

SISTEM PANASBUMI DAERAH BLAWAN, JAWA TIMUR BERDASARKAN SURVEI MAGNETOTELURIK

Blawan Geothermal System, East Java Based on Magnetotelluric Survey

Cinantya Nirmala Dewi¹, Sukir Maryanto², Arief Rachmansyah³

¹ Program Studi Magister Ilmu Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

² Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

³ Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

ABSTRAK Penelitian dengan menggunakan metode magnetotelurik telah dilaksanakan di daerah potensi panasbumi Blawan, Bondowoso, Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sistem panasbumi di daerah penelitian berdasarkan nilai resistivitasnya. Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah Metronix ADU-07e yang mengukur 3 komponen medan magnet (H_x , H_y dan H_z) dan 2 komponen medan listrik (E_x dan E_y). Pengambilan data magnetotelurik dilakukan di 19 titik, dengan jarak antar titik pengukuran sepanjang 250 m hingga 1200 m. Data yang didapatkan berupa nilai resistivitas semu dan fase dalam domain frekuensi dengan rentang 0,01 Hz hingga 10.000 Hz. Seluruh titik pengambilan data dibagi menjadi 4 profil inversi 2D. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa sistem panasbumi pada daerah penelitian tersusun atas zona lapisan penudung ($\leq 32 \Omega.m$), zona reservoir ($>32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$), dan zona sumber panas ($>512 \Omega.m$). Selain itu, berdasarkan hasil pemodelan juga teridentifikasi adanya beberapa patahan yang mendukung sistem panasbumi Blawan.

Kata kunci : panasbumi, magnetotelurik, resistivitas, Blawan.

ABSTRACT A research using magnetotelluric method have been done in Blawan geothermal field, Bondowoso, East Java. This research done to identify the geothermal system of research area based on its resistivity value. Magnetotelluric measurement done in 19 point with spaces 250 m up to 1200 m each other. The tools used in this research is Metronix ADU-07e that measure three components of the magnetic field (H_x , H_y dan H_z) and two components of the electric field (E_x dan E_y). Data obtained in the form of an apparent resistivity and phase value in the frequency domain in the range of 0,01 Hz to 10.000 Hz. All of measurement points are divided into four 2D modeling profile. The results of 2D modeling indicate that the geothermal system in the research area consists of caprock zone ($\leq 32 \Omega.m$), reservoir zone ($>32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$), and a heat source zone ($>512 \Omega.m$). Beside that, based on the modeling result it also identified the presence of several faults that support Blawan geothermal system.

Keywords : geothermal, magnetotelluric, resistivity, Blawan.

PENDAHULUAN

Panasbumi adalah sebuah sumber energi panas yang terdapat dan terbentuk pada kerak bumi (Broto dan Thomas, 2011). Sebagai daerah vulkanik, Indonesia mempunyai potensi 29 GWe atau sekitar 40% dari seluruh cadangan dunia. Potensi energi panasbumi yang dimiliki Indonesia merupakan yang terbesar di dunia (Wirakusumah *et al.*, 2011). Salah satu potensi panasbumi di Jawa Timur berada di Dusun Blawan, Kecamatan Sempol, Kabupaten Bondowoso yang dikenal sebagai panasbumi Blawan-Ijen. Berdasarkan data dari Energi dan Sumberdaya Mineral

Naskah masuk : 28 September 2015
Naskah direvisi : 19 November 2015
Naskah diterima : 10 Desember 2015

Cinantya Nirmala Dewi
Program Studi Magister Ilmu Fisika, Fakultas MIPA,
Universitas Brawijaya, Malang
E-mail: sukir@ub.ac.id

(ESDM) potensi sumberdaya hipotesis panasbumi di Blawan-Ijen diperkirakan sekitar 92 MWe dan potensi cadangan terbukti sebesar 185 MWe (Sukhyar *et al.*, 2014).

Keberadaan panasbumi di daerah Blawan ditandai oleh mata air panas yang tersebar di bagian utara (Raehanayati *et al.*, 2013). Hasil dari beberapa survei geofisika yang telah dilakukan sebelumnya dengan menggunakan metode gayaberat (Raehanayati *et al.*, 2013), geolistrik (Karlina *et al.*, 2013), dan geomagnetik (Afandi *et al.*, 2013) juga menunjukkan adanya potensi panasbumi di daerah Blawan-Ijen. Untuk memastikan bahwa kompleks Blawan memiliki energi panasbumi yang berpotensi untuk dikembangkan perlu dilakukan penelitian lebih lanjut, yaitu dengan menggunakan metode magnetotelurik.

