

PEMODELAN INVERSI 2D MENGGUNAKAN DATA MAGNETOTELLURIK LAPANGAN PANAS BUMI ALUTO-LANGANO ETHIOPIA

Eva Isti Gosefani*, Sintia Windhi Niasari

Universitas Gadjah Mada

*Corresponding author: evagosefani16@gmail.com

ABSTRAK

Main Ethiopian Rift (MER) merupakan bagian dari zona rifting aktif East Africa Rift System (EARS). Keberadaan zona pemekaran ini menjadikan area EARS memiliki potensi panas bumi. Salah satu lapangan panas bumi yang telah dikembangkan dan menghasilkan listrik di area MER adalah lapangan panas bumi Aluto-Langano di Ethiopia. Lapangan ini berada di Aluto Volcanic Complex (AVC). Tujuan penelitian yang dilakukan adalah mengetahui distribusi nilai resistivitas bawah permukaan AVC menggunakan model hasil inversi 2D data magnetotellurik. Total 39 titik stasiun pengukuran data magnetotellurik yang digunakan berasal dari Magneto-telluric Array milik Incorporated Research for Seismology (IRIS). Dua lintasan dengan orientasi barat-timur dan satu lintasan utara-selatan dibuat memotong AVC. Proses inversi pada ketiga lintasan tersebut menggunakan model awal homogen half space 100 Ωm . Lintasan L1 dan L2 berarah barat-timur menghasilkan model resistivitas dengan RMS error secara berturut-turut 2,2% dan 1,5%. Model yang dihasilkan Lintasan L3 dengan arah utara-selatan memiliki RMS error 1,6%. Dua zona resistif dan satu zona konduktif teridentifikasi pada model setiap lintasan. Zona resistif ($> 64 \Omega\text{m}$) dangkal diidentifikasi sebagai zona yang tidak terlaterasi. Di bawahnya terdapat zona konduktif sebagai clay cap dengan resistivitas $< 8 \Omega\text{m}$. Zona dengan resistivitas diantara 16 Ωm sampai 64 Ωm yang berada di bawah clay cap diinterpretasikan sebagai Reservoir panas bumi. Dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pemodelan inversi 2D data magnetotellurik dapat digunakan untuk memetakan sistem panas bumi Aluto-Langano.

Kata Kunci: magnetotellurik, inversi 2D, Aluto-Langano, EAR, CMER

PENDAHULUAN

Wilayah Afrika bagian timur memiliki potensi energi panas bumi. Salah satu negara dengan potensi energi panas bumi tersebut yaitu Ethiopia. Lebih dari 60 prospek panas bumi berada di *Main Ethiopian Rift* (MER) yang merupakan bagian dari *East Africa Rift* (EAR). Beberapa diantara prospek tersebut yang telah diesplorasi adalah Aluto-Langano, Tendaho, Corbetti, Abaya, Tulumoye-Gedesema, Dofan dan Fantale (Sisay, 2016). Lapangan panas bumi Aluto-Langano merupakan satu-satunya lapangan yang menghasilkan energi listrik di Ethiopia. Lapangan ini berada diantara Danau Ziway di utara dan Danau Langano di selatan dan berjarak 200 km dari selatan kota Adis Ababa, Ethiopia. Lapangan ini berada pada *Aluto Volcanic Complex* (AVC) pada tepi timur MER.

