

**PEMODELAN RESEVOIR PANAS BUMI DAERAH DUA SAUDARA,
KOTA BITUNG, PROVINSI SULAWESI UTARA,
DENGAN MENGGUNAKAN INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELURIK**

**MODELING OF DUA SAUDARA GEOTHERMAL RESERVOIR, BITUNG CITY,
NORTH SULAWESI PROVINCE, USING 2-D MAGNETOTELURIC DATA INVERSION**

Ahmad Zarkasyi dan Rina Wahyuningsih

Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi
zarkasyiahmad@gmail.com

ABSTRAK

Hasil survei geologi, geokimia dan geofisika gaya berat dan TDEM, di daerah panas bumi Dua Saudara, Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara belum dapat secara akurat mendelineasi area dan dimensi prospek panas bumi di daerah ini. Sistem panas bumi di daerah ini berasosiasi dengan aktivitas vulkanik Gunung Tangkoko-Batuangus berumur Kuartar. Litologi daerah ini didominasi oleh endapan vulkanik berupa piroklastik dan lava. Selain batuan teralterasi, mata air panas muncul dengan temperatur 34°C -61°C, dari fluida air panas didapat penghitungan temperatur bawah permukaan mencapai 150°C. Pemodelan 2D inversi dilakukan pada data survei Magnetotelurik di 35 titik ukur dengan spasi 1000 hingga 1500 m yang difokuskan di lokasi manifestasi mata air panas. Hasil inversi menggunakan perangkat lunak WinGLink menunjukkan adanya lapisan resistivitas rendah (<10 ohm-m) yang ditafsirkan sebagai lapisan penudung dari system panas bumi Dua Saudara. Lapisan ini berasosiasi dengan lapisan konduktif yang terletak pada kedalaman sekitar 750 meter hingga 1000 meter. Zona resistivitas tinggi (25-100 ohm-m) ditafsirkan sebagai batuan panas yang kemungkinan adalah reservoir dari sistem tersebut. Dari model ini disimpulkan bahwa daerah survei masih merupakan zona *outflow*, sedangkan zona *upflow* diduga ke arah tenggara menuju Gunung Dua Saudara dan Gunung Tangkoko.

Kata kunci: Panas bumi, Dua Saudara, magnetotelurik, inversi 2D, Sulawesi

ABSTRACT

Data resulted from 3G surveys include gravity and TDEM, at Dua Saudara geothermal area, Bitung City, North Sulawesi Province has not been able to accurately delineate the area and dimensions of geothermal prospects in this area. The geothermal system here is associated with Quaternary Mount Tangkoko-Batuangus volcanic activities. The lithology of this area is dominated by volcanic deposits namely pyroclastic and lava rocks. In addition to altered rocks, hot springs appear with temperatures of 34-61°C. By using geothermometer calculation of the hot spring fluid, obtained, an estimated subsurface temperature reach 150°C. 2D inversion modeling was carried out on Magnetotelluric survey data gained from 35 measuring points with 1000 to 1500m spacing where focused on the location of hot spring manifestations. The results of inversion using WinGLink software shows a low resistivity layer (<10 ohm-m) interpreted as impermeable/cap rocks of the geothermal system. This layer is associated with a conductive layer located at a depth of about 750-1000 meters. High resistivity zones are interpreted as hot rocks that lead to the reservoir. From this model it is concluded that the survey area is still an outflow zone, while the upflow zone is assumed to be southeast towards Dua Saudara Mountain and Tangkoko Mountain.

Keywords: Geothermal, Dua Saudara, magnetotelluric, 2D inversion, Sulawesi

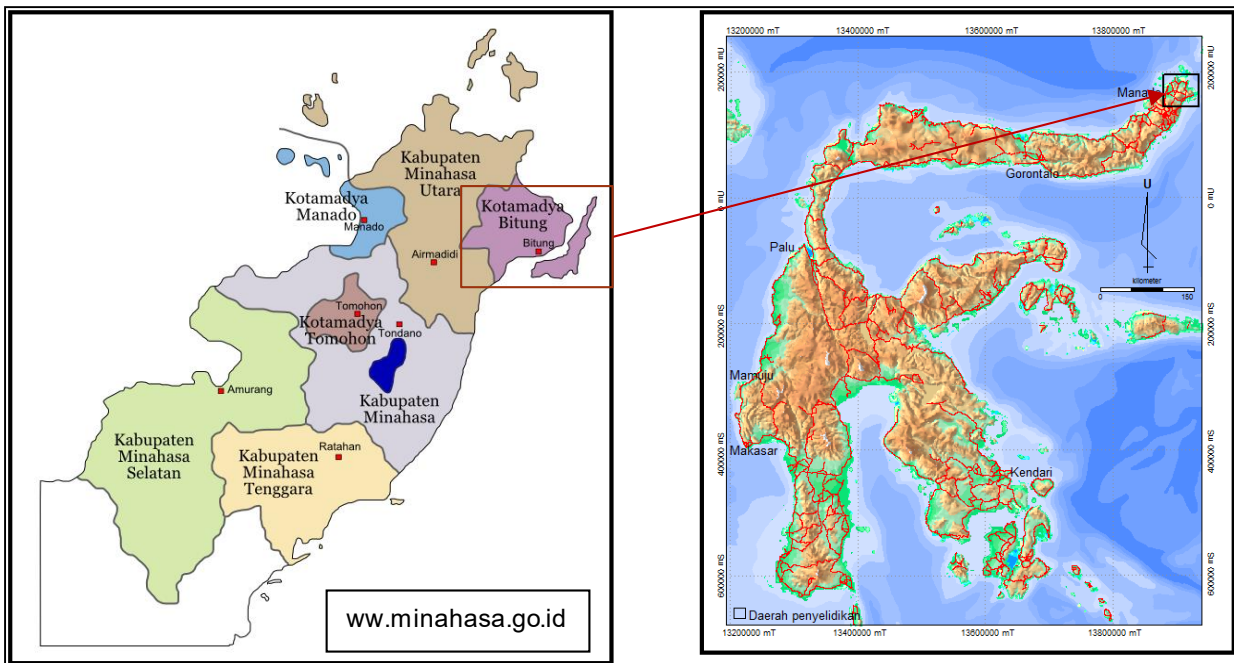
PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Dua Saudara yang berada di wilayah Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara (Gambar 1) telah dilakukan survei rinci geologi, geokimia dan geofisika (gaya berat dan TDEM) oleh Badan Geologi pada tahun 2013. Ditinjau dari tataguna lahan, daerah panas bumi ini sebagian masuk ke dalam wilayah hutan konservasi.