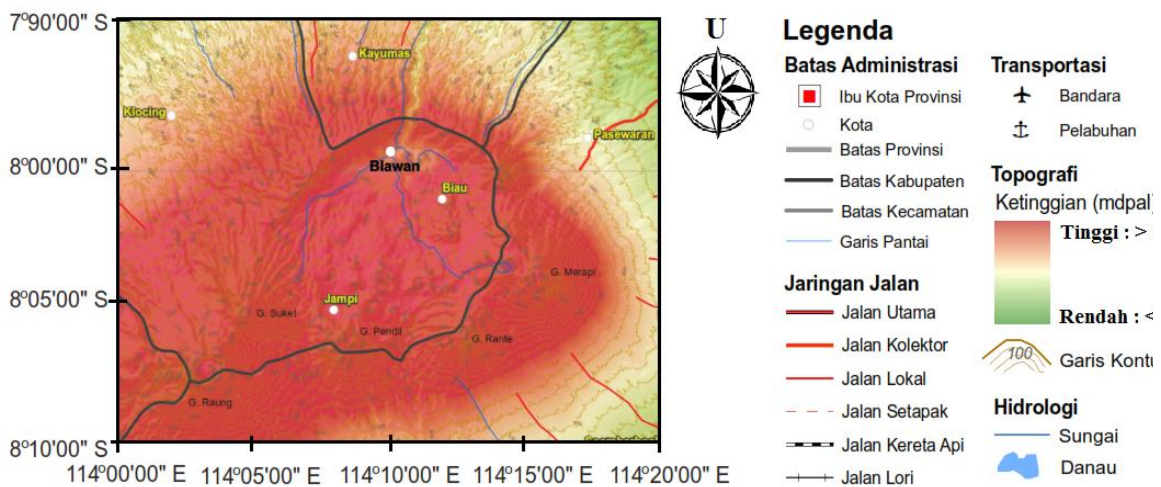
LOKASI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di daerah Blawan, kompleks Gunungapi Ijen, Bondowoso, Jawa Timur. Blawan terletak di dinding Kaldera Ijen bagian Utara seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pada dinding Kaldera Ijen terdapat air terjun Blawan yang memotong dinding kaldera tersebut (Delmelle dan Bernard, 1994). Aktivitas vulkanik Gunung Kendeng berhenti total setelah pembentukan Kaldera Ijen dan sesar-sesar di dinding kaldera, salah satunya sesar Pedati yang terbentuk di dinding kaldera bagian Utara. Pada masa pasca kaldera, daerah Blawan yang memiliki topografi rendah pada saat itu menjadi tempat

sedimentasi material-material vulkanik membentuk endapan lahar. Endapan lahar yang telah mengalami pendinginan membentuk batu yang tidak dapat ditembus oleh air sehingga ketika curah hujan tinggi maka air akan terakumulasi di daerah Blawan. Endapan lahar yang membatu menyebabkan air tidak dapat merembes ke dasar kaldera dan tidak dapat keluar terhalang oleh dinding kaldera sehingga membentuk Danau Blawan. Proses erosi yang berlangsung terus menerus mengakibatkan zona lemah sesar Pedati mencapai permukaan air Danau Blawan. Hal tersebut menyebabkan Danau Blawan menjadi kering karena adanya jalan keluar air melewati sesar tersebut. Hasil proses erosi dan litifikasi yang berlangsung secara terus-menerus membentuk endapan sedimen klastik danau di daerah Blawan (Zaennudin *et al.*, 2012).

METODE

Metode magnetotelurik merupakan metode pasif yang memanfaatkan sumber dari alam berupa gelombang elektromagnetik untuk mengetahui konduktivitas dari struktur bawah permukaan (Simpson dan Bahr, 2005). Pada metode magnetotelurik, medan magnetik yang terukur di permukaan bumi merupakan sumber sinyal alami yang berasal dari dalam maupun luar bumi dengan rentang frekuensi yang bervariasi (Unsworth, 1999).



Gambar 1. Peta kaldera Ijen (modifikasi dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2010).

Metode magnetotelurik dianggap mampu memberikan gambaran sistem panasbumi yang lebih detail dari permukaan hingga kedalaman tertentu karena penetrasinya yang dalam. Metode magnetotelurik telah banyak digunakan di dalam eksplorasi panasbumi, seperti pada penelitian Asaue *et al.*, 2005, Bai *et al.*, 2001, Barcelona *et al.*, 2012, Patricia *et al.*, 2002 dan Giani *et al.*, 2003.

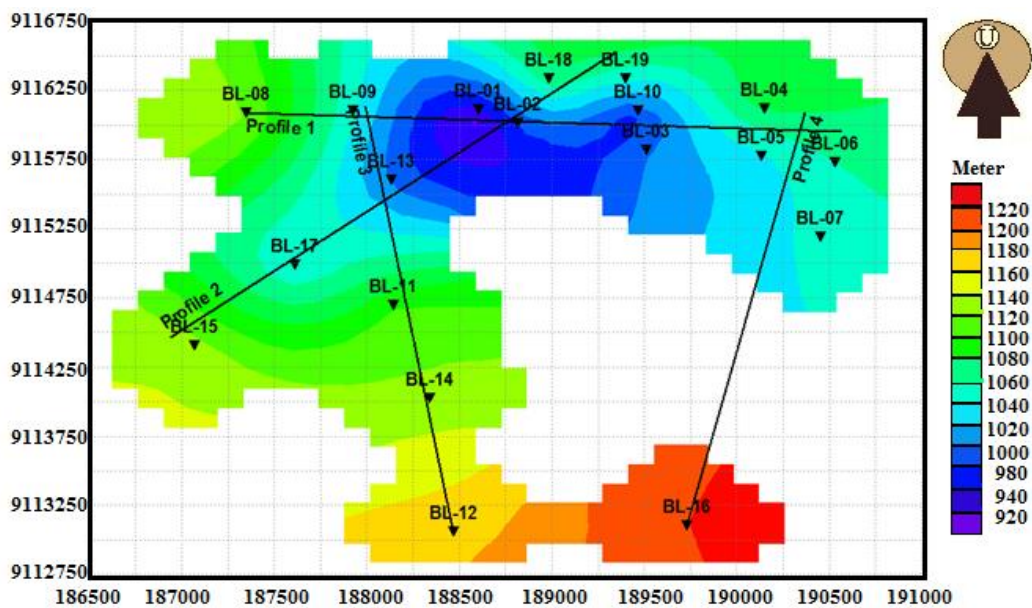
Pengambilan data dilakukan pada 21 Februari 2015 hingga 12 Maret 2015. Data magnetotelurik merupakan hasil akuisisi dengan menggunakan alat Metronix ADU-07e. Secara umum disetiap titik pengukuran magnetotelurik dipasang tiga koil magnetik (H_x , H_y dan H_z) dan empat buah sensor medan listrik (2 untuk E_x dan 2 untuk E_y). Tiga buah koil magnetik (H_x , H_y dan H_z) ditanam pada kuadran berbeda sehingga setiap koil dapat merekam secara *orthogonal* komponen medan magnet x , y dan z . Koil H_x dan H_y ditanam secara horizontal di tanah, sedangkan koil H_z ditanam secara vertikal. Sementara itu sensor medan listrik E_x ditanam dalam arah Utara-Selatan dengan jarak bentangan sejauh ± 30 m disesuaikan dengan lokasi pengukuran. Sensor medan listrik E_y ditanam dalam arah Timur-Barat dengan jarak bentangan sejauh ± 30 m juga. GPS diletakkan di dekat *control*

