

PEMETAAN RESISTIVITAS BAWAH PERMUKAAN MENGGUNAKAN INVERSI 1 DAN 2 DIMENSI DATA MAGNETOTELLURIK DI SEKITAR PATAHAN PARALANA, AUSTRALIA

Fellycia A. Santoso*, Sintia W. Niasari

Departemen Fisika, Universitas Gadjah Mada

*Corresponding author: fellyciaaudry4@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Sistem patahan Paralana merupakan patahan yang memisahkan Gawler Craton dan Curnamona Province. Geologi daerah ini tersusun atas struktur geosinklin dan sistem patahan, i.e. reverse strike-slip yang dikontrol oleh tekanan kompresional berarah barat – timur. Batuan litologi terdiri atas batuan dasar kristalin granit yang di atasnya terendapkan metasedimen mengandung unsur radiogenik. Manifestasi berupa mata air panas, ditemukan di sekitar patahan Paralana yang mengindikasikan terdapat aliran fluida dan reservoir di bawah permukaan. Penelitian ini menggunakan data magnetotellurik (MT). Tensor fase impedansi dianalisis untuk menentukan dimensionalitas data. Selanjutnya, pemodelan inversi 1D dan 2D dilakukan untuk memperoleh penampang persebaran nilai resistivitas bawah permukaan. Hasil kedua model inversi menunjukkan adanya zona resistif pada area dangkal dan fitur konduktif pada area yang lebih dalam. Analisis tensor fase menunjukkan mayoritas data MT memiliki dimensionalitas 2D dan 3D yang mengindikasikan struktur kompleks pada daerah penelitian. Namun kedalaman dan nilai resistivitas bervariasi secara signifikan antara hasil inversi MT 1D dan 2D. Perbandingan hasil model inversi 1D dan 2D memberikan pemahaman terkait batasan dan kelebihan dari kedua pendekatan tersebut pada daerah penelitian ini.

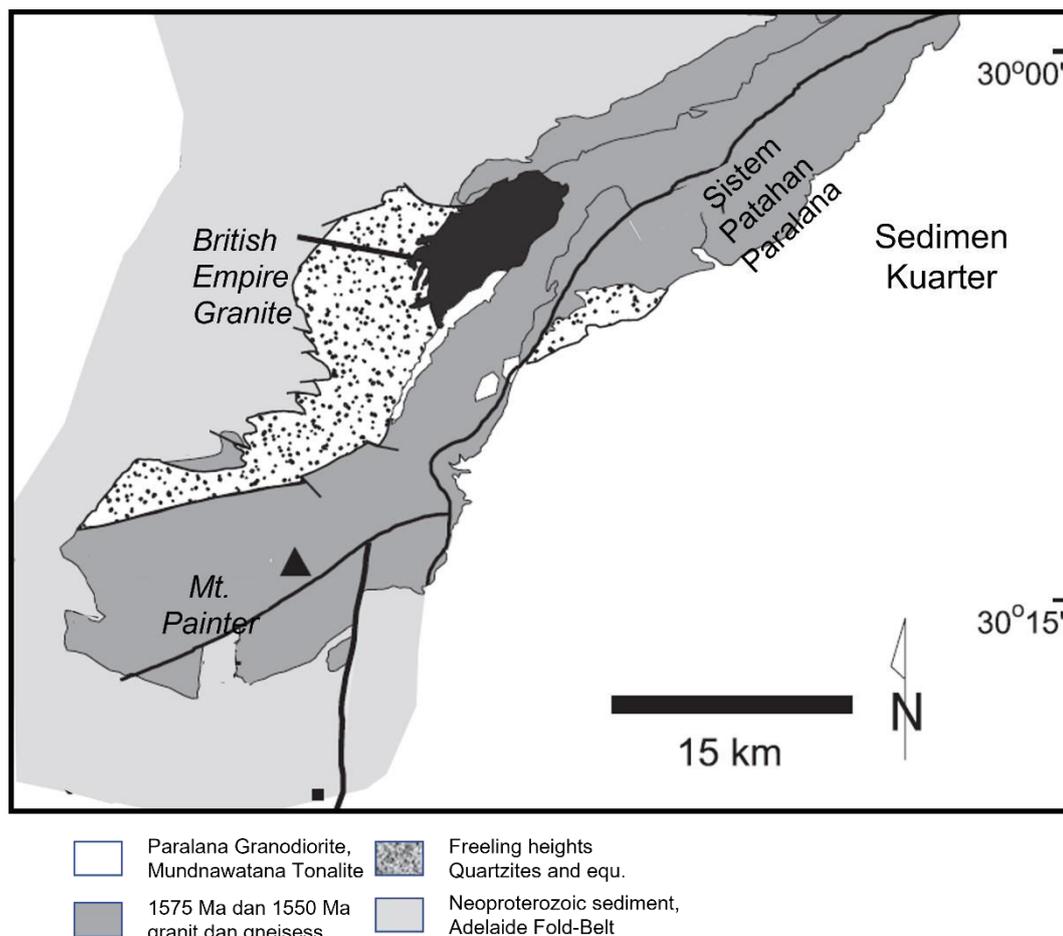
Kata Kunci : magnetotellurik, inversi, aliran fluida, radiogenic.