Sistem panas bumi di daerah ini diindikasikan dengan munculnya beberapa manifestasi panas bumi berupa mata air panas dan batuan ubahan. Mata air panas dengan temperatur 34°C s.d. 61°C muncul di sekitar lereng Gunung Dua Saudara dan Gunung Tangkoko yang merupakan dua gunungapi aktif berumur Kuarter (Anonim, 2013) sehingga sistem ini diduga kuat berkaitan dengan aktivitas vulkanisme di daerah tersebut (Gambar 2).

Tatanan tektonik daerah panas bumi Dua Saudara berada pada bagian busur magmatik, di lingkungan vulkanik yang masih aktif. Susunan stratigrafi batuan terbagi menjadi Vulkanik Tua Tondano, Vulkanik Toka Tindung, Aliran Piroklastik Klabat, Produk Gunung Dua Saudara (Aliran Piroklastik dan Lava), Lava Tembaan koka, Lava Tawau, Produk Gunung Tangkoko (lava, aliran dan jatuhnya Piroklastik, Lava Batu Angus, dan Endapan Pantai) (Anonim, 2013).

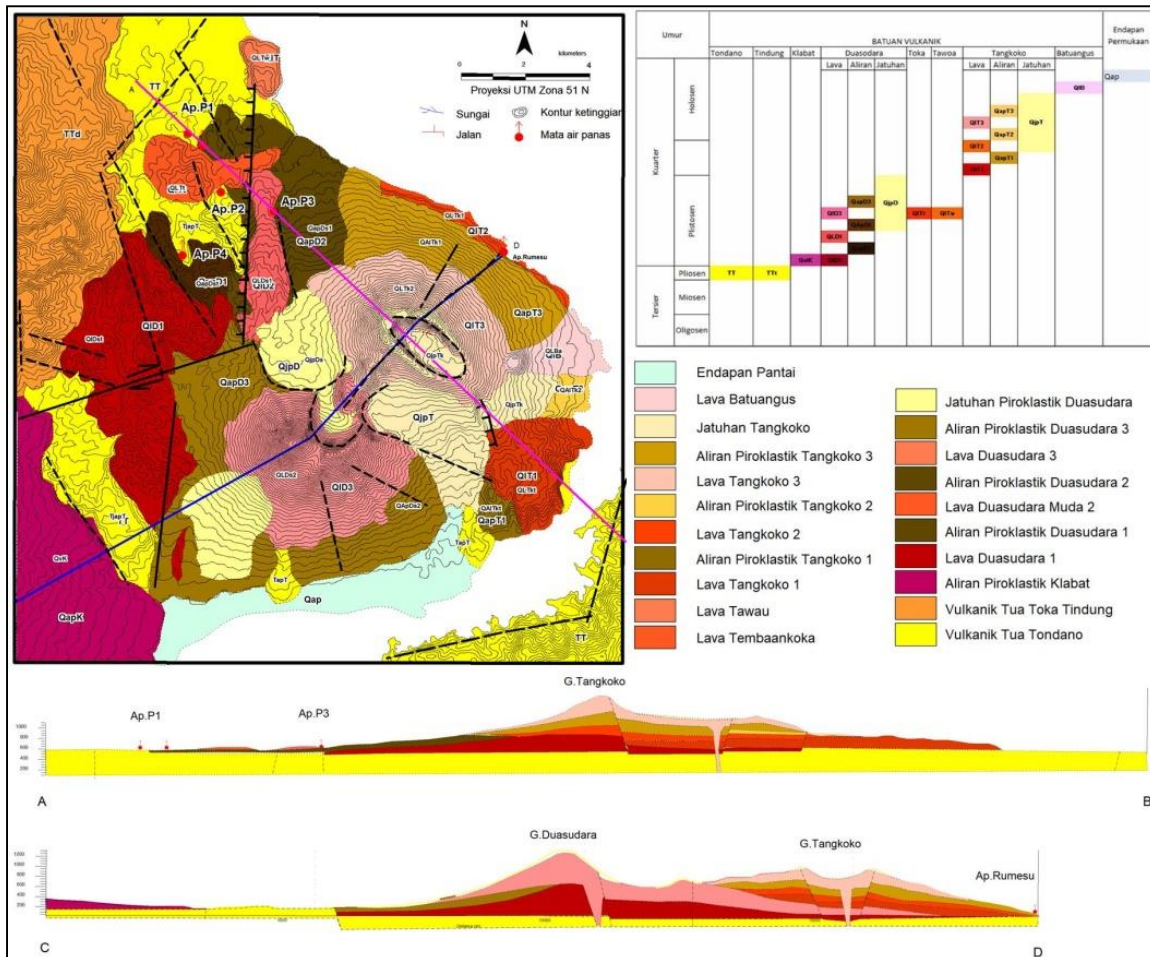
Struktur geologi utama yang berkembang di daerah ini berarah baratdaya-tenggara dan utara-selatan. Kontrol struktur utama berupa sesar normal di sekitar Batuputih dengan bagian turun di sisi timur (GunungTangkoko). Struktur vulkanik berupa kaldera di Gunung Dua Saudara dan Gunung Tangkoko dan struktur kawah di Gunung Batu Angus. Sumber panas diperkirakan dari sisa aktivitas vulkanik dari produk vulkanik Kuarter Tembaankoka dan vulkanik Batu Angus. (Anonim, 2013).



