuensi < 1 Hz. Pada permukaan matahari terjadi letupan plasma yang sebagian partikel berupa hidrogen yang kemudian mengalami proses ionisasi sehingga berubah menjadi plasma yang terbagi menjadi proton dan elektron. Pergerakan acak yang terjadi menyebabkan plasma berubah menjadi angin matahari (*solar wind*). Dan proses ini akan menimbulkan arus induksi yang kemudian dikenal dengan arus *eddy* atau arus tellurik. Sumber medan EM pada frekuensi yang lebih besar dari 1Hz berasal dari adanya kilat. Kilat terjadi karena adanya perbedaan potensial antara awan yang satu dengan yang lain. Jika awan yang satu menyimpan banyak muatan negatif maka muatan positif akan berkumpul pada awan lain. Selanjutnya perbedaan potensial yang sangat

besar antara awan dan bumi maka akan menyebabkan interaksi untuk menghasilkan keseimbangan di antara keduanya. Kilat yang terjadi akan menimbulkan gelombang EM yang terperangkap di antara lapisan ionosfer dan bumi dan kemudian menjalar mengitari bumi.

**Persamaan Maxwell**

Dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \tag{3}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{4}$$

dengan :

$\vec{E}$  : Medan Listrik (Volt/Meter);  $\vec{B}$  : Induksi Magnetik (W/m<sup>2</sup>);  $\vec{H}$  : Medan Magnetik (Ampere/Meter);  $\vec{D}$  : Displacement Current (A/m<sup>2</sup>);  $\vec{j}$  : rapat arus listrik (A/m<sup>2</sup>), q: densitas muatan listrik (Coulomb/m<sup>3</sup>) (Wangsness, 1986).

Dengan membuat perumpamaan bahwa bumi itu bersifat homogen, setiap lapisan memiliki resistivitas yang sama, dan menimbulkan tidak adanya perpindahan arus, maka dapat diperoleh hubungan dari  $\vec{B} = \mu \vec{H}$  dan  $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ , maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \tag{5}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + \epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \tag{6}$$

Dengan menggunakan perkalian *curl* pada persamaan (5) dan (6), maka akan diperoleh hubungan baru dimana setiap hubungan akan terpisah menjadi variabel yang sama.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{E} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{7}$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{H} = -\mu \sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \tag{8}$$

Selanjutnya dari dua persamaan tersebut diperoleh persamaan *telegrapher* sebagai berikut:

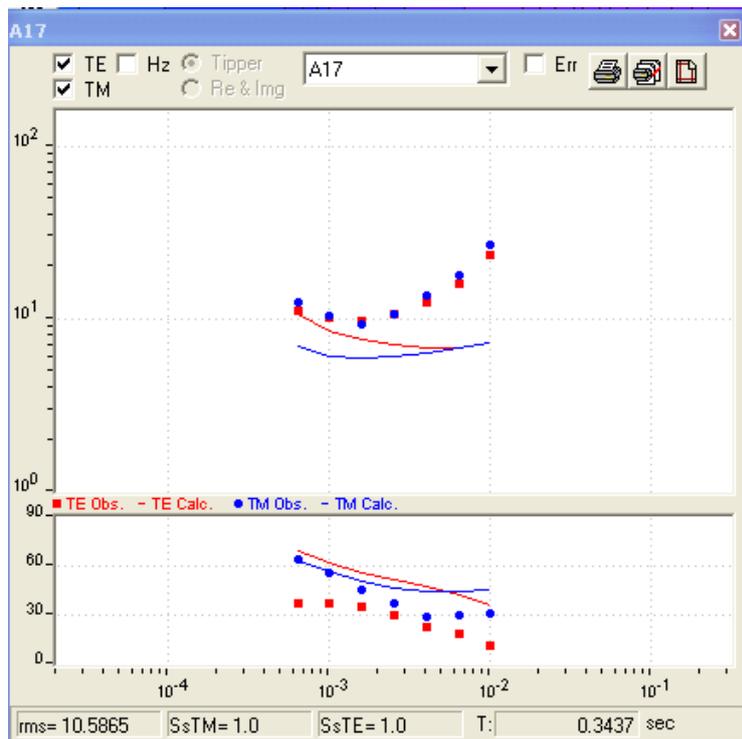
$$\nabla^2 \vec{E} = \mu \sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \tag{9}$$

$$\nabla^2 \vec{H} = \mu\sigma \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}}{\partial t^2} \quad (10)$$

Persamaan *telegrapher* di atas merepresentasikan dimana  $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$  mempunyai sifat difusif yang mewakili penjalaran gelombang dengan frekuensi rendah, sedangkan  $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$  mempunyai sifat akustik yang mewakili penjalaran gelombang dengan frekuensi yang tinggi.

dalam bentuk impedansi. Penempatan sensor elektrik dan sensor magnetik yang saling tegak lurus akan menghasilkan dua mode pengukuran yaitu TE (*Transverse Electric*) dan TM (*Transverse Magnetic*).