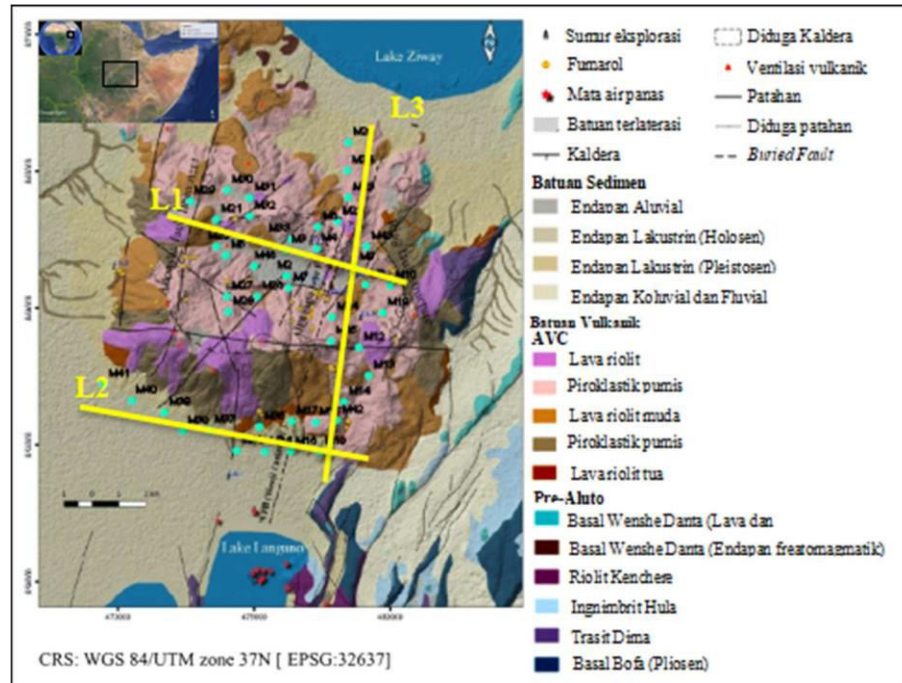
Metode magnetotellurik merupakan metode untuk menjelaskan sistem panas bumi suatu area. Metode ini memanfaatkan gelombang elektromagnetik sebagai sumber untuk mengetahui distribusi resistivitas bawah permukaan sehingga kondisi geologi bawah dapat diketahui. Pada daerah panas bumi, komponen *clay cap* akan menunjukkan resistivitas rendah. Sedangkan *Reservoir* sistem panas bumi menunjukkan resistivitas tinggi. Sumber panas (*heat source*) umumnya menunjukkan resistivitas rendah pada kedalaman dalam. Penelitian ini menggunakan data magnetotellurik yang diinversi 2D untuk mendapatkan distribusi resistivitasnya. Kondisi bawah permukaan dapat diketahui dari interpretasi model berdasarkan keberadaan zona konduktif dan zona resistif pada lapangan panas bumi Aluto-Langano.

TINJAUAN PUSTAKA

EAR merupakan zona pemekaran aktif yang terletak di Afrika Timur. Tatanan tektonik di Ethiopia dikontrol oleh keberadaan MER yang termasuk bagian dari EAR. Lapangan panas bumi Aluto-Langano berada di AVC. Secara geologi, batuan AVC terdiri dari batuan sedimen dan batuan vulkanik Gambar 1. *Wonji Fault Belt* (WFB) merupakan patahan berarah NNE-SSW yang terbentuk dari deformasi tektonik di MER (Hutchison *et al.*, 2016). Patahan ini berperan dalam migrasi fluida panas bumi menuju ke permukaan.

Keberadaan sistem panas bumi AVC ditunjukkan oleh manifestasi mata air panas, fumarol, ventilasi vulkanik, dan batuan teralterasi Gambar 1. Metode geofisika seperti metode gravitasi (Mulugeta *et al.*, 2021) dapat mengidentifikasi keberadaan *Reservoir* panas bumi lapangan ini. Metode magnetotellurik juga digunakan dalam memetakan sistem panas bumi lapangan ini melalui sebaran resistivitas bawah permukaan (Giri, 2017; Samrock *et al.*, 2020; Cherkose *et al.*, 2018). Dari metode ini, dapat dikonfirmasi jika lapangan panas bumi Aluto-Langano memiliki entalpi tinggi yang mampu menghasilkan *smectite clay cap* (Giri, 2017; Samrock *et al.*, 2020; Cherkose *et al.*, 2018).