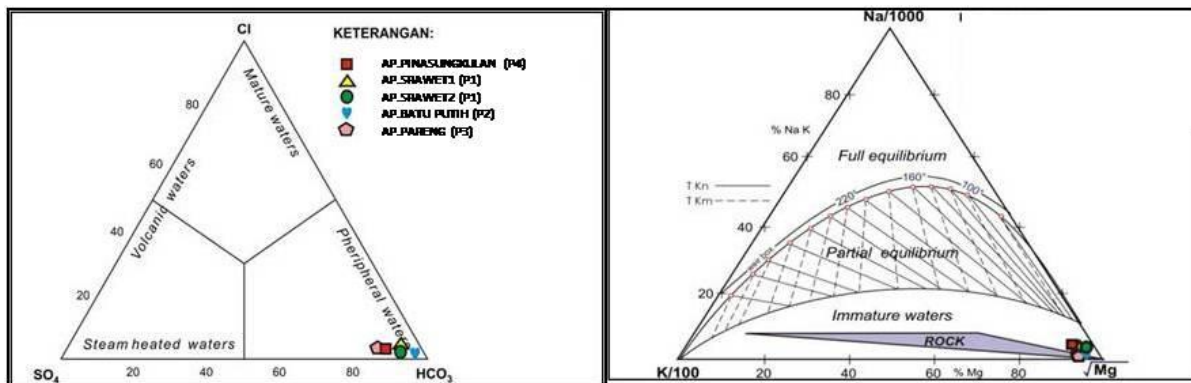
Gambar 1. Peta Lokasi Dua Saudara

Berdasarkan hasil analisis kimia, fluida panas bumi yang muncul di permukaan (Gambar 3) relatif tidak menunjukkan sebagai air reservoir, karena mempunyai kandungan silika yang rendah. Dari hasil

penghitungan geothermometer dan pertimbangan kondisi geologi, diperkirakan temperatur di bawah permukaan sebesar 150°C (Anonim, 2013).



Gambar 2. Peta geologi daerah Dua Saudara, dimodifikasi dari Peta Geologi daerah panas bumi Dua Saudara, oleh Anonim, 2013a.



Gambar 3. Segitiga geokimia Cl-SO₄-HCO₃ dan Na-K-Mg, dimodifikasi dari hasil analisis air Cl-SO₄-HCO₃ dan Na-K-Mg daerah panas bumi Dua Saudara, oleh Anonim, 2013a.

Hasil dari survei geofisika gaya berat dan TDEM juga kurang akurat untuk mendeliniasi area prospek panas bumi di daerah ini. Luas area prospek hasil kompilasi anomali gaya berat dan TDEM memiliki luas sekitar 6 km² yang kemungkinan masih membuka ke arah selatan dan barat dari daerah survei (Anonim, 2013).

Survei TDEM pada umumnya hanya dapat mendeteksi anomali hingga kedalaman yang cukup dangkal. Pada daerah Dua Saudara, zona anomali hanya bisa terdeteksi pada kedalaman sekitar 200 meter. Untuk itu perlu dilakukan survei lanjutan yang dapat mendeteksi batuan sampai dengan kedalaman lebih dari 1000 meter. Untuk itu diperlukan metode survei yang dapat mendeliniasi reservoir panas bumi yang umumnya mencapai kedalaman lebih dari 1000 meter; dalam hal ini adalah Magnetotelurik. Namun demikian, data TDEM akan berfungsi juga sebagai alat koreksi dalam pengolahan data Magnetotelurik.

Pada tahun 2014, Badan Geologi melakukan survei geofisika dengan menggunakan metode Magnetotelurik. Data hasil survei magnetotelurik ini diharapkan dapat mempertegas deliniasi zona prospek panas bumi baik dari segi luasan juga dari segi kedalaman.

Analisis data magnetotelurik dalam makalah ini berupa pemrosesan data pemodelan tahanan jenis dengan Teknik inversi 2D. Hasil pemodelan akan diperlihatkan dalam bentuk penampang vertikal dan juga sebaran horizontal

METODE MAGNETOTELURIK (MT)

Metode MT mengukur variasi waktu medan magnetik di permukaan bumi. Metode MT ini memanfaatkan variasi medan magnet bumi yang dihasilkan dari kilat, aktivitas ionosfer dan *solar wind*. Sumber tersebut menghasilkan gelombang elektromagnetik dengan rentang frekuensi yang sangat lebar, yaitu antara 10⁻⁵-10⁴ Hz (Daud, 2010).

