



Aplikasi Tensor Fase Data Magnetotellurik untuk Pemodelan Panas Bumi The Geysers, California dan Dikorelasikan dengan Data Gaya Berat

Selvi Misnia Irawati*, Andri Yadi Paembonan, Leonardo Fernanda

Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera

Abstrak

Lapangan panas bumi The Geysers terletak di antara dua sesar *strike-slip* yang tidak aktif, yaitu Sesar Mercuryville dan Collayomi berarah barat laut tenggara. Bagian barat laut The Geysers merupakan lokasi proyek *Enhanced Geothermal System (EGS)*, karena pada area ini lokasi zona reservoir memiliki suhu yang tinggi mencapai 400 °C dengan kedalaman sekitar 2,6 km di bawah permukaan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui struktur dan kondisi bawah permukaan barat laut The Geysers menggunakan analisis tensor fase data magnetotellurik dan dikorelasikan dengan data gaya berat. Analisis tensor fase digunakan untuk mengetahui arah *geoelectrical strike* yang timbul akibat adanya ketidakhomogenan konduktivitas listrik secara lateral di Bumi dan memberikan informasi tentang kondisi bawah permukaan. Arah *geoelectrical strike* pada daerah penelitian diperoleh sekitar N145°E. *Clay cap* diidentifikasi memiliki nilai resistivitas <30 Ohm.m dengan kedalaman 0,2 km dan ketebalan 0,8 – 1 km, batupasir *graywacke* merupakan reservoir utama pada daerah penelitian memiliki nilai resistivitas 30 – 90 Ohm.m dengan kedalaman 1 km dan ketebalan 0,4 – 1,8 km, serta terdapat area yang lebih resistif dengan nilai resistivitas 90 – 300 Ohm.m pada kedalaman 1,5 – 2 km merupakan batuan *metagraywacke*. Peningkatan temperatur reservoir pada kedalaman 2,6 km diduga karena adanya peran dari batuan *metagraywacke* sebagai *Hot Dry Rock Reservoir (HDR)*.

Kata kunci: The Geysers; magnetotellurik; tensor fase; gaya berat; *hot dry rock reservoir*

Abstract

The Geysers geothermal field is located between two inactive strike-slip faults, the northwest-southeast trending Mercuryville and Collayomi Faults. The northwest part of The Geysers is the location of the Enhanced Geothermal System (EGS) project, because in this area the location of the reservoir zone has a high temperature reaching 400 °C with a depth of about 2,6 km below the surface. This study aims to determine the subsurface structure and condition northwest of The Geysers using phase tensor analysis of magnetotelluric data and correlated with gravity data. Phase tensor analysis is used to determine the direction of geolectrical strikes that arise due to the lateral inhomogeneity of electrical conductivity in the Earth and provide information about subsurface conditions. The geolectrical strike direction in the study area was obtained around N145°E. Clay cap is identified as having a resistivity value <30 Ohm.m with a depth of 0,2 km and a thickness of 0,8 - 1 km, graywacke sandstone is the main reservoir in the study area having a resistivity value of 30 - 90 Ohm.m with a depth of 1 km and a thickness of 0,4 – 1,8 km, and there are more resistive areas with a resistivity value of 90 - 300 Ohm.m at a depth of 1,5 - 2 km which are metagraywacke rocks. The increase in reservoir temperature at a depth of 2,6 km is thought to be due to the role of metagraywacke rocks as a Hot Dry Rock Reservoir (HDR).

Keywords: *the geysers; magnetotelluric; phase tensor; gravity; hot dry rock reservoir*