unit pada ketinggian ± 2 m dan dihubungkan ke *control unit*.

Seluruh titik pengambilan data magnetotelurik yang berjumlah 19 titik dibagi menjadi 4 profil inversi. Jarak antar titik pengukuran bervariasi antara 250 m hingga 1200 m. Pada proses akuisisi, untuk tiap titik pengambilan data digunakan 3 frekuensi sampling, yaitu 65 kHz, 4 kHz, dan 128 Hz. Adapun peta titik pengambilan data magnetotelurik dapat dilihat pada Gambar 2.

Tahap awal pengolahan data magnetotelurik adalah transformasi *Fourier* yang digunakan untuk mengubah data mentah yang masih dalam domain waktu menjadi data dalam domain frekuensi. Data diubah ke dalam domain frekuensi agar lebih mudah untuk dianalisis. Untuk data dengan frekuensi sampling 65 kHz, frekuensi tertinggi yang dapat direkam sebesar 17 kHz. Data dengan frekuensi sampling 4 kHz, memiliki frekuensi tertinggi hasil perekaman sebesar 1 kHz. Untuk data dengan frekuensi sampling 128 Hz, frekuensi tertinggi yang dapat direkam sebesar 30 Hz.

Sebelum memasuki tahap pemodelan data, semua data hasil perekaman dengan frekuensi sampling 65 kHz, 4 kHz, dan 128 Hz digabungkan kemudian ditentukan data yang akan digunakan, untuk proses pemodelan adalah data dengan rentang frekuensi 0,01 Hz hingga 10 kHz.



Gambar 2. Peta kontur elevasi titik pengambilan data magnetotelurik.

Pemodelan dilakukan dengan proses inversi yang bertujuan untuk menampilkan distribusi resistivitas terhadap kedalaman dalam bentuk kontur.

Untuk menyelesaikan permasalahan inversi dibuat sebuah regulasi untuk mendapatkan model yang meminimalkan fungsi objektif berikut ini :

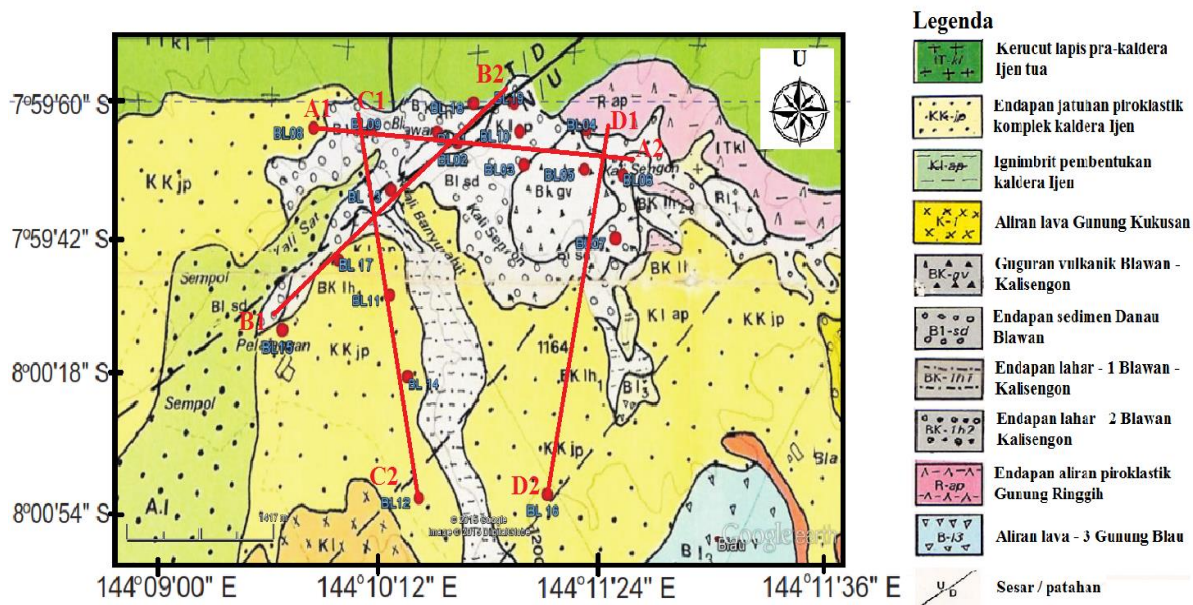
$$S(m) = (d - F(m))^T \hat{R}_{dd}^{-1} (d - F(m)) + \tau |L(m - m_o)|^2 \quad (1)$$

dimana d merupakan vektor data observasi, F merupakan operator pemodelan ke depan, m merupakan vektor model yang tidak diketahui, \hat{R}_{dd} merupakan *error* matriks kovarian, L merupakan operator linier, m_o merupakan model referensi, dan τ merupakan parameter regulasi yang ditentukan oleh pengguna. Pada persamaan diatas, bagian pertama menunjukkan ketidaksesuaian data, sedangkan bagian kedua menunjukkan ukuran penerimaan model baik dalam hal *smoothness* maupun kemiripannya dengan model referensi. Pada proses iterasi dalam penelitian ini dilakukan variasi nilai koefisien α dan τ hingga didapatkan nilai *error* dan *roughness* yang dianggap paling tepat. Selanjutnya, pemodelan 3D dilakukan dengan menggunakan *Software Rockwork*.