METODE



Gambar 1. Sebaran Stasiun MT dan lintasan pengukuran (peta geologi oleh Hutchison *et al.*, 2015 dalam Mulugeta *et al.*, 2016)

Data magnetotellurik yang digunakan merupakan data sekunder milik *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)* yang telah diubah dari domain waktu ke domain frekuensi. Penelitian ini menggunakan 39 dari 46 titik stasiun pengukuran magnetotellurik yang diakuisisi pada bulan Januari hingga Februari 2012. Satu lintasan dengan orientasi utara-selatan dan dua lintasan dengan orientasi barat-timur dibuat memotong AVC.

Data yang telah dipilih lalu diolah menggunakan software WinGlink. Tahapan pengolahan terdapat pada Gambar 2. Data yang digunakan pada penelitian ini berbentuk *Electrical Data Interchange (EDI) files* yang terdiri dari data resistivitas semu, data fase, dan data impedansi. *Masking data* merupakan proses menonaktifkan titik-titik data yang tidak mengikuti *trend*. Proses ini juga dinamakan dengan *smoothing data*.

Data yang sudah di-*masking* lalu dibuat *initial model*-nya. *Initial model* atau model awal adalah model yang mewakili jumlah blok *mesh* pada model akhir. Setiap blok *mesh* nantinya menampilkan satu nilai resistivitas bawah permukaan.

Nilai resistivitas tersebut dihitung dengan model awal diasumsikan sebagai *homogen half space* dengan resistivitas $100 \Omega\text{m}$.

Pembuatan *initial model* melibatkan penentuan parameter yang digunakan dalam proses inversi. Parameter tersebut terdiri dari *error floor*, *weight function*, jumlah iterasi, dan Tau. Parameter *error floor* digunakan untuk mengatasi *noise* yang muncul saat proses inversi berlangsung (Prasetyo, 2020). Parameter *weight function* mengatur tingkat kekasaran model yang dihasilkan. Nilai Tau merupakan parameter yang mengatur hubungan antara RMS error (Φ_e) dengan kekasaran model (Φ_m). Algoritma yang digunakan pada pemodelan inversi 2D ini adalah algoritma *Non Linear Conjugate Gradient* (NLCG).

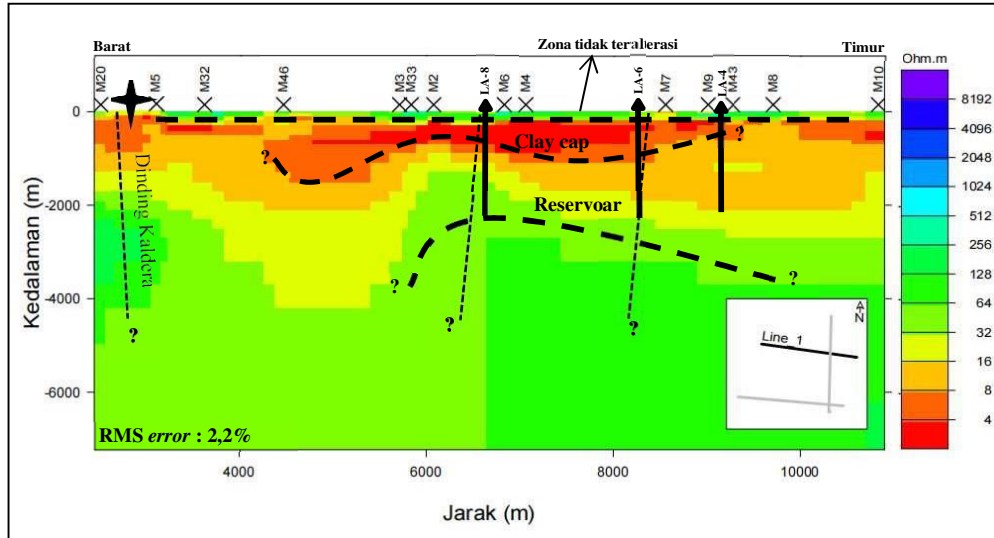


Gambar 2. Diagram alir pengolahan data magnetotellurik

Berdasarkan gambar 2 pemodelan inversi 2D menggunakan gabungan data magnetotellurik TE dan TM yang terdiri dari komponen resistivitas semu (ρ_{app}) dan komponen fase (Φ). Data TE dan TM merupakan total medan elektromagnetik (Niasari, 2015). Data TE dan TM digabung dalam proses inversi untuk mendapatkan model anomali resistif dan konduktif (Berdcihevsky & Dimitriev, 2008). Dimana data TM sensitif terhadap fitur resistif dan data TE lebih sensitif