Fluktuasi medan magnet menyebabkan arus listrik sedangkan variasi konduktivitas listrik berarah lateral dan vertikal di kerak bumi disebabkan oleh adanya ion atau benda konduktif padat (Zhdanov, 2002).

Tahanan jenis atau resistivitas diperoleh dari perbandingan besarnya medan listrik dan medan magnet yang dikenal dengan persamaan Cagniard (Cagniard, 1953). Persamaan ini dihasilkan dari persamaan Maxwell dengan asumsi gelombang bidang.

$$\rho_a = \frac{1}{5} f x \left| \frac{E}{H} \right|^2$$

- ρ_a : tahanan jenis semu (Ohm-m)
- f : frekuensi (Hz)
- E : Besarnya medan listrik (mV/km)
- H : Besarnya medan magnet (nT)

Kedalaman efektif dalam metode MT bergantung kepada tahanan jenis batuan dan frekuensi yang digunakan. Penetrasi kedalaman efektif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan di bawah ini (Zhdanov, 2009):

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{\mu_0 \sigma \omega}}$$

- δ : skin depth (m)
- ω : frekuensi sudut
- σ : konduktivitas (S/m)
- μ : permeabilitas magnet (H/m)

Ketika tahanan jenis berubah terhadap kedalaman, maka tahanan jenis semu akan berubah terhadap frekuensi (gelombang elektromagnetik). Frekuensi tinggi tidak dapat menjangkau penetrasi yang cukup dalam, sebaliknya frekuensi rendah dapat mencapai penetrasi lebih dalam.

Pemodelan data MT dapat menggunakan inversi 1D, 2D dan 3D. Pemodelan inversi 1D dapat memberikan gambaran kasar mengenai penyebaran resistivitas bawah permukaan, meskipun dengan batas tepi yang masih belum akurat dan sempurna (Cumming and Mackie, 2010).

Pemodelan inversi 2D merupakan salah satu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis batuan di bawah permukaan (Qahhar dkk., 2015). Metode yang digunakan adalah NLCG (*NonLinear Conjugate Gradient*) yang dapat secara langsung meminimalisasi problem yang bukan kuadratik, membebaskan kerangka iterasi dan inversi linear (Rody & Mackie, 2001). Metode ini mengevaluasi fungsi *forward* untuk setiap model terbaru. Oleh karena itu, setiap satu kali iterasi pada inversi untuk setiap lintasan menyelesaikan dua atau tiga problem *forward* (Siripunvaraporn, 2012).

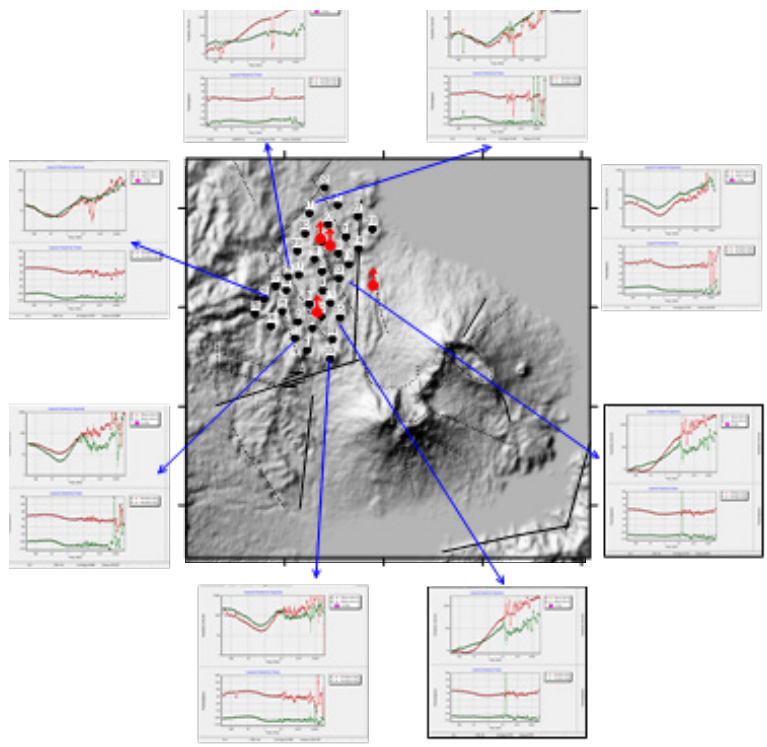
Dari penjelasan ini, dapat diketahui, bahwa inversi 2-Dimensi akan memberikan gambaran kondisi di bawah permukaan.

PENGOLAHAN DATA

Pada pra pengolahan data dan inversi 2D menggunakan komponen data yang diukur dalam akuisisi data yaitu medan magnet

(Hx, Hy dan Hz) dan komponen medan listrik (Ex dan Ey). Sebelum melakukan pemodelan, data terlebih dahulu diproses melalui tahapan penyeleksian data *time series*. Proses pra pengolahan ini menggunakan program *Synchro Time Series Viewer*. Data *time series* MT yang diperoleh pada masing-masing stasiun, diproses menggunakan *statistically robust algorithms* (Jones et al, 1989), dan dilanjutkan pada MT Editor untuk penyeleksian *cross power*. Pada proses ini, rentang frekuensi data magnetotelurik yang diambil mulai dari 320 Hz hingga 0,01 Hz.