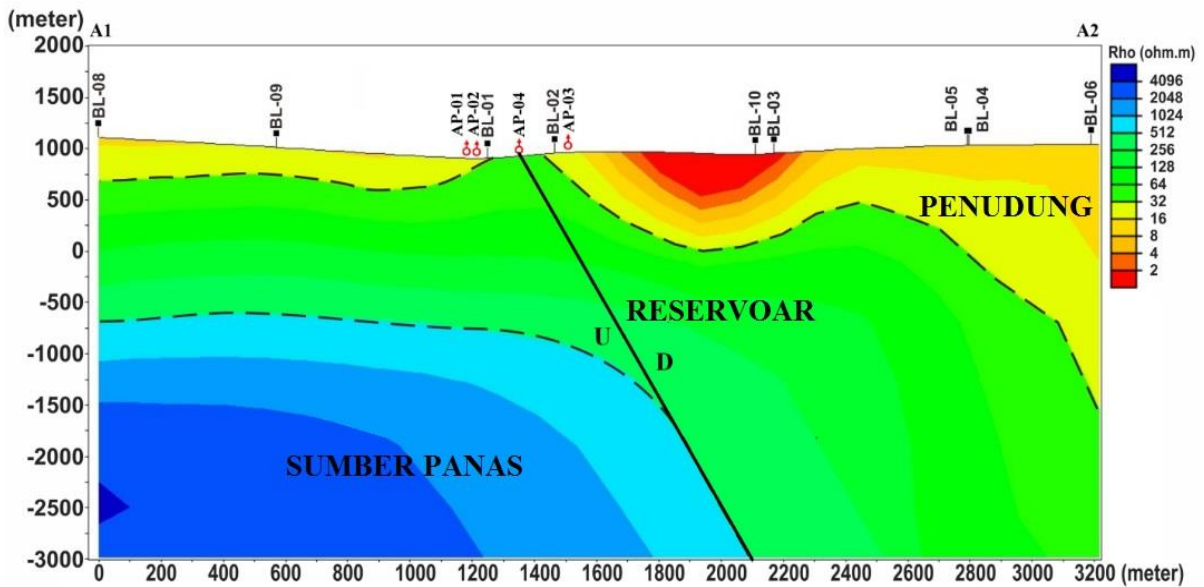
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan 2D menggunakan *software WinGlink* berupa penampang 2D resistivitas bawah permukaan untuk masing-masing lintasan. Hasil pemodelan 2D yang ditampilkan merupakan hasil inversi dengan mempertimbangkan parameter *error floor*, nilai α , dan nilai τ hingga didapatkan model 2D yang optimal dan memiliki kesesuaian yang baik antara nilai *RMS error* dengan *roughness*. Pemilihan model yang tepat juga disesuaikan dengan informasi geologi lokasi penelitian. Adapun peta geologi lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.

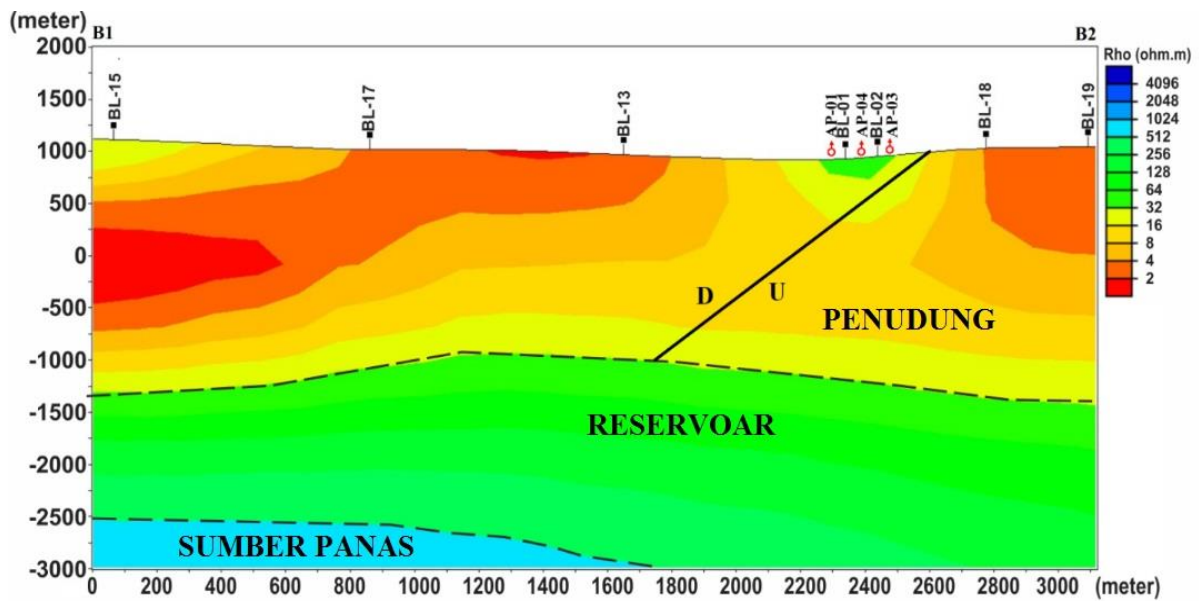
Kontur resistivitas profil 1 (Gambar 4) merupakan hasil inversi dengan menggunakan $\tau=5$, $\alpha=1$, iterasi sebanyak 136 kali dengan *RMS error* sebesar 4,455% dan *roughness* sebesar 1369,5. Kontur resistivitas profil 2 (Gambar 5) merupakan hasil inversi dengan menggunakan $\tau=5$, $\alpha=1$, iterasi sebanyak 152 kali dengan *RMS error* sebesar 3,005% dan *roughness* sebesar 306,6. Kontur resistivitas profil 3 (Gambar 6) merupakan inversi dengan menggunakan $\tau=5$, $\alpha=1$, iterasi sebanyak 154 kali dengan *RMS error* sebesar 3,788% dan *roughness* sebesar 327,4.