terhadap fitur konduktif (Wannamaker *et al.*, 1984 dalam Berdchevsky & Dimitriev, 2008).

HASIL DAN PEMBAHASAN

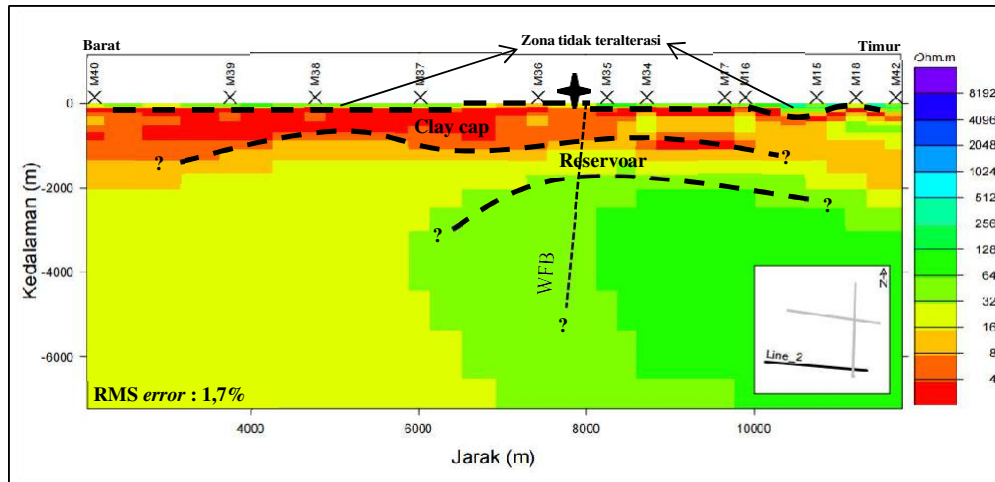


Gambar 3. Model resistivitas 2D hasil inversi data magnetotellurik pada lintasan L1 data terotasi 12° mengikuti WFB dengan RMS error 2,2%. Bintang menunjukkan fumarol. Segitiga hitam menunjukkan sumur geotermal.

Pemodelan inversi 2D pada data magnetotellurik memerlukan rotasi data magnetotellurik terhadap arah *strike* geologi dominan. *Wonji Fault Belt* (WFB) merupakan struktur yang terbentuk akibat pengembangan *Central Main Ethiopian Rift* (CMER) (Hutchison *et al.*, 2016). Zona patahan utama (Bobessa-Gegiba, Artu Jawe-Oitu Artu, dan Worbota-Adonsha) yang berada di area penelitian mengikuti trend dari WFB (Abebe *et al.*, 2016). Data magnetotellurik pada ketiga lintasan dirotasi sejauh 12° mengikuti WFB (Hutchison *et al.*, 2015; Nowacki *et al.*, 2018) yang menjadi arah *strike* geologi dominan. Model resistivitas hasil inversi 2D pada ketiga lintasan ditunjukkan pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