PENDAHULUAN

Sistem patahan Paralana berlokasi di Australia Selatan, tepatnya 600 km ke arah utara dari kota Adelaide. Area di sekitar sistem patahan memiliki potensi dalam pengembangan sistem panas bumi amagmatik, *Enhanced Geothermal System* (EGS). Sumber panas berasal dari proses peluruhan unsur radiogenik yang terkandung dalam batuan dasar kristalin granit. Sistem rekahan yang terbentuk di sekitar patahan memungkinkan terjadinya aktivitas fluida termal. Studi magnetotellurik berperan dalam memetakan persebaran nilai resistivitas yang berasosiasi dengan litologi struktur bawah permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk mencari keberadaan fitur konduktif yang disinyalir sebagai aliran fluida termal bawah permukaan.

Secara regional, daerah penelitian ini, Paralana, berada pada *South Australian Heat Flow Anomaly* (SAHFA), daerah dengan gradien termal di atas

rata-rata (Neumann, 2000). Kenaikan gradien termal diperkirakan hingga mencapai $126.10^{-3} \text{ W/m}^2$ (Brugger *et al.*, 2005). Anomali tersebut disebabkan oleh adanya kandungan radiogenik (K, Th, dan U) pada tubuh kerak (Wulser, 2009). Elemen radiogenik banyak terkandung pada batuan dasar kristalin granit yang diperkirakan berumur 1580 – 1550 Ma (Hore dan Preiss, 2020). Batuan dasar tersebut mengalami pengangkatan dan tersingkap di sepanjang *Mt. Painter Domain* Gambar 1.



Gambar 1. Peta geologi di sekitar Paralana. Patahan Paralana merupakan *strike* dominan pada area tersebut. Pengangkatan blok batuan dasar dijumpai pada sisi barat patahan. sementara, sisi timur patahan merupakan cekungan yang terisi sedimen.

Sistem patahan Paralana terbentuk pada struktur geosinklin Adelaide. Geosinklin Adelaide tersusun atas litologi batuan dasar kristalin Paleoproterozoik hingga Mesoproterozoik yang di atasnya terendapkan batuan sedimen Neoproterozoik - Kambrian Adelaide (Reid *et al.* 2010). Pembentukan cekungan sedimen disebabkan oleh proses penurunan batuan dasar sehingga terbentuk retakan

kompleks yang menyusun struktur lipatan Adelaide dan *Thrust belt* (Weisheit et al., 2013). Sebagian dari batuan dasar kristalin tersingkap pada *Mt. Painter Inlier*, *Northern Flinder Ranges* (Foster, 1994).

Sistem patahan, Paralana, berarah timur laut yang membatasi sisi timur dari *Mt. Painter Inlier* (MPI). Patahan Paralana telah aktif sejak pertengahan Proterozoik seiring dengan pembentukan Geosinklin Adelaide (Preiss, 1990). Sistem patahan Paralana diidentifikasi sebagai patahan *reverse strike-slip*, dengan *strike* berarah timur laut – barat daya dan *dip* diperkirakan sebesar 90° (Weisheit et al., 2013).