Sensor-sensor elektrik diletakkan di arah utara, timur, selatan, dan barat. Sensor elektrik yang berada di utara dan selatan merupakan sensor Ex, sedangkan sensor elektrik yang berada di barat dan timur merupakan sensor Ey. Sensor magnetik



Gambar 2. Contoh data resistivitas terukur pada salah satu titik pengamatan (Titik biru = TM observasi, titik merah = TE observasi, garis biru = TM hasil perhitungan, garis merah = TE hasil perhitungan).

### Survey lapangan

Penelitian ini diawali dengan survei di lokasi penelitian untuk menentukan titik-titik pengukuran. Alat utama yang digunakan pada pengambilan data adalah Statagem. Alat inilah yang akan mengukur besarnya medan magnet dan medan listrik dan selanjutnya akan disimpan

yang digunakan untuk mengukur medan magnet di sumbu x (Hx) harus diletakkan sejajar dengan elektroda arah utara-selatan dengan arus dari selatan ke utara. Sensor magnetik yang digunakan untuk mengukur medan magnet pada sumbu y (Hy) sejajar dengan elektroda yang berarah dari timur-barat sedangkan arus berarah dari barat ke timur.

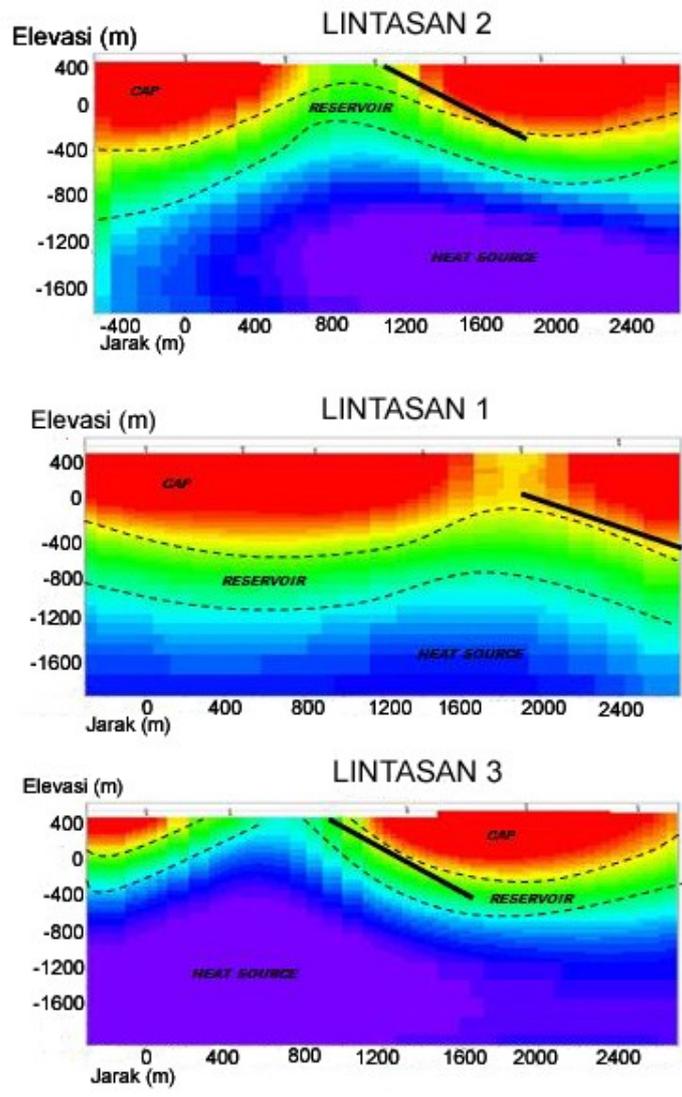
Pengukuran AMT di lakukan pada dua daerah manifestasi panas bumi yaitu di Diwak dan Derekan Kecamatan Bergas, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah. Pengukuran dilakukan pada tiga lintasan dimana lintasan I (A-A') dan lintasan II terdiri dari enam titik, sedangkan pada lintasa. III terdiri dari lima titik. Titik-titik stasiun pengukuran AMT dapat dilihat pada Gambar 1 (segitiga biru). Jarak antara titik adalah sekitar 500 m.