Gambar 3. Peta geologi lokasi penelitian.



Gambar 4. Model 2D struktur bawah permukaan pada profil 1.

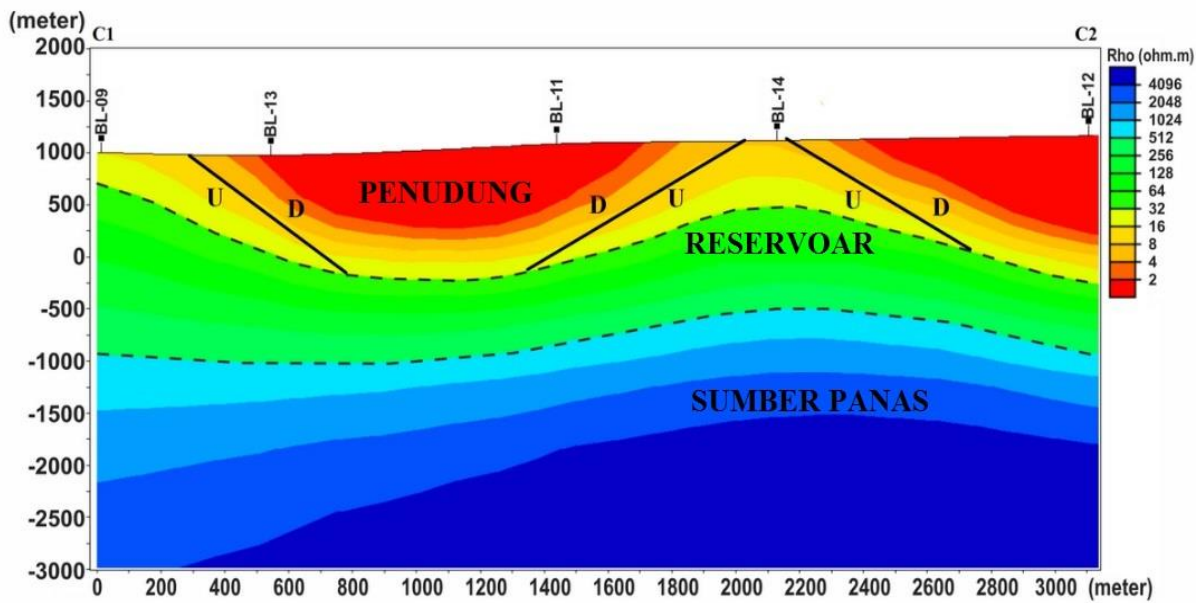


Gambar 5. Model 2D struktur bawah permukaan pada profil 2.

Pada kontur resistivitas profil 4 (Gambar 7) merupakan inversi dengan menggunakan $\tau=3$, $\alpha=1$, iterasi sebanyak 164 kali dengan *RMS error* sebesar 1,967% dan *roughness* sebesar 218,5.

Gambar 4 menunjukkan bahwa nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) mendominasi hingga kedalaman sekitar 750 mdpl dan menebal ke arah Timur, yakni disekitar BL-05, BL-04, dan BL-06. Berdasarkan data geologi, profil 1 didominasi atas

endapan sedimen danau Blawan. Selain itu, resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) juga berkaitan dengan proses alterasi hidrotermal yang didominasi oleh batu lempung teralterasi. Pada daerah diantara titik BL-01 dan BL-02 terdapat terobosan nilai resistivitas sedang ($\pm 64 \Omega.m$) menuju ke permukaan, hal ini diduga berkaitan dengan adanya patahan Blawan pada daerah tersebut sehingga menyebabkan fluida di dalam reservoir bermigrasi ke permukaan yang merupakan indikasi adanya aktivitas hidrotermal. Nilai resistivitas sedang ($> 32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$)