Data MT yang digunakan dalam proses pemodelan berasal dari 35 titik ukur. Jarak antar titik ukur berkisar 500 meter hingga 1500 meter dengan sebaran titik melingkupi lokasi mata air panas yang diduga sebagai area keprospekan panas bumi. Kualitas data mayoritas bagus pada frekuensi tinggi (320 Hz) sampai dengan frekuensi sekitar 0,1 Hz. Sedangkan frekuensi < 0,1 Hz kualitas data yang peroleh mulai mendapatkan *noise* (Gambar 4).



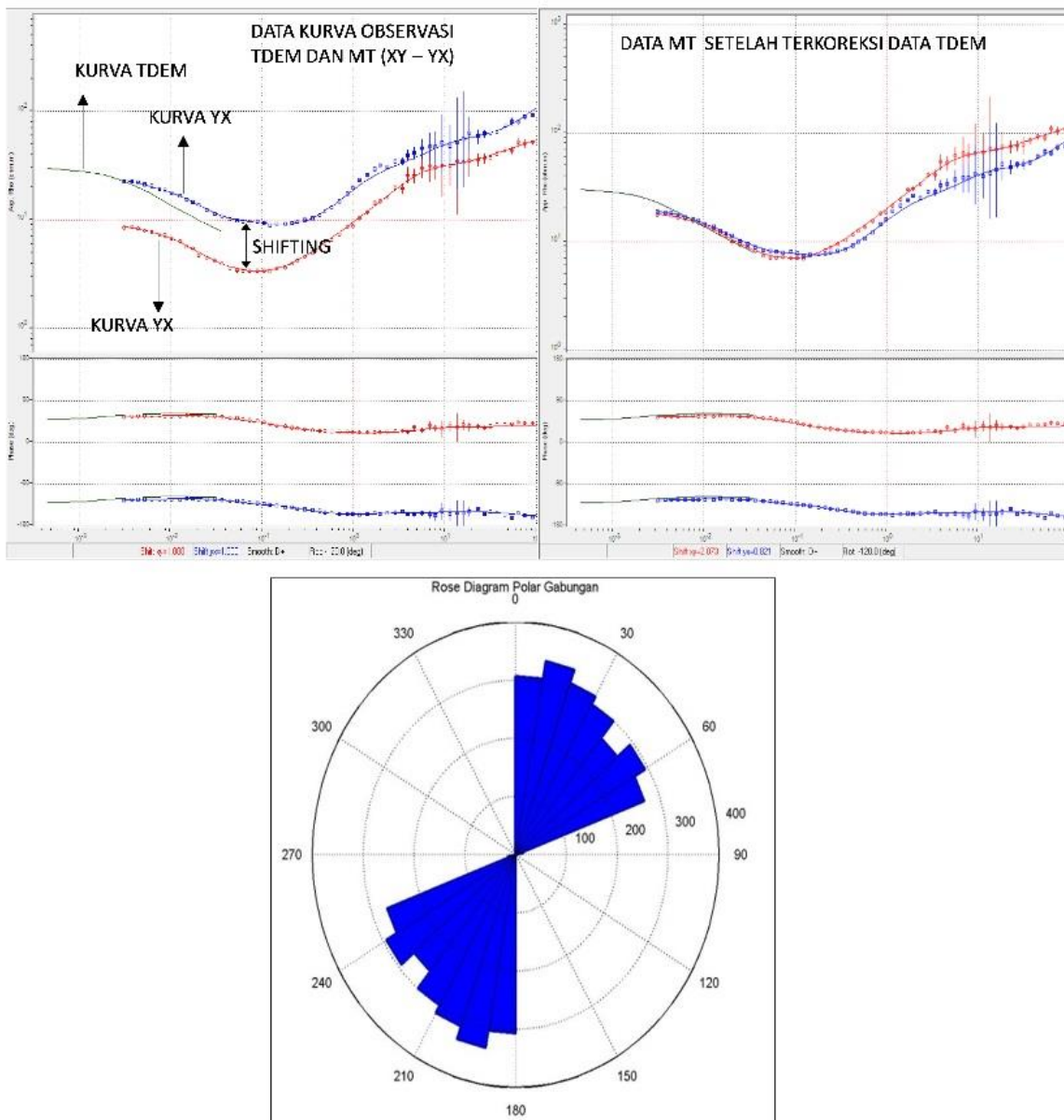
Gambar 4. Sebaran titik dan data MT

Penentuan arah rotasi dilakukan dengan menggunakan metode tensor impedansi. Metode ini menganalisis nilai impedansi yang dihasilkan dari komponen Z_{xx} , Z_{xy} , Z_{yx} dan Z_{yy} pada semua titik dan frekuensi dalam bentuk *rose diagram*. Arah rotasi hasil analisis menunjukkan rentang arah 0° - 60° atau -120° - 180° dan kemudian dipilih arah -120° .

Untuk mengkoreksi efek statik dari data MT, digunakan data hasil pengolahan metode TDEM. Efek statik ini dapat terjadi, karena beberapa keadaan seperti

heterogenitas batuan di dekat permukaan, *vertical contac*, dan efek topografi. Efek statik ini dapat mengakibatkan terjadinya *shifting splitting* pada kurva MT. Penggunaan data TDEM untuk koreksi dapat menjadi salah satu solusi dalam mengatasi efek statik ini (Gambar 5).

Setelah melalui *editing data* rotasi dan koreksi statik, kemudian dilanjutkan dengan pemodelan melalui teknik Inversi data 2-Dimensi menggunakan software WinGlink.