Model resistivitas hasil inversi 2D pada Lintasan L1 Gambar 3. memiliki RMS error 2,2% dan kekasaran model 1301. Dari model tersebut, dapat diidentifikasi jika pada lintasan L1 terdapat zona konduktif diantara zona resistif dangkal dan zona resistif dalam. Zona resistif yang terletak di permukaan memiliki ketebalan kurang dari 300 m dan resistivitas lebih dari $64 \Omega\text{m}$. Di bawah zona ini,

terdapat zona konduktif dengan resistivitas di bawah $8 \Omega\text{m}$ mencapai kedalaman 1500 m. Zona konduktif pada bagian barat dan timur memiliki ketebalan yang tipis jika dibandingkan dengan zona konduktif pada bagian tengah Lintasan L1. Zona resistif dalam pada Lintasan L1 ditunjukkan dengan meningkatnya resistivitas terhadap kedalaman Gambar 3. Di bawah sumur LA-8, resistivitas di atas $16 \Omega\text{m}$ terdapat pada kedalaman 2000 m.

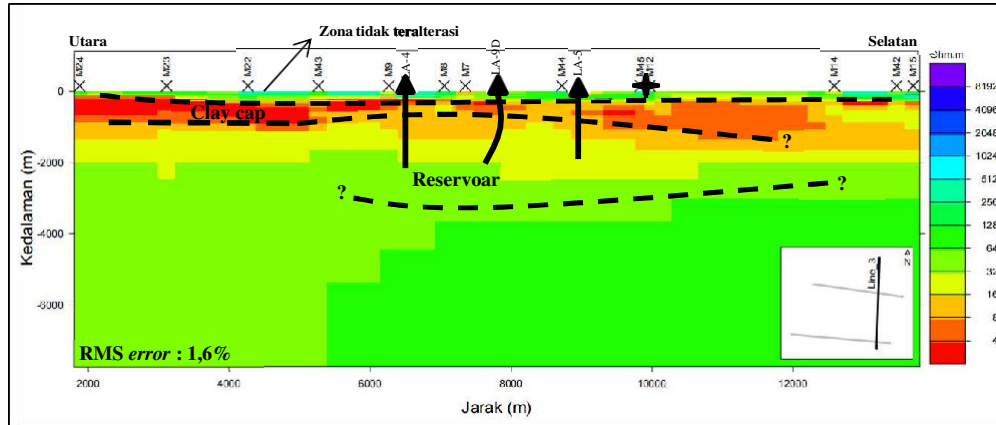


Gambar 4. Model resistivitas 2D hasil inversi data magnetotellurik pada lintasan L2 data terotasi 12° mengikuti WFB dengan RMS error 1,7%. Bintang menunjukkan fumarol.

Model resistivitas hasil inversi 2D pada Lintasan L2 ditunjukkan pada Gambar 4 dengan RMS error 1,7%. dan kekasaran model 676. Bagian barat lintasan didominasi oleh anomali resistivitas rendah hingga kedalaman yang dalam. Sedangkan pada bagian tengah hingga timur lintasan terdapat zona resistif dalam dengan resistivitas lebih dari $16 \Omega\text{m}$. Di atas zona ini, terdapat zona konduktif dengan ketebalan relatif sama yang memiliki resistivitas kurang dari $8 \Omega\text{m}$. Pada permukaan, terdapat lapisan tipis resistif dengan resistivitas lebih dari $64 \Omega\text{m}$.

Hasil inversi 2D pada Lintasan L3 menghasilkan model resistivitas pada Gambar 5. Model ini memiliki RMS error 1,6% dengan kekasaran model sebesar 823. Proses inversi konvergen pada model ini berhenti pada iterasi ke 330. Zona konduktif pada lintasan L3 terkonsentrasi di bagian utara lintasan mencapai kedalaman 1500 m dan menipis di bagian tengah lintasan dimana sumur geotermal berada. Seperti dua lintasan sebelumnya, zona konduktif memiliki resistivitas kurang dari $8 \Omega\text{m}$ dan terletak diantara dua zona resistif. Zona resistif dangkal

terletak di permukaan dengan resistivitas lebih dari $64 \Omega\text{m}$. Sedangkan zona resistif dalam terletak pada kedalaman di bawah 2000 m dengan resistivitas lebih dari $16 \Omega\text{m}$.