Gambar 6. Model 2D struktur bawah permukaan pada profil 3

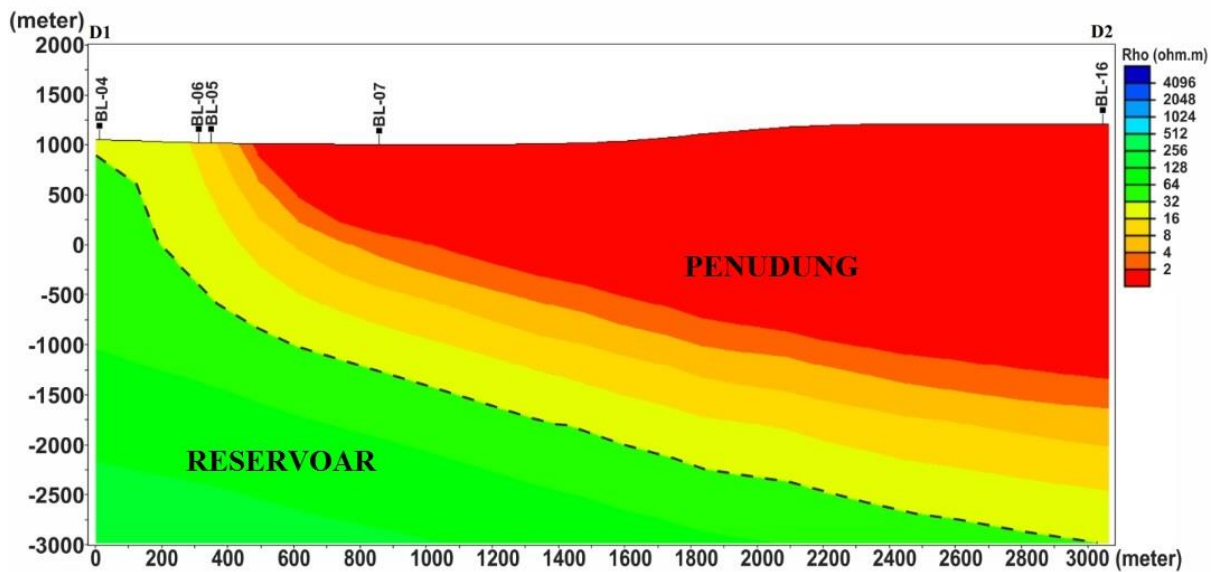
pada profil 1 berada pada kedalaman ± 750 mdpl hingga ± 750 m di bawah permukaan laut dan menebal hingga kedalaman 3000 m di bagian Timur. Sementara itu zona dengan nilai resistivitas tinggi ($> 512 \Omega.m$) berada di bagian Barat pada kedalaman ± 750 m hingga 3000 m di bawah permukaan laut. Pada profil 1 ini terdapat beberapa mataair panas yang berada pada zona dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$), yakni mataair panas AP-01, AP-02, dan AP-03. Sementara itu, mataair panas AP-04 berada pada zona dengan nilai resistivitas $> 32 \Omega.m$ hingga $\leq 64 \Omega.m$.

Gambar 5 menunjukkan bahwa zona dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) pada profil 2 cukup tebal yakni mulai dari permukaan 1250 m di bawah permukaan laut. Berdasarkan data geologi, BL-15 dan BL-17 tersusun atas endapan jatuhnya piroklastik kompleks Kaldera Ijen. Oleh karena itu resistivitas rendah di sekitar BL-15 dan BL-17 diduga didominasi oleh endapan piroklastik seperti abu vulkanik. Sementara itu, BL-13, BL-01, BL-02, BL-18, dan BL-19 pada peta geologi tersusun atas endapan sedimen danau Blawan. Nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) berkaitan dengan proses alterasi hidrotermal yang didominasi oleh batu lempung teralterasi. Nilai resistivitas sedang ($> 32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$) pada profil 2 berada pada kedalaman ± 1250 m hingga ± 2500 m di bawah permukaan laut dan menebal

hingga kedalaman 3000 m di sisi kanan. Sementara itu zona dengan nilai resistivitas tinggi ($\pm 1024 \Omega.m$) berada di sisi kiri pada kedalaman ± 2500 m hingga 3000 m di bawah permukaan laut.

Gambar 6 menunjukkan bahwa zona dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) membentang sepanjang penampang profil 3 mulai dari permukaan hingga 250 mdpl. Berdasarkan data geologi, BL-09 dan BL-13 tersusun atas endapan sedimen danau Blawan. Sementara itu, BL-11, BL-12 dan BL-14 tersusun atas endapan jatuhnya piroklastik kompleks Kaldera Ijen. Nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) berkaitan dengan proses alterasi hidrotermal yang didominasi oleh batu lempung teralterasi. Nilai resistivitas sedang ($> 32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$) pada profil 3 berada pada kedalaman ± 250 mdpl hingga ± 1000 m di bawah permukaan. Sementara itu zona dengan nilai resistivitas tinggi ($> 512 \Omega.m$) berada Barat pada kedalaman ± 1000 m hingga 3000 m di bawah permukaan laut.

Gambar 7 menunjukkan bahwa zona dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) pada profil 4 sangat tebal dan semakin menebal ke arah BL-16. Sebaliknya, zona dengan nilai resistivitas sedang ($> 32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$) semakin menebal ke arah BL-04. Sementara itu, pada profil 4 ini tidak terdapat zona dengan resistivitas tinggi ($> 512 \Omega.m$). Berdasarkan korelasi dengan data geologi, zona resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) di daerah BL-



Gambar 7. Model 2D struktur bawah permukaan pada profil 4.