Keberadaan zona patahan Paralana diperkirakan memiliki permeabilitas yang lebih besar dibanding batuan sekitar. Fluida panas bergerak ke atas di sepanjang zona retakan dan meng-alterasi batuan sekitarnya. Aktivitas hidrotermal juga diperkirakan menghasilkan sebagian dari deposit uranium di *Paralana Hot Springs* (Foster, 1994). Penemuan *Paralana Hot Springs* menjadi bukti bahwa aktivitas hidrotermal masih berlangsung di sepanjang zona patahan paralana. Hasil analisis dari *Apatite Fission Track* menegaskan bahwa aktivitas hidrotermal telah berlangsung semenjak pertengahan Tersier dan berakhir dengan proses pengangkatan blok *Inliers* saat Miosen (Foster, 1994).

Pada penelitian ini, pemodelan inversi 1D dan 2D dilakukan dengan menggunakan data MT pada daerah di sekitar sistem patahan Paralana. Hasil pemodelan inversi memberikan informasi terkait sebaran nilai resistivitas pada daerah tersebut. Studi ini bertujuan untuk mengetahui hubungan antara sebaran nilai resistivitas dengan litologi daerah serta menganalisis kesesuaian dari hasil inversi 1D dan 2D.

METODE

Metode Magnetotellurik (MT) merupakan salah satu survey geofisika yang memanfaatkan variasi alami medan magnetik bumi dan medan listrik untuk menggambarkan struktur resistivitas bawah permukaan bumi. Metode ini berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik, dimana variasi medan magnetik bumi menginduksi arus listrik tellurik dalam material konduktif. Arus listrik

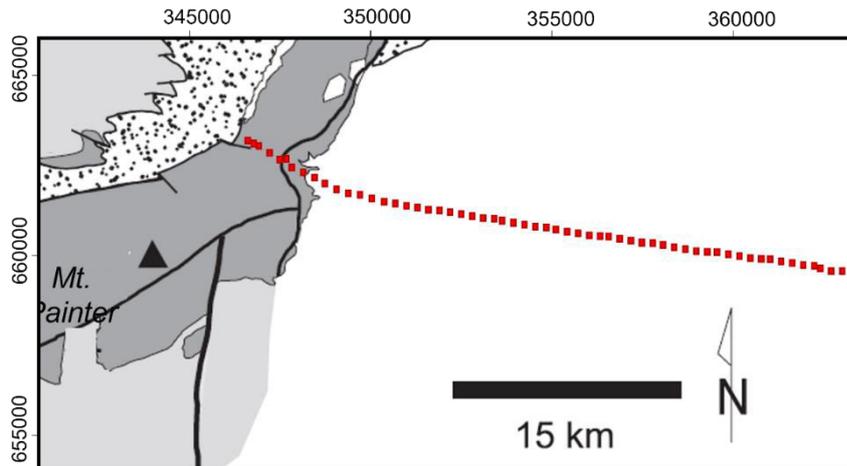
tersebut menghasilkan medan elektromagnetik sekunder, yang dapat terukur di permukaan bumi melalui survey MT.

Hasil pengukuran diperoleh dalam bentuk tensor impedansi (Z) yang tersusun atas koefisien linear yang menghubungkan komponen medan magnet (H) dengan medan listrik (E) terukur. Secara praktis, hubungan E dan H dinyatakan dalam Persamaan 1 sebagai berikut (Grandis *et al.*, 2004):

$$\underline{E} = \underline{Z} \underline{H}$$

Dimensionalitas data diperoleh melalui analisis tensor fase (Φ). Tensor fase divisualisasikan dalam bentuk ellips yang tersusun atas sumbu mayor (nilai Φ_{\max}) dan minor (Φ_{\min}). Nilai *skew-angle* (β) dari tensor fase menentukan dimensionalitas dari daerah pengukuran. Jika daerah pengukuran berupa struktur 1D, maka nilai $\beta = 0$ dengan bentuk tensor fase berupa lingkaran ($\Phi_{\max} = \Phi_{\min}$). Struktur 2D dan 3D ditunjukkan oleh tensor fase berupa elips dengan pembeda keduanya berada pada nilai β . Struktur 2D memiliki $\beta = 0$, sedangkan struktur 3D memiliki $\beta \neq 0$ (Kumar *et al.*, 2021).