Gambar 5. Model resistivitas 2D hasil inversi data magnetotellurik pada lintasan L3 data terotasi 12° mengikuti WFB dengan RMS error 1,6%. Bintang menunjukkan fumarol. Segitiga hitam merupakan sumur geotermal.

Tiga komponen pada sistem panas bumi pada lapangan panas bumi Aluto-Langano diidentifikasi pada ketiga lintasan Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5. Zona resistif dangkal dengan resistivitas lebih dari $64 \Omega\text{m}$ diidentifikasi sebagai zona tidak teralterasi (Cherkose *et al.*, 2018). Zona dapat dikorelasikan dengan batuan vulkanik pumis dan riolit yang belum mengalami alterasi mineral (Hadush, 2018).

Di bawah zona tidak teralterasi, terdapat zona konduktif dengan resistivitas kurang dari $8 \Omega\text{m}$ mencapai kedalaman 2000 m. Zona konduktif ini diidentifikasi sebagai *clay cap*. Keberadaan *clay cap* menandakan bahwa pada kedalaman tersebut terjadi alterasi argilik hidrotermal (Samrock *et al.*, 2015; Cherkose *et al.*, 2018; Cherkose and Mizunaga, 2018; Samrock *et al.*, 2020) yang menghasilkan mineral *smectite* dan *zeolites* (Nega, 2020). *Clay cap* yang diidentifikasi berkaitan dengan penutup *Reservoir* panas bumi (Kebede, 2021).

Pada Lintasan L2 memiliki pola sebaran resistivitas yang berbeda jika dibandingkan dengan Lintasan L1 dan Lintasan L3. Bagian barat Lintasan L2 cenderung lebih konduktif daripada bagian timurnya. Fitur konduktif di bawah *clay cap* pada Lintasan L2 Gambar 5.9. pada kedalaman di bawah 2000 m kemungkinan

berkaitan dengan litologi endapan lakustrin. Sedangkan pada bagian timur lintasan, resistivitas tinggi berkaitan dengan patahan Gambar 4.

Zona resistif dalam pada ketiga lintasan memiliki resistivitas 16 Ωm hingga 64 Ωm . Zona ini diidentifikasi sebagai *Reservoir* sistem panas bumi Aluto. Pada ketiga lintasan, *Reservoir* terdapat pada kedalaman di bawah 2000 m. Keberadaan *Reservoir* dengan resistivitas tinggi di bawah *clay cap* berkaitan dengan mineral *illite/chlorite/epidote* yang terbentuk melalui alterasi temperatur tinggi (Cherkose *et al.*, 2018; Nega, 2020). *Reservoir* panas bumi ini memiliki densitas sekitar 2,55 gr/cm^3 (Mulugeta *et al.*, 2021). *Reservoir* panas bumi diasosiasikan dengan keberadaan batuan basal dan ignimbrit yang mengalami alterasi temperatur tinggi (Hadush, 2018).

Sistem panas bumi memiliki zona *upflow* dan zona *outflow*. Zona *upflow* merupakan zona potensi panas bumi dengan gradient temperatur lebih besar dari zona *outflow* (Syabi *et al.*, 2019). Pada zona ini, fluida geotermal naik ke permukaan menjauhi sumber panas. Sedangkan zona *outflow* merupakan zona dimana *lateral flow* fluida geotermal terjadi (Syabi *et al.*, 2019).

Sumur LA-6 dan LA-9D pada Gambar 3. dan Gambar 5. merupakan sumur produktif yang dibor pada WFB. Sumur ini diperkirakan berada pada zona *upflow* dan merupakan bagian terpanas dari lapangan panas bumi Aluto-Langano. Zona *upflow* ditandai dengan menipisnya *clay cap* (Samrock *et al.*, 2023). Temperatur pada kedua sumur ini mencapai 300° C (Sisay, 2016; Cherkose & Mizunaga, 2018; Samrock *et al.*, 2020). Alterasi temperatur tinggi pada zona ini menghasilkan mineral *chlorite* dan *epidote* yang mencirikan alterasi propilitik (Cherkose & Mizunaga, 2018; Hadush, 2018). Berbeda dari sumur LA-6, sumur LA-5 justru merupakan sumur yang tidak produktif Gambar 5. Sumur ini berada pada zona *outflow* (Samrock *et al.*, 2020). Zona *outflow* ditandai dengan keberadaan *clay cap* yang tebal (Samrock *et al.*, 2023).