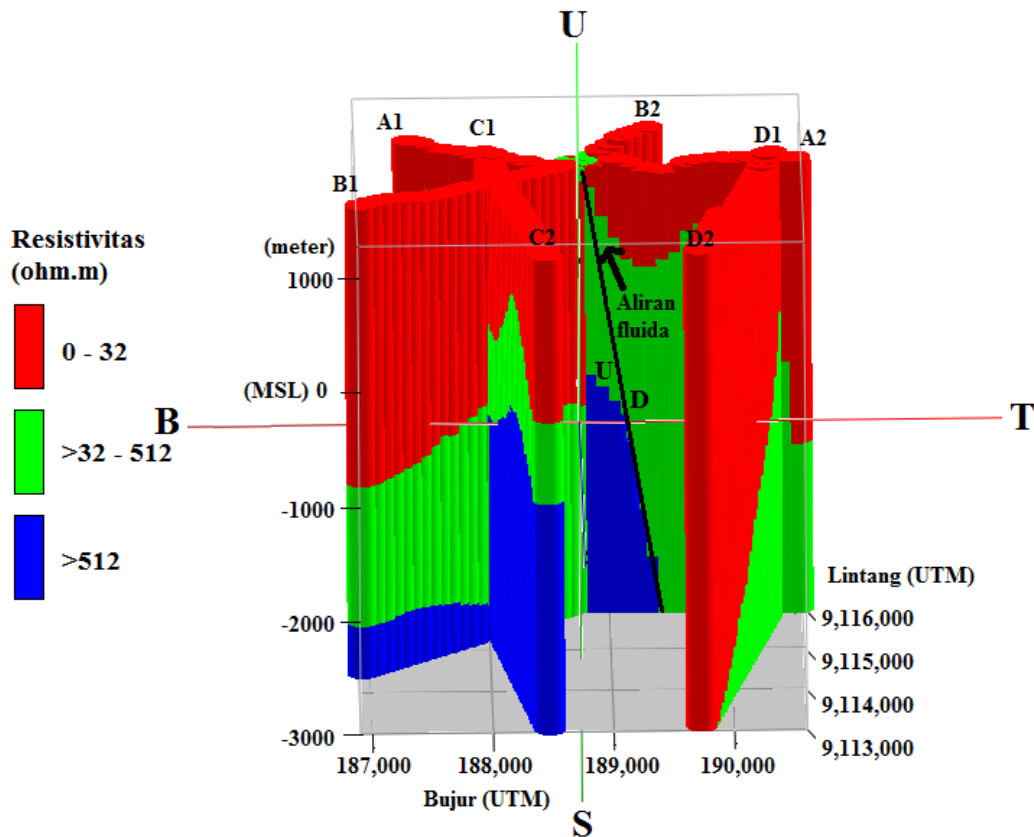
04, BL-05, BL-06, dan BL-07 diperkirakan berkaitan dengan endapan sedimen Pleistosen dari Danau Blawan dan Sungai Kalisengon bersama dengan fluida panasbumi di lokasi tersebut. Secara umum, salinitas dan konduktivitas dari batu lempung hasil alterasi hidrotermal yang berkaitan dengan aktivitas panasbumi akan menghasilkan resistivitas rendah secara keseluruhan dalam sistem panasbumi (Ussher *et al.*, 2000). Pada zona dengan nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) pada titik BL-16 diperkirakan berkaitan dengan keberadaan material magmatik yang bersifat sangat konduktif. Nilai resistivitas rendah hingga kedalaman ± 3000 m di bawah permukaan laut.

Gambar 8 menunjukkan gabungan nilai resistivitas dari ke-4 profil inversi. Pada Gambar 8 terlihat bahwa nilai resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) tersebar merata di seluruh permukaan pada daerah penelitian. Zona dengan nilai resistivitas rendah ini menebal di bagian Timur. Zona resistivitas sedang ($> 32 \Omega.m$ hingga $\leq 512 \Omega.m$) juga ditemukan pada semua profil. Zona dengan resistivitas sedang ini diduga sebagai reservoir tempat terakumulasinya fluida panas. Perpotongan antara profil 1 dan profil 2 memperlihatkan adanya rekahan hingga permukaan. Rekahan tersebut diduga berkaitan dengan adanya patahan Blawan pada daerah tersebut sehingga menyebabkan fluida di dalam reservoir bermigrasi ke permukaan yang merupakan indikasi adanya aktivitas hidrotermal.

Rekahan ini diduga merupakan jalur dari zona *outflow* dari sistem panasbumi Blawan. Sementara itu, zona dengan resistivitas tinggi ($> 512 \Omega.m$) hanya terdapat pada profil 1, 2, dan 3. Perpotongan antara profil 2 dan profil 3 memperlihatkan adanya penurunan blok batuan yang diduga merupakan indikasi adanya patahan. Secara geologi, daerah tersebut merupakan daerah kemenerusan dari patahan Blawan. Patahan Blawan ini terbentuk akibat proses tektonik yang cukup besar pada masa pasca kaldera.

Persyaratan utama untuk pembentukan sistem panasbumi (hidrotermal) adalah sumber panas yang besar (*source rock*), reservoir untuk mengakumulasi panas, dan lapisan penudung terakumulasinya panas (*caprock*) (Kasbani, 2009). Ditemukannya beberapa sesar pada Gambar 4 akan mendukung sistem panasbumi Blawan. Sesar tersebut akan menjadi jalan keluar bagi fluida reservoir untuk mengalir ke permukaan. Zona dengan resistivitas rendah ($\leq 32 \Omega.m$) tersebut diduga berperan sebagai lapisan penudung. Lapisan penudung memiliki resistivitas rendah dikarenakan keberadaan mineral lempung yang melimpah (Uchida dan Murakami, 1989). Lapisan penudung tersusun atas batuan yang bersifat *impermeable*, sehingga mampu mencegah fluida panas pada reservoir keluar ke permukaan.

Reservoir panasbumi memiliki resistivitas yang cukup tinggi dikarenakan berkurangnya mineral lempung (Asaue *et al.*, 2005). Oleh karena itu,



Gambar 8. Gabungan nilai resistivitas pada lokasi penelitian.

zona yang memiliki resistivitas sedang ($>32 \Omega.m$ hingga $\leq 512 \Omega.m$) diduga merupakan zona reservoir. Reservoir panasbumi merupakan tempat akumulasi fluida hidrotermal hasil pemanasan oleh sumber panas (Gianni *et al.*, 2003). Pada zona yang memiliki resistivitas tinggi ($>512 \Omega.m$) diduga merupakan sumber panas dari sistem panasbumi Blawan.