Gambar 5. Contoh data MT terkoreksi data TDEM dan penentuan arah rotasi

HASIL PENGOLAHAN DAN DISKUSI

Tahanan jenis semu invarian

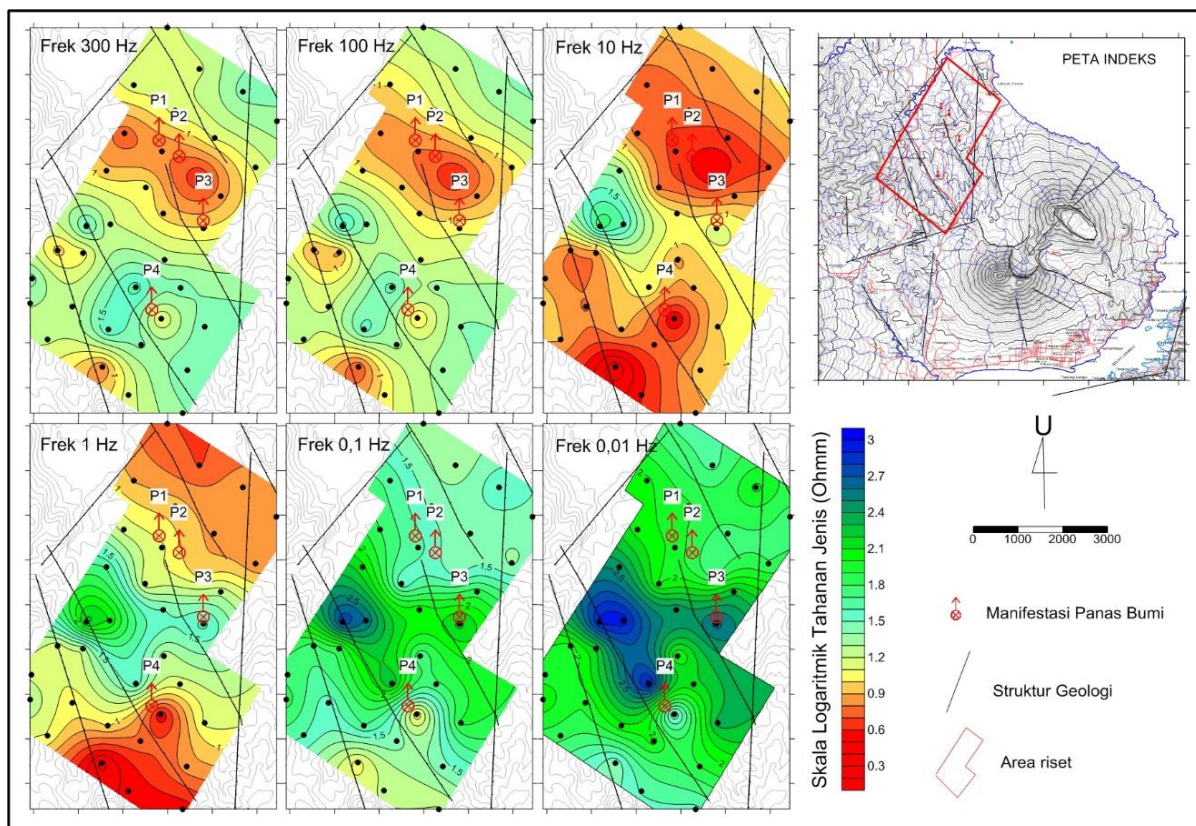
Peta sebaran tahanan jenis semu invarian merupakan kombinasi kurva data observasi dari pengukuran MT. Pada frekuensi tinggi (300 Hz dan 100 Hz) anomali - anomali nilai tahanan jenis rendah < 10 Ohm-m menempati area sekitar munculnya manifestasi panas bumi P1, P2 dan P3 (Gambar 6). Di luar daerah tersebut, nilai tahanan jenis umumnya homogen dengan nilai 30-40 Ohm-m dengan liniasi kontur berarah barat-laut-tenggara di bagian tengah dan utara, sedangkan bagian selatan arah liniasi tidak tegas/teratur.

Zona tahanan jenis rendah di sekitar manifestasi semakin meluas ke arah utara (arah pantai) pada frekuensi 10 Hz dan 1 Hz. Sedangkan area bagian tengah pada kedua frekuensi ini memiliki nilai yang

semakin meninggi dengan tren liniasi berarah barat-laut-tenggara.

Pada frekuensi yang lebih rendah (0,1 Hz dan 0,01 Hz) nilai tahanan jenis tampak semakin seragam antara bagian utara dan selatannya. Nilai tahanan jenis < 10 Ohm-m di sekitar mata air panas juga sudah tidak muncul lagi, dan digantikan oleh nilai tahanan jenis sekitar 30-50 Ohm-m.

Pola sebaran tahanan jenis semu tersebut menggambarkan bahwa, pada kedalaman dangkal (frekuensi tinggi), terdapat sebaran batuan teralterasi di sekitar manifestasi. Di area lain, digambarkan keterdapatn batuan permukaan yang berasal dari produk vulkanik berupa lava dan piroklastik (Anonim, 2013a). Pada kedalaman besar (frekuensi rendah) diperoleh nilai tahanan jenis tinggi dan homogen, diperkirakan sebagai respon terhadap batuan vulkanik yang lebih segar dan masif (Anonim, 2013a).



Gambar 6. Sebaran tahanan jenis semu invarian.

Model tahananjenis

Sebaran tahanan jenis yang dicuplik pada beberapa variasi kedalaman (Gambar 7) memperlihatkan liniasi kontur yang cenderung berarah barat-laut-tenggara. Liniasi ini mengindikasikan adanya struktur sesar geologi dengan arah yang sama dengan hasil survei geologi (Anonim, 2013a). Tahanan jenis rendah bernilai di bawah 10 Ohm-m muncul di area-area sekitar lokasi munculnya manifestasi panas bumi.