Patahan (garis hitam tipis putus-putus) dan fumarol (bintang) pada ketiga model Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 adalah fitur yang saling berkaitan. Patahan *Artu Jawe Fault Zone* (AJFZ) dan patahan WFB merupakan patahan yang berperan dalam migrasi fluida panas bumi ke permukaan dan muncul sebagai manifestasi fumarol. Keberadaan fumarol pada suatu area tertentu menandakan jika

pada area tersebut terdapat sistem panas bumi. Namun patahan yang berfungsi sebagai pembatas *Reservoir* panas bumi tidak ditemukan pada ketiga model ini. Selain itu, sumber panas pada sistem panas bumi juga tidak ditemukan pada ketiga model karena keterbatasan inversi 2D.

Komponen panas bumi pada Lapangan panas bumi Aluto-Langano berhasil diidentifikasi menggunakan metode magnetotellurik yaitu batuan vulkanik yang belum mengalami alterasi pada permukaan, *clay cap* sebagai batuan penutup yang bersifat impermeabel, dan batuan *Reservoir* yang menyimpan fluida geothermal dengan porositas dan permeabilitas yang baik (Giri, 2017). Alterasi termal yang terjadi pada batuan vulkanik Aluto disebabkan oleh *paleo-thermal outflow* (Hutchison *et al.*, 2016).

SIMPULAN

Dari pemodelan inversi 2D data magnetotellurik lapangan panas bumi Aluto-Langano di Ethiopia, dapat disimpulkan bahwa terdapat tiga zona yang dapat ditentukan berdasarkan nilai resistivitasnya, yaitu:

- a. Zona resistif dangkal ($\rho > 64 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai batuan vulkanik yang belum mengalami alterasi.
- b. Zona konduktif dangkal ($\rho < 8 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai *clay cap* dengan mineral *smectite* pada kedalaman hingga 2000 m.
- c. Zona resistif dalam ($16 < \rho < 64 \Omega\text{m}$) diidentifikasi sebagai *Reservoir* panas bumi pada kedalaman di bawah 2 km..

DAFTAR PUSTAKA

- Abebe, T., Pasqua, C., Kabede, S., (2016), Aluto-Langano Geothermal Field (Ethiopia), Proposal of a New Geo-volcanological Model by Combining the Existing Data with Modern Studies, 6th African Rift Geothermal, Addis Ababa, 2-4 November 2016.
- Berdichevsky, M. N., & Dmitriev, V. I., (2008), *Models and Methods of Magnetotelluric*, Verlag, Berlin, Heidelberg: Springer.
- Cherkose, B. A, and Mizunaga, H., (2018), Resistivity Imaging of Aluto-Langano geothermal field using 3-D magnetotelluric inversion, *Journal of African Earth Sciences*, 139, 307-318.