*) Korespondensi : selvi.irawati@tg.itera.ac.id

Diajukan : 30 November 2023

Diterima : 16 Januari 2024

Diterbitkan : 16 April 2024

PENDAHULUAN

Energi panas bumi atau sering disebut dengan *geothermal energy* merupakan salah satu sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan. Salah satu sumber panas bumi terbesar di dunia adalah lapangan panas bumi The Geysers, tepatnya terletak di Pegunungan Mayacamas sekitar 72 mil di utara San Francisco, California, USA (Hartline dkk., 2016). Kemudian di bagian barat laut The Geysers dijadikan sebagai lokasi proyek peningkatan sistem geotermal atau *Enhanced Geothermal System* (EGS), karena pada area ini merupakan lokasi zona reservoir bersuhu tinggi yang mencapai 400 °C dengan kedalaman sekitar 2,6 km di bawah permukaan (Jeanne dkk., 2014). Panas bumi The Geysers telah beroperasi secara komersial sejak tahun 1960 hingga saat ini, dimana reservoir panas buminya didominasi oleh uap (Sanyal dan Eneedy, 2011) dan pada tahun 2023 dikutip dari website *United States Geological Survey* (USGS) sistem panas bumi ini telah menghasilkan energi listrik sekitar 835 Megawatt (USGS, 2023).

Salah satu metode eksplorasi geofisika pasif yang banyak digunakan dalam eksplorasi geotermal adalah metode magnetotellurik. Sumber energi metode ini berasal dari interaksi badai matahari (*solar wind*) pada frekuensi <1 Hz dan petir dengan frekuensi >1 Hz. Metode ini mampu mengestimasi kedalaman reservoir panas bumi seperti yang dilakukan oleh Marwan dkk. (2022) di Gunung Seulawah Agam, dengan memanfaatkan algoritma inversi *Occam* 1-D untuk mendapatkan karakteristik sistem panas bumi berdasarkan parameter resistivitas terhadap kedalaman. Penelitian lainnya yaitu mengkarakterisasi *base of conductor* atau batas antara batuan penudung dengan reservoir lapangan panas bumi di Pulau Flores oleh Sari dkk. (2023), dengan menggunakan inversi 3-D magnetotellurik yang dikorelasikan dengan data sumur. Selanjutnya, penelitian dengan menggunakan inversi 2-D magnetotellurik untuk mencari model yang paling halus dan sesuai dengan data dilakukan oleh Harahap dkk. (2022) dalam menentukan sebaran resistivitas pada sistem panas bumi Telaga Ngebel di Jawa Timur. Selain itu, metode ini mampu dalam memetakan bawah permukaan dengan jangkauan yang sangat dalam, sehingga dapat diandalkan dalam eksplorasi panas bumi (Grandis dkk., 2002).

Penelitian ini dilakukan di lapangan panas bumi The Geysers, California, USA. Adapun penelitian yang telah dilakukan di lokasi ini sebelumnya terkait karakterisasi bawah permukaan sumber panas bumi oleh Peacock dkk. (2019) dengan menggunakan data magnetotellurik dan gaya berat. Hasil yang diperoleh menyatakan bahwa nilai resistivitas sekitar 100 Ohm.m sebagai *graywacke* tetapi resistivitas *graywacke* akan lebih rendah ketika pori-porinya terisi oleh cairan garam (mirip dengan model resistivitas Stanley dkk. (1998)), nilai resistivitas sekitar 106 Ohm.m sebagai granit tak jenuh fluida dengan suhu sekitar 300 °C (Dalrymple dkk., 1999 dan Olhoeft, 1981), dan resistivitas sekitar 10 Ohm.m sebagai granit jenuh dengan salinitas fluida 0,1 molar NaCl. Selanjutnya, penampang dari gaya berat memperlihatkan bahwa Sesar Mercuryville memanjang hingga kedalaman setidaknya 5 km, hal ini sesuai dengan kegempaan dan model 3-D oleh Hartline dkk. (2016). Batuan beku felsik meluas ke utara melewati pembangkit listrik Aidlin dengan kedalaman sekitar 3 km. Perubahan suhu tinggi diperkirakan pada kedalaman 2,5 km dan 3 km dengan suhu mencapai 400 °C, hal ini sesuai dengan perkiraan *Hot Dry rock Reservoir* (HDR) oleh Garcia dkk. (2012); Garcia dkk. (2016); dan Rutqvist dkk. (2016).