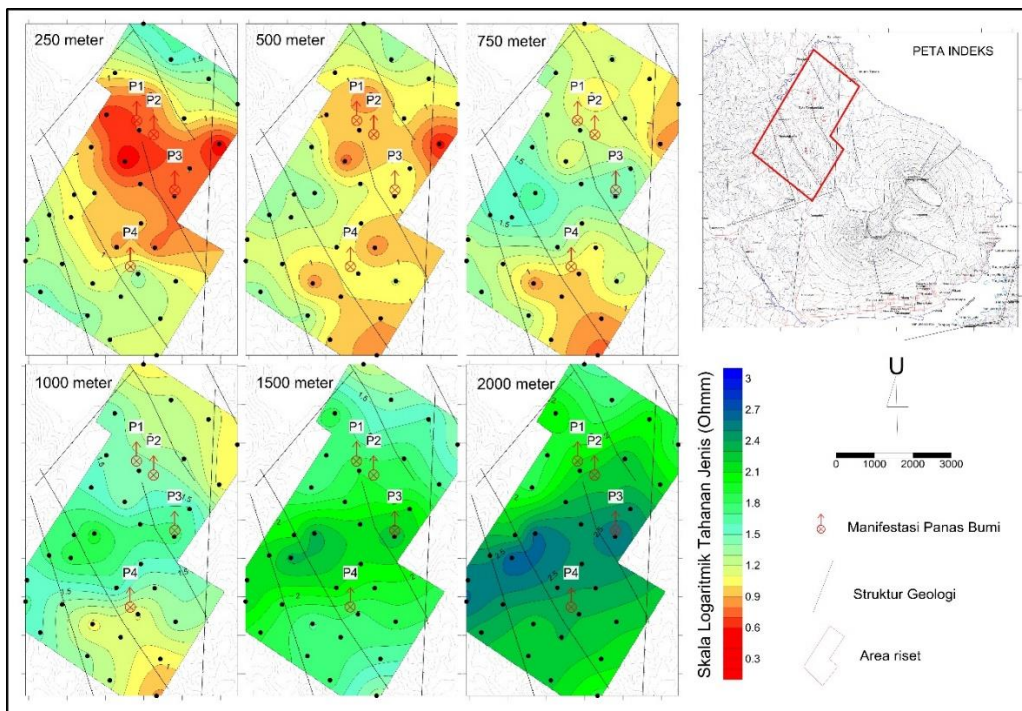
Lapisan batuan bertahanan jenis rendah tersebut diperkirakan respon dari batuan yang teralterasi akibat fluida hidrotermal dan berperan sebagai lapisan penudung (*caprock*). Lapisan batuan teralterasi ini terdeteksi sampai kedalaman sekitar 500 meter hingga 750 meter (Gambar 8).

Lapisan reservoir diduga berada di lapisan batuan bertahanan jenis > 100 Ohm-m yang termodelkan di bawah lapisan bertahanan jenis rendah. Jika dikorelasikan dengan informasi geologi, maka diduga lapisan tersebut tersusun dari batuan vulkanik tua yang lulus air dan sangat mungkin untuk menjadi lapisan reservoir dari sistem panas bumi (Anonim, 2013a).

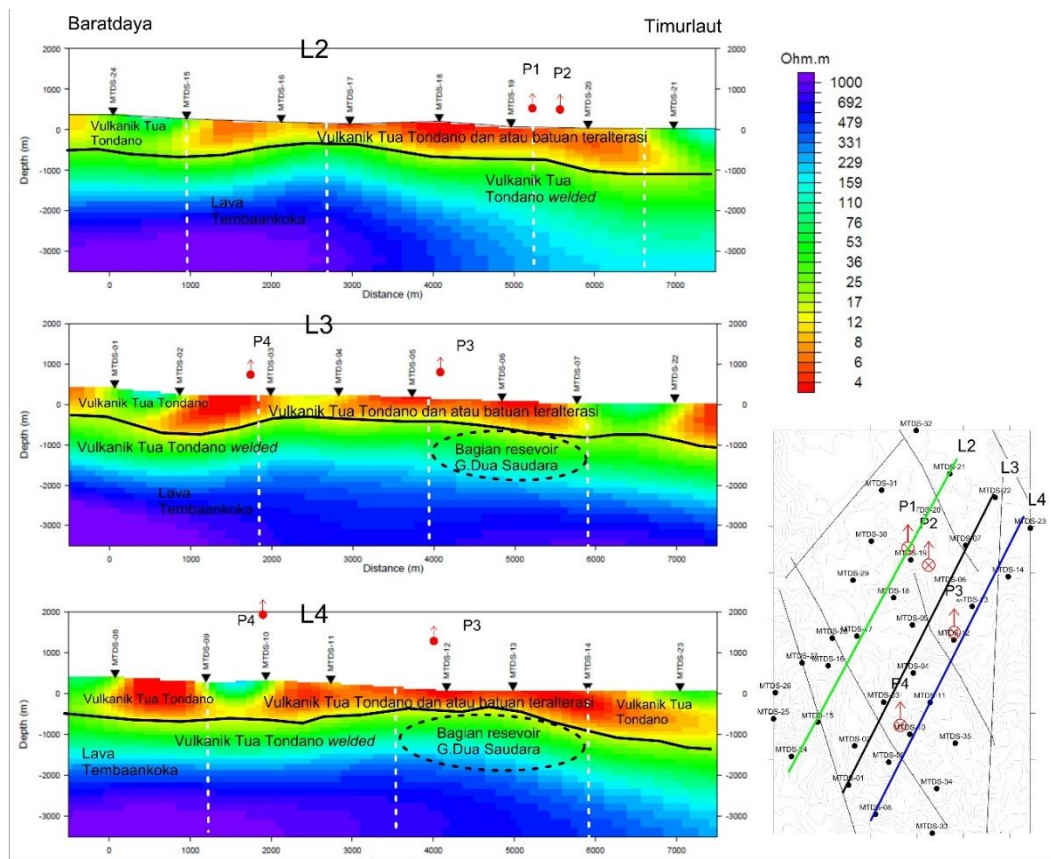
Sedangkan tahanan jenis rendah yang berperan sebagai *caprock* diduga berasosiasi dengan batuan vulkanik tua Tondano berupa batuan piroklastik dan atau batuan-batuan yang lebih muda (vulkanik Dua Saudara dan Tembaankoka) yang teralterasi hidrotermal (Anonim, 2013a).