Data yang didapatkan berisi informasi yang terdiri dari frekuensi, *apparent resistivity*, dan

kedalaman. Pada dasarnya pengambilan data AMT untuk mengetahui variasi medan EM terhadap waktu, sehingga terdapat hubungan antara medan listrik dan medan magnet. Hubungan ini terlihat dari analisa kurva TE dan TM yang berimpitan (terlihat pada Gambar 2, contoh data dari satu titik pengamatan).

### Pemodelan

Data yang diperoleh berupa *apparent resistivity*, selanjutnya digunakan untuk pemodelan bawah permukaan dengan menggunakan perangkat



Gambar 3. Hasil Inversi 2D pada setiap lintasan (garis hitam merupakan perkiraan struktur atau sesar yang dapat dihubungkan dari ketiga lintasan).

lunak WinGLink. Dalam WinGLink, pemodelan inversi 2 dimensi dilakukan dengan menggunakan algoritma *non-linear conjugate gradient (NLGC)*. Pada prinsipnya, algoritma ini mencari nilai minimum dari fungsi obyektif yang merupakan jumlah dari ketidakcocokan (*misfit*) normalisasi data dan *smoothness* dari model (Aghil et al., 2014). Inversi dilakukan pada jala (*mesh*) 2D yang terdiri atas blok-blok horizontal dan vertikal yang memiliki nilai resistivitas tertentu.

Penampang 2D hasil pemodelan inversi dapat dilihat dari hasil nilai resistivitasnya berdasarkan warna, dimana setiap warna memiliki rentang nilai tertentu. Zona nilai resistivitas tersebut kemudian dikelompokkan sesuai dengan sistem panas bumi, yaitu *heat source*, *reservoir*, dan *cap rock* (Rulia, 2012).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran audiomagnetotellurik dilakukan pada tiga lintasan (Gambar 1) yaitu lintasan 1 (A-A'), lintasan 2 (B-B') dan lintasan 3 (C-C'). Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan seperangkat alat *Stratagem* buatan *Geometrics Inc*. Pada lintasan I (A-A') dan II (B-B') pengambilan data dilakukan dengan melewati manifestasi panas bumi Diwak dan Derekan. Hasil pengukuran kemudian diolah dengan menggunakan metode inversi dalam WinGLink. Hasil inversi tersebut tampak dalam Gambar 3.

Hasil Inversi 2D Lintasan I menunjukkan bahwa lapisan yang berwarna merah memiliki nilai resistivitas yang rendah (1-10)  $\Omega\text{m}$  yang diduga sebagai zona konduktif. Zona konduktif tersebut ini diduga dapat merupakan batuan penutup yang berupa batuan lempung. Selanjutnya daerah yang berwarna hijau dapat diduga sebagai zona *reservoir* dengan nilai resistivitas 50-500  $\Omega\text{m}$ . Daerah *reservoir* ini merupakan daerah yang *permeable* sehingga fluida panas yang berasal dari *heat source* bisa saja berpindah baik secara konduksi maupun konveksi.

Zona konduktif pada lintasan II ditunjukkan dengan warna merah dengan rentang nilai resistivitas antara 1-10  $\Omega\text{m}$ . Namun pada titik di tengah lintasan terlihat bahwa terdapat kenaikan nilai resistivitas dibandingkan dengan titik-titik yang lain. Kenaikan ini dapat diinterpretasikan sebagai struktur yang memotong lintasan ini. Zona konduktif ini juga dapat dikelompokkan

sebagai *clay cap* yang menahan aliran fluida panas dan keluar melalui rekahan-rekahan yang berada di sekitarnya. Pada kedalaman >1 km, terdapat lapisan yang memiliki nilai resistivitas tinggi (>500  $\Omega\text{m}$ ), yang dapat diduga sebagai sumber panas atau *reservoir*. Zona *reservoir* ditunjukkan pada daerah yang berwarna hijau dengan rentang resistivitas 50-500  $\Omega\text{m}$ .

Pada lintasan III, nilai resistivitas yang tinggi (>500  $\Omega\text{m}$ ) juga diduga merupakan sumber panas. Terlihat bahwa lapisan yang berwarna merah memiliki nilai resistivitas yang rendah antara 1-10  $\Omega\text{m}$ , dimana dapat di duga sebagai zona konduktif yang merupakan zona *clay cap*. Zona *reservoir* ditunjukkan pada daerah yang berwarna hijau dengan rentang resistivitas 50-500  $\Omega\text{m}$ .