Data yang digunakan pada penelitian ini merupakan data *open-source* yang dapat diakses secara bebas melalui website *IRIS: EM Transfer Function Product Query* (<http://ds.iris.edu/spud/emtf>). Data MT ini merupakan hasil akuisisi proyek Paralana yang diselenggarakan pada tahun 2012 oleh *University of Adelaide*. Data telah berhasil diunduh dalam format EDI file. Jumlah data yang digunakan berasal dari 58 titik stasiun pengukuran. Seluruh titik pengukuran terbentang dalam satu lintasan berarah barat timur yang memotong struktur patahan dan cekungan terisi sedimen kuarter Gambar 2. Spasi antar titik bervariasi mulai dari 200 hingga 500 meter. Tiap data titik stasiun berisi informasi mengenai titik pengukuran, tensor impedansi, dan data *tipper*. Rentang frekuensi pada data MT berkisar pada 10^{-4} Hz hingga 10^2 Hz.



Gambar 2. Persebaran titik data pengukuran MT pada area di sekitar Paralana. Titik stasiun berjumlah 58 data yang tersebar dalam satu lintasan membentang barat-timur. Titik stasiun memotong struktur patahan dan cekungan di sisi timur yang terisi sedimen kuarter

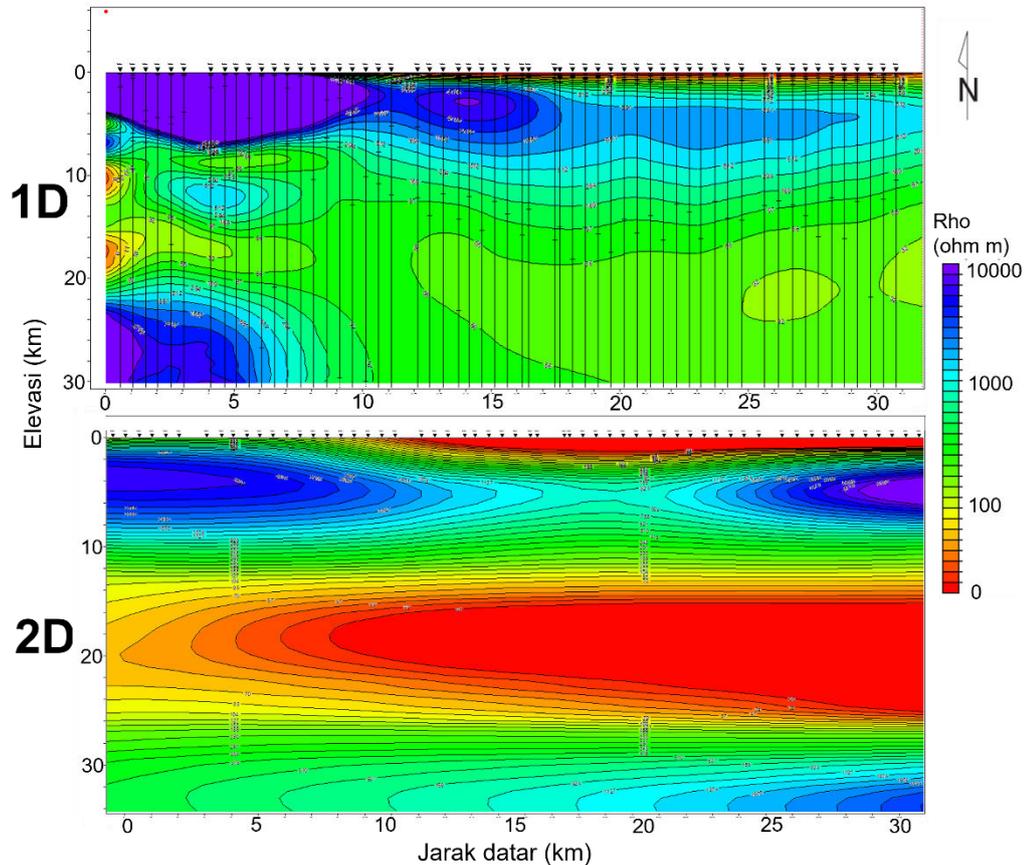
Analisis data MT pada penelitian ini menggunakan *library* MTPy oleh Krieger et al., (2013). Analisis data MT dilakukan untuk mengetahui dimensionalitas data dari daerah penelitian. Analisis dimensionalitas bertujuan untuk mengetahui jenis data MT yang digunakan dalam penelitian ini. Proses analisis menggunakan plot tensor fase sehingga dapat diketahui sebaran jenis data pada tiap rentang periode.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model 1D diperoleh melalui inversi metode Occam. Tahapan inversi dilakukan dengan menyesuaikan hasil kurva respon hingga mendekati kurva data. Invarian yang digunakan merupakan modulus TE. Proses *gridding* diterapkan pada hasil inversi 1D tiap titik untuk memperoleh penampang resistivitas. Kedalaman model hanya dibatasi hingga 30 km.