Zona pengukuran MT diperkirakan berada di zona *outflow* (Anonim, 2013b). Jika area ini diasumsikan zona *outflow*, maka besar kemungkinan reservoir yang termodelkan merupakan ujung lidah dari zona reservoirnya. Zona reservoir ini mulai terdeteksi pada sekitar kedalaman 750 meter hingga 1000 meter dan dibatasi oleh sesar geologi berarah barat-laut-tenggara.

Lapisan bertahanan jenis lebih rendah dari 10 Ohm-m diduga merupakan batuan teralterasi yang berperan sebagai lapisan penudung. Ketebalan lapisan ini berkisar antara 500 meter hingga 750 meter. Lapisan batuan bertahanan jenis sekitar 30-150 Ohm-m diperkirakan sebagai bagian dari reservoir utama. Puncak reservoir di lereng barat ini diperkirakan berada pada kedalaman 750 meter hingga 1000 meter.



Gambar 7. Kompilasi sebaran model tahanan jenis



Gambar 8. Kompilasi penampang model tahanan jenis

KESIMPULAN

Hasil analisis data observasi MT dan pemodelan 2D inversi memperkuat deliniasi area prospek panas bumi, bahwa daerah penelitian atau lereng barat Gunung Dua Saudara dan Gunung Tangkoko merupakan zona *outflow* sistem panas bumi Dua Saudara. Lapisan *impermeable* di zona *outflow* ini diduga mempunyai ketebalan hingga 750 meter dari permukaan. Sedangkan zona kedalaman puncak reservoir diduga berkisar pada kedalaman 750 meter hingga 1000 meter. Daerah *upflow* diduga ke arah tenggara menuju Gunung Dua Saudara dan Gunung Tangkoko yang merupakan wilayah konservasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih penulis ditujukan kepada seluruh kawan-kawan di Bidang Panas Bumi, Pusat Sumber Daya Mineral, Batubara dan Panas Bumi, terutama Tim

Survei 3G Gunung Dua Saudara atas diskusinya.

DAFTAR PUSTAKA

Anonim, 2013a, 'Laporan Survei Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panas Bumi Dua Saudara, Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara.' Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia. (*Unpubl. Report*).

Anonim, 2013b, 'Laporan Survei Geofisika Terpadu Daerah Panas Bumi Dua Saudara, Kota Bitung, Provinsi Sulawesi Utara.' Pusat Sumber Daya Geologi, Badan Geologi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Indonesia. (*Unpubl. Report*).

Cagniard, L.,1953. *Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting*. Geophysics 18: 605–645.

- Cumming, & Mackie, R., 2010. *Resistivity Imaging of Geothermal Resources Using 1D, 2D and 3D MT Inversion and TDEM Static Shift Correction Illustrated by a Glass Mountain Case History*, Proceeding World Geothermal Congress, 2010.
- Daud Y., 2010, *Diklat kuliah: Metode Magnetotelluric (MT)*, Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia.
- Jones, A. G., A. D. Chave, G. Egbert, D. Auld, and K. Bahr, 1989: A comparison of techniques for magnetotelluric response function estimation. *J. Geophys. Res.*, 94, 14201-14213, doi:10.1029/jb094ib10p14201.
- Qahhar A, Daud Y, Pratama S, Zarkasyi A, Sugiyanto A, Suhanto E, 2015, *Modeling of Geothermal Reservoir in Lawu field Using 2-D Inversion of Magnetotelluric Data*, Proceedings Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition
- Siripunvaraporn, W., G. Egbert, Y. Lenbury, and M. Uyeshima, 2005a: *Three-dimensional magnetotelluric inversion: Data-space method*. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 3D Resistivity Structure in the Chingshui Geothermal Area 281 150, 3-14, doi: 10.1016/j.pepi.2004.08.023.
- Siripunvaraporn W., 2012. *Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: An Introductory Guide for Developers and Users*. *SurvGeophys* 33:5-27.
- Zhdanov, M.S., 2002. *Geophysical Inverse Theory and Regularization Problems*. Amsterdam: Elsevier.
- Zhdanov, M.S., 2009. *Geophysical Electromagnetic Theory and Methods*. Amsterdam: Elsevier.

Diterima	: 19 Juni 2018
Direvisi	: 21 Juli 2018
Disetujui	: 31 Agustus 2018