- Cherkose, B. A., Mizunaga, H., ND Samrock, F., (2018), Imaging Resistivity Structures of High-Enthalpy Geothermal Systems Using Magnetotelluric Method: A case study of Aluto-Langano geothermal field Ethiopia. 7th African Rift Geothermal Conference, Kigali, 31 Oktober-2 November 2018.
- Giri, A. L., (2017), Inversi Satu Dimensi Menggunakan Data Magnetotellurik di Lapangan Panas Bumi Aluto-Langano, Ethiopia, *Skripsi*, Universitas Gadjah Mada.
- Hadush, W., (2018), Magnetotelluric Methods in Geothermal Exploration at Aluto-Langano, Ethiopia. 7th African Rift Geothermal Conference, Kigali, Rwanda, 31 Oktober -2 November 2018.
- Hochstein, M. P., Oluma, B., and Hole, H., (2016), Early exploration of the Aluto geothermal field, Ethiopia (History of discovery well LA-3), *Geothermics*, 66, 73-84.
- Hutchison, W., Mather, A. T., Pyle, D. M., Biggs, J., and Yirgu, G., (2015), Structural controls on fluid pathways in an active rift system: A case study of the Aluto volcanic complex, *Geosphere*, 3, 11, 542–562.
- Hutchison, W., Pyle, D. M, Mather, Yirgu, G., A. T., Biggs, J., Cohen, B. E., Barford, D. N., and Lewi, W., (2016), The eruptive history and magmatic evolution of Aluto volcano: new insights into silicic peralkaline volcanism in the Ethiopian rift, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 328, 9-33.
- Kebede, S., (2021), Status of Geothermal Exploration and Development in Ethiopia. *SDG Short Course V on Exploration and Development of Geothermal Resources, organized by GRO GTP, KenGen and GDC*, Lake Bogoria and Lake Naivasha, Kenya, 14 November - 4 Desember 2021.
- Mulugeta, B. D., Fujimitsu, Y., Nishijima, J., and Saibi, H., (2021), Interpretation of gravity data to delineate the subsurface structures and reservoir geometry of the Aluto–Langano geothermal field, Ethiopia, *Geothermics*, 94, 1-17.
- Nega, W. H., (2020), Characterization of the resistivity structure, cap rock and the geothermal reservoir of Aluto Langano geothermal field in Ethiopia through 1-D, 2-D and 3-D Inversion of Magnetotelluric (MT) Data, *8th African Rift Geothermal Conference*, Nairobi, 2 – 8 November 2020.
- Niasari, S. W., (2015), Magnetotelluric Investigation of The Sipoholon Geothermal Field Indonesia, *Disertasi*, Freie Universitat Berlin.
- Nowacki, A., Wilks, M., Kendall, J. M., Biggs, J., and Ayele., A., (2018), Characterising hydrothermal fluid pathways beneath Aluto volcano, Main Ethiopian Rift, using shear wave splitting. *Journal of Volcanology and Geothermal*, 356, 331-341.

- Prasetyo, S. B., 2020, Pemodelan Inversi 2-D Metode Magnetotellurik Studi Kasus: Gunung St. Helens dan Gunung Adams, Amerika Serikat, *Skripsi*, Universitas Gadjah Mada.
- Samrock, F., Grayver, A. V., Cherkose, B., Kuvshinov, A., and Saar, M. O., (2021), Aluto-Langano Geothermal Field, Ethiopia: Complete Image Of Underlying Magmatic-Hydrothermal System Revealed By Revised Interpretation Of Magnetotelluric Data. *World Geothermal Congress 2020+1*, Reykjavik, Iceland, April - Oktober 2021.
- Samrock, F., Kuvshinov, A., Bakker, J., Jackson, A., and Fisseha, S., (2015), 3-D analysis and interpretation of magnetotelluric data from the Aluto-Langano geothermal field, Ethiopia, *Geophysical Journal International*, 202, 1923-1948.
- Samrock, F., Grayver, A. V., Dambly, M. L. T., Müller, M. R., and Saar, M. O., (2023), Geophysically guided well sitting at the Aluto-Langano geothermal reservoir, *Geophysics*.
- Sisay, S. W., (2016), Sub-surface Geology, Hydrothermal Alteration and 3D Modelling of Wells LA-9D and LA-10D in the Aluto Langano Geothermal Field, Ethiopia, *Tesis*, Geothermal Training Programme, United Nations University, Reykjavik, Iceland.
- Syabi, H. F., Haryanto, A. D., and CSSA Yoseph, B., (2019), Deliniasi Zona Upflow/Outflow Panas Bumi Daerah Cibeber, Banten Menggunakan Analisis Densitas Kelurusan dan Geoindikator, *Padjajaran Geoscience Journal*, 1, 3, 51-57.