Pemodelan inversi 2D diterapkan pada kedua modulus, yaitu TE dan TM pada rentang periode 10^{-2} hingga 10^3 . Nilai parameter inversi (*error floor* dan *data error*) yang digunakan adalah 10% dan 5% dengan nilai tau optimum adalah 1. Hasil pemodelan memberikan nilai *root-mean square* (RMS) sebesar 0,93 dan tingkat kekasaran model sebesar 1560. Nilai RMS tertinggi terletak pada titik PA101, yaitu 1,59 dan RMS terendah pada titik PA159, yaitu 0,52. Nilai RMS

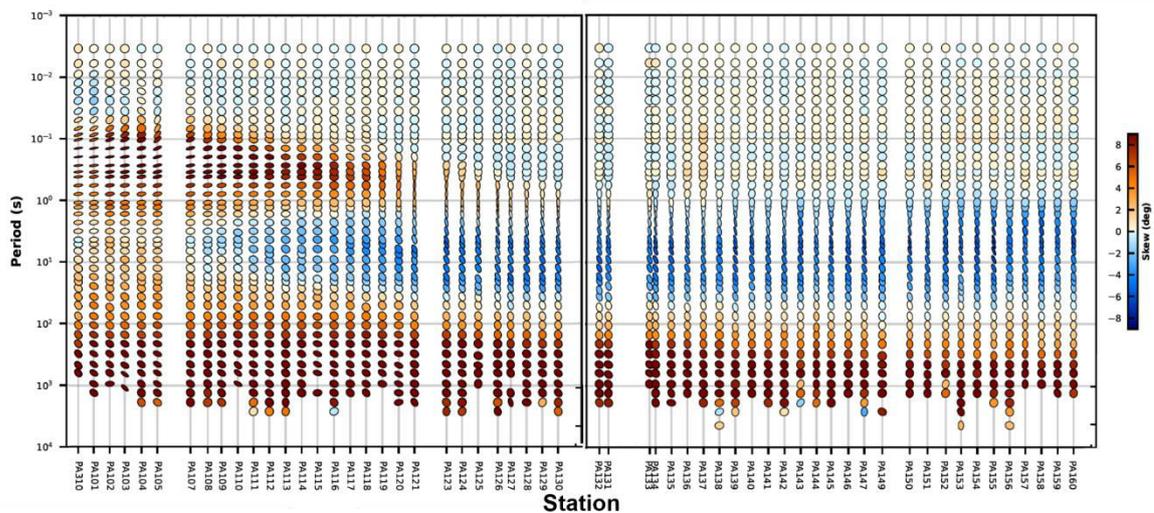
menentukan hasil kesesuaian kurva respon dengan kurva data. Pada kasus ini, nilai RMS berada pada rentang kurang dari 1 yang dikategorikan sebagai *over-fitting*.



Gambar 3. Hasil pemodelan inversi 1D dan 2D data MT Paralana.