KESIMPULAN

Hasil pengolahan data magnetotelurik dan interpretasi menunjukkan bahwa sistem panasbumi pada daerah penelitian tersusun atas zona lapisan penudung ($\leq 32 \Omega.m$), zona reservoir ($>32 \Omega.m - \leq 512 \Omega.m$) dan zona sumber panas ($>512 \Omega.m$), serta didukung oleh adanya patahan. Model struktur bawah permukaan profil 1, profil 2, dan profil 3 memiliki komponen sistem panasbumi yang lengkap yakni memiliki zona lapisan penudung, zona reservoir, zona sumber panas dan beberapa patahan. Sementara itu model 2D struktur bawah permukaan pada profil 4 hanya menunjukkan adanya zona lapisan penudung dan

zona reservoir. Berdasarkan pemodelan 3D dapat terlihat bahwa patahan Blawan di penampang profil 1 menjadi jalan untuk sirkulasi fluida panasbumi mengalir ke permukaan (zona *outflow*).

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada penyelenggara Hibah Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi Tahun 2015 dan NSF – USAID Tahun 2015 PGA 2000005053 yang telah mendukung terlaksananya penelitian ini dan Tim Blawan – Ijen yang membantu proses akuisisi data.

DAFTAR PUSTAKA

Afandi, A., Maryanto, S., dan Rachmansyah, A., 2013. Identifikasi reservoir daerah panasbumi dengan metode geomagnetik daerah Blawan, Kecamatan Sempol, Kabupaten Bondowoso. *Neutrino*, 6(1), 1-10.

- Asaue, H., Koike, K., Yoshinaga, T., dan Takakura, S., 2005. Magnetotelluric resistivity modeling for 3D characterization geothermal reservoir in the western side of Mt. Aso, SW Japan. *Journal of Applied Geophysics*, 58, 296-312.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana., 2010. Peta Topografi Kabupaten Bondowoso (Topography Map of Bondowoso District), *Lembar (Sheet) ID-O11-250K*, Skala (Scale) 1:250.000 pada ukuran A1. Badan Nasional Penanggulangan Bencana. Jakarta.
- Bai, D., Meju, M.A., dan Liao, Z., 2001. Magnetotelluric images of deep crustal structure of the Rehai geothermal field near Tengchong, Southern China. *Geophys. J. Int*, 147, 677– 687.
- Barcelona, H., Favetto, A., Peri, V.G., Pomposiello, C., dan Ungarelli, C., 2012. The potential of audiomagnetotellurics in the study of geothermal fields: a case study from the northern segment of the La Candelaria Range, Northwestern Argentina. *Journal of Applied Geophysics*, 88, 83–93.
- Broto, S dan Putranto, T.T., 2011. Aplikasi metode geomagnet dalam eksplorasi panasbumi. *Jurnal Teknik*, 32(1), 79-87.
- Delmelle, P dan Bernard, A., 1994. Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah-Ijen Volcano, Indonesia. *Geochimica and Cosmochimica Acta*, 58(11), 2445-2460.
- Gianni, V., Manzella, A., dan Fiordelisi, A., 2003. Investigation of geothermal structures by magnetotellurics (MT): An example from the Mt. Amiata Area, Italy. *Geothermics*, 32, 131– 145.
- Karlina, I., Maryanto, S., dan Rachmansyah, A., 2013. Sebaran mataair panas Blawan-Ijen berdasarkan data geolistrik resistivitas. *Natural B*, 2(2), 164-171.
- Kasbani., 2009. Tipe sistem panasbumi di Indonesia dan estimasi potensi energinya. Program Penelitian Panasbumi. *Buletin Badan Geologi*. 4(2), 64-73.
- Patricia, P.L., Emanuele, F.T., Berthold, K., dan Sergio, L.F., 2002. Magnetotelluric studies of the Caldas Novas geothermal reservoir, Brazil. *Journal of Applied Geophysics*, 49, 33– 46.
- Raehanayati, Rachmansyah, A., dan Maryanto, S., 2013. Studi potensi energi geothermal Blawan – Ijen, Jawa Timur berdasarkan metode gravity. *Neutrino*, 6(1), 31-39.
- Simpson, F dan Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-2.
- Sukhyar, R., Gurusinga, C.K.K., Kasbani, Widodo, S., Munandar, A., Dahlan, Hadi, M.N., Risdianto, D., Rezky, Y., Wibowo, A.E., Permana, L.A., Setyawan, D.I., Wahyuningsih, R., 2014. Potensi dan Pengembangan Sumber Daya Panasbumi Indonesia, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung, p. 118.
- Uchida, T., dan Murakami, Y., 1989. Geothermal reservoir and its resistivity structure. *Geophysics Exploration*, 42, 458– 468.
- Unsworth, M.J., 1999. *Magnetotelluric*, McGraw Hill, New York, pp. 240-242.
- Ussher, G., Harvey, C., Johnstone, R., dan Anderson, E., 2000. Understanding resistivities observed in geothermal systems. *Proceedings World Geothermal Congress*. Mei 28 – Juni 10, 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 1915–1920.
- Wirakusumah, A. D., Abdurahman, O., dan Kurnia, A., 2013. Hubungan tektonik dan potensi panasbumi di Indonesia. *Majalah Geologi Populer GeoMagz*, 3(3), 64-67.
- Zaennudin, A., Wahyudin, Deden, Surmayadi, Mamay, Kusdinar, E., 2012. Prakiraan bahaya letusan Gunungapi Ijen Jawa Timur. *Lingkungan dan Bencana Geologi*, 3(2), 109-132.