Pada ketiga model pada Gambar 3, ditarik garis yang menunjukkan adanya perkiraan struktur pada lintasan 1, lintasan 2, dan lintasan 3. Bila ditarik garis lurus antara ketiga titik dimana struktur itu berada, maka tampak seperti garis merah putus-putus di Gambar 1. Garis tersebut sesuai dengan perkiraan adanya sesar berarah barat daya – timur laut seperti yang disimpulkan pada penelitian sebelumnya dengan metode gravitasi pada daerah yang sama (Meilisa dan Sarkowi, 2013; Rezky et al., 2012, Budiardjo et al., 1997). Keseluruhan penelitian tersebut mendukung dugaan bahwa munculnya manifestasi air panas ke permukaan adalah akibat adanya sesar tersebut.

## KESIMPULAN

Metode Audiomagnetotellurik (AMT) merupakan salah satu metode yang biasa digunakan untuk menentukan karakterisasi panas bumi dengan menganalisa nilai resistivitas batuan bawah permukaan. Metoda ini kami gunakan untuk mendapatkan gambaran bawah permukaan area panas bumi Diwak dan Derekan di Ungaran Jawa Tengah. Karakterisasi panas bumi daerah penelitian meliputi sistem *cap rock* dengan nilai resistivitas 0-10  $\Omega\text{m}$  dimana daerah ini merupakan zona konduktif, kemudian daerah yang diduga sebagai *reservoir* dengan nilai resistivitas dalam rentang 50-500  $\Omega\text{m}$  pada kedalaman sekitar 500 m, serta adanya sumber panas yang memiliki nilai resistivitas > 500  $\Omega\text{m}$  pada kedalaman sekitar 1,5 km. Adanya manifestasi yang muncul pada daerah penelitian

diduga karena adanya sesar yang mengarah dari barat daya-timur laut yang bersesuaian dengan hasil pemodelan bawah permukaan di ketiga lintasan pengukuran.

### **UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis sangat berterimakasih atas kesempatan yang telah diberikan oleh Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro untuk ikut serta dalam survey AMT di daerah panasbumi Gunung Ungaran. Terimakasih juga kami sampaikan untuk Bapak Dadan D. Wardhana dan Bapak Eddy Z. Gaffar yang telah banyak memberi masukan saat penulis mengerjakan analisa data di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI

### **DAFTAR PUSTAKA**

- Aghil T. B., Mohan, K., Srinivas, Y., Rahul, P., Paul, J., Alby, E.R., Nair, N. C., Chandrasekar, N., 2014. Delineation of electrical resistivity structure using Magnetotellurics: a case study from Dholera coastal region, Gujarat, India. *Journal of Coastal Sciences*, 1(1), 41-46.
- Budiardjo, B., Nugroho dan Budihardi, M., 1997. Resource characteristics of the Ungaran Field, Central Java, Indonesia. *Proceeding of National Seminar of Human Resources Indonesian Geologist*, Yogyakarta.
- Heasler, H.P., 2009. *Systems and Monitoring Hydrothermal Features*. Departement of Geosciences, Pacific Lutheran University, Washington.
- Hochstein, M.P., Ovens, S. A., dan Bromley, C., 1996. Thermal springs at hot water beach (Coromandel Peninsula, NZ), *Proceedings of the 18th NZ Geothermal Workshop*, New Zealand.
- Meilisa dan Sarkowi, M., 2013. Analisis data gravity untuk menentukan struktur bawah permukaan daerah manifestasi panasbumi di lereng selatan Gunung Ungaran. *Prosiding Seminar Nasional Sains & Teknologi V*. Lembaga Penelitian Universitas Lampung 19-20 November 2013.
- Panjaitan, S., 2010. Geologi daerah panas bumi Ulubelu Tanggamus, Lampung Utara berdasarkan analisis metode magnetotelurik (MT). *Jurnal Sumber Daya Geologi*, 20 (2), 69-91.
- Rezky, Y., Zarkasyi, A., Risdianto, D., 2012. Sistem panas bumi dan model konseptual daerah panas bumi Gunung Ungaran, Jawa Tengah. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 7 (3), 109 – 117.
- Rulia, C., 2012. Pengolahan data magnetotelurik 2-dimensi pada lapangan panasbumi Marana, Sulawesi Tengah. *Skripsi*, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Thanden, R.E., Sumadiredja, H., Richards, P.W., Sutisna, K., dan Amin, T.C., 1996. *Peta Geologi Lembar Magelang dan Semarang Jawa*, skala 1:100.000. Pusat Survey Geologi, Bandung.
- Wangsness, R.K., 1986. *Electromagnetics Fields*. Hamilton Printing Company, USA.
- Wahyudi, 2006. Kajian potensi panas bumi dan rekomendasi pemanfaatannya pada daerah prospek Gunungapi Ungaran, Jawa Tengah. *Berkala MIPA*, 16(1), 41-48.