Pada Gambar 3 menunjukkan perbandingan model inversi 1D dan 2D memberikan kesamaan pada area permukaan yang ditandai dengan nilai resistivitas rendah (< 20 ohm m) di sisi timur lintasan. Pada daerah sisi barat, nilai resistivitas dijumpai lebih tinggi (> 200 ohm m) dan semakin meningkat seiring bertambahnya kedalaman. Fitur tersebut menerus hingga ke sisi timur dengan nilai kedalaman yang bertambah.

Nilai resistivitas (< 100 ohm m) teridentifikasi pada kedalaman > 15 km. Model inversi 2D memberikan kontras yang lebih jelas pada fitur tersebut dengan ketebalan sebesar 10 km. Pada area yang lebih dalam (> 25 km), fitur dengan resistivitas tinggi kembali dijumpai. Pada model inversi 1D, fitur resistif tersebut hanya berada pada sisi barat. Sementara model inversi 2D menunjukkan adanya kemenerusan dari fitur resistif tersebut dari timur hingga ke barat.



Gambar 4. Hasil analisis tensor fase elips pada seluruh rentang frekuensi.

Pada Gambar 4 menunjukkan daerah resistif ditandai dengan nilai *skew* tinggi. Sementara, daerah resistivitas rendah memiliki nilai *skew* negative. Area permukaan merupakan struktur 1D berupa lingkaran. Hasil analisis tensor fase memberikan gambaran terkait dimensionalitas data MT. Tensor fase lingkaran dengan nilai *skew* berkisar nol dijumpai rentang periode rendah. Tensor fase lingkaran mengindikasikan struktur 1D. Pada kasus ini, tensor tersebut berkaitan dengan keberadaan fitur resistif rendah yang menebal ke sisi timur dan lapisan sedimen yang terendapkan pada struktur cekungan. Area bernilai resistivitas tinggi ditunjukkan oleh tensor fase eliptisitas besar dan nilai *skew* tinggi. Sementara itu, rentang periode 1 sekon dan 10 sekon memberikan anomali *skew* bernilai negatif yang berkorelasi dengan keberadaan nilai resistivitas rendah pada area dalam. Berdasarkan hasil analisis tensor fase, daerah penelitian memiliki jenis data 2D dan 3D pada area dalam yang menandakan struktur kompleks.

Hasil pemodelan inversi 1D memberikan pola yang relatif berbeda terhadap hasil model inversi 2D pada kedalaman lebih dari 10 km. Hal tersebut dikarenakan data *sounding* yang menunjukkan struktur 1D berada pada rentang periode rendah. data pada periode tinggi didominasi dengan data modus TE dan TM yang berbeda. Oleh karenanya, hasil inversi 1D pada rentang periode tinggi memunculkan ambiguitas pada interpretasi. Meskipun, Modus TE memberikan gambaran yang lebih realistis pada pengukuran tegak lurus terhadap *strike*

(Cumming dan Mackie, 2010). Selain itu, inversi 1D memiliki kelemahan dalam penentuan batas tepi bawah suatu struktur (Joni dan Takodama, 2021).

Pemodelan inversi 2D diasumsikan efektif dalam memetakan struktur jika memenuhi kaidah pengukuran. Inversi 2D mampu memberikan hasil yang baik apabila struktur geologi dominan tegak lurus terhadap stasiun pengukuran (Joni dan Takodama, 2021). Pada kasus ini, *strike* dominan merupakan patahan Paralana dan stasiun data tersusun tegak lurus terhadap struktur. Dengan demikian, model inversi 2D lebih relevan dalam penggambaran struktur bawah permukaan pada penelitian ini. Selain itu, keterbatasan penelitian juga menyebabkan inversi hanya dilakukan hingga 2D saja.

Meninjau dari informasi geologi, keberadaan lapisan bernilai resistivitas <20 ohm m berasosiasi dengan lapisan sedimen kuartar yang terendapkan dalam cekungan. Ketebalan lapisan menebal ke arah timur dengan ketebalan mencapai 4 km. Lapisan sedimen tersebut terendapkan di atas batuan dasar kristalin yang digambarkan pada hasil model inversi sebagai fitur dengan nilai resistivitas tinggi (> 1000 ohm m).

Keberadaan fitur konduktif (<100 ohm m) terdeteksi pada kedalaman >15 km yang mengindikasikan adanya aktivitas fluida termal. Fluida tersebut diperkirakan terpanaskan dan mengalir pada jaringan rekahan hingga ke permukaan (Soeffky *et al.*, 2013). Jalur tersebut teridentifikasi pada model inversi 2D sebagai anomali resistivitas lebih rendah pada struktur batuan kristalin. Aktivitas fluida termal tersebut meninggalkan jejak formasi grafit yang terdeteksi sebagai fitur konduktif (<20 ohm m). Keberadaan formasi grafit juga ditemukan pada deposit Uranium Beverley di permukaan (Soeffky *et al.*, 2013).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan inversi yang diperoleh, maka dapat disimpulkan:

1. Model inversi 2D menunjukkan adanya aktivitas fluida termal melalui jaringan rekahan pada kedalaman >15 km yang ditandai dengan keberadaan fitur konduktif (<100 Ohm.m), yang mungkin berasosiasi dengan formasi grafit.
2. Fitur resistif (>1000 Ohm.m) mengindikasikan batuan dasar kristalin.

3. Hasil inversi 1D kurang bersesuaian dengan model inversi 2D dikarenakan sebagian besar data MT berupa 2D dan 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- Brugger, Joel, Ngaire Long, D. C. McPhail, and Ian Plimer. 2005. "An active amagmatic hydrothermal system: The Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia." *Chemical Geology* 222: 35-64.
- Cumming, William, and Randall Mackie. 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." *World Geothermal Congress*. Bali. 1-10.
- Foster, D. A., J. M. Murphy, and A. J. Gleadow. 1994. "Middle tertiary hydrothermal activity and uplift of the northern flinders ranges, South Australia: Insights from apatite fission-track thermochronology." *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia* 11-17.
- Grandis, Hendra, Djedi S. Widarto, and Agus Hendro. 2004. "Magnetotelluric (MT) Method in Hydrocarbon Exploration: A New Perspective." *Jurnal Geofisika* 2: 14-19.
- Hore, S. B., and W. V. Preiss. 2020. "Geoscience in the Flinders Ranges: papers in support of World Heritage Nomination." *Australian Journal of Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia* 67:6: 759-762.
- Joni, Wiwid, and Iqbal Takodama. 2021. "STUDI KOMPARASI PEMODELAN INVERSI 1-D, 2-D, DAN 3-D DATA MAGNETOTELLURIK DI DAERAH PANAS BUMI LOKOP, PROVINSI ACEH." *Buletin Sumber Daya Geologi Volume 16*, 1-11.
- Kumar, P. V. Vijaya, P. B. V. Surba Rao, A. K. Singh, Amit Kumar, and P. Rama Rao. 2021. "Dimensionality and directionality analysis of magnetotelluric data by using different techniques: A case study from northern part of Saurashtra region, India." *J. Earth Syst. Sci.* 101-116.
- Neumann, Narelle, Mike Sandiford, and John Foden. 2000. "Regional geochemistry and continental heat flow: implications for the origin of the South Australian heat flow anomaly." *Earth and Planetary Science Letters* 183: 107-120.

- Rodi, W., and R. L. Mackie. 2001. "Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion." *Geophysics* 66: 174-187.
- Soeffky, Paul, Jared Peacock, Stephan Thiel, and Lars Krieger. 2013. "Crustal fluid pathways imaged using magnetotellurics - implications for the South Australian heat flow anomaly." *ASEG Extended Abstract* 2013:1: 1-3.
- Weisheit, A., P. D. Bons, M. Danisik, and M. A. Elburg. 2013. "Crustal-scale folding: Palaeozoic deformation of the Mt Painter Inlier, South Australia." London: The Geological Society of London.
- Wulser, Pierre-Alain. 2009. *Uranium metallogeny in the Northern Flinders Ranges region of South Australia*. Adelaide: Department of Geology and Geophysics Adelaide University.