Kekurangan pada penelitian sebelumnya adalah belum dilakukan proses analisis tensor fase dalam pengolahan data magnetotellurik-nya. Analisis tensor fase digunakan untuk mendapatkan informasi mengenai arah struktur utama dalam sistem panas bumi. Beberapa sifat tensor fase, yaitu tidak dipengaruhi oleh distorsi galvanik, ketika struktur dimensionalitasnya 2-D maka sudut kemiringannya (β) bernilai nol, dan dapat mengetahui informasi mengenai arah *geoelectrical strike* (Febrika dkk., 2017). Oleh karena itu, dalam penelitian ini perlu dilakukan analisis tensor fase untuk melengkapi penelitian sebelumnya. Dan juga perlu dilakukan korelasi model bawah permukaan data magnetotellurik dengan gaya berat untuk mengetahui kedalaman struktur dan batas lapisan pada daerah penelitian supaya menghasilkan pemodelan yang mirip dengan keadaan sebenarnya (Irawati dkk., 2022).

METODOLOGI

Metode Magnetotellurik

Salah satu metode pasif dalam geofisika adalah metode magnetotellurik yang memanfaatkan medan elektromagnetik alami, dimana medan listrik (E) dan medan magnet (B) diukur dalam arah ortogonal di permukaan bumi. Medan elektromagnetik yang diinduksi secara alami di bumi dapat dimanfaatkan untuk studi magnetotellurik memiliki rentang periode gelombang $10^{-3} - 10^5$ s (Simpson dan Bahr, 2005).

Medan elektromagnetik yang memiliki frekuensi >1 Hz (periode <1 s) berasal dari aktivitas meteorologi seperti pelepasan petir. Pelepasan petir akan menimbulkan gelombang elektromagnetik yang terjebak diantara ionosfer dan bumi dan akan berjalan mengelilingi bumi. Kemudian, medan elektro-magnetik dengan frekuensi <1 Hz (periode >1 s) berasal dari interaksi antara angin matahari (*solar wind*) dengan magnetosfer dan ionosfer bumi.

Persamaan yang mendasari metode magnetotellurik mengacu pada empat persamaan Maxwell. Secara singkat, persamaan Maxwell tersebut dapat menjelaskan bagaimana penjalaran gelombang elektro-magnetik pada frekuensi dan medium tertentu. Ke-empat persamaan tersebut merupakan gabungan dari hasil percobaan mengenai listrik – magnet yang dilakukan oleh Faraday, Ampere, Gauss, dan Coulomb disamping yang dilakukan oleh Maxwell sendiri. Persamaan Maxwell secara matematis dinyatakan dalam persamaan 1, 2, 3, 4.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot D = q \quad (4)$$

dimana E sebagai medan listrik (V/m), B sebagai induksi magnetik (Weber/m²), H sebagai medan magnet (A/m), J sebagai rapat arus (A/m²), D perpindahan listrik (Coulomb/m²), dan q sebagai rapat muatan listrik (Coulomb/m³). Persamaan (1) merupakan turunan dari persamaan hukum Faraday yang menyatakan bahwa medan listrik yang bersirkulasi ditimbulkan oleh perubahan medan magnetik terhadap waktu. Persamaan (2) merupakan persamaan hukum Ampere yang

menyatakan bahwa medan magnet yang bersirkulasi dihasilkan oleh penjumlahan vektor arus listrik dan perubahan medan listrik terhadap waktu. Persamaan (3) merupakan persamaan hukum Gauss untuk magnet yang menyatakan bahwa tidak ada medan magnet yang bersifat monopole. Persamaan (4) merupakan hukum Gauss untuk listrik yang menyatakan bahwa fluks elektrik pada suatu medium sebanding dengan muatan total yang ada dalam medium tersebut.

Tensor Fase

Rasio antara bilangan riil dan imajiner dari bilangan kompleks tensor impedansi ($Z = X + iY$) disebut sebagai tensor fase (Caldwell dkk., 2004). Jika dinyatakan dalam bentuk matematis menjadi,

$$\phi = X^{-1}Y \quad (5)$$

Hubungan antara tensor fase dari tensor impedansi yang diamati dan regional dinyatakan dalam persamaan (6).

$$\phi = X^{-1}Y$$

$$\phi = (DX_R)^{-1}(DY_R) \quad (6)$$

$$\phi = (X_R)^{-1}Y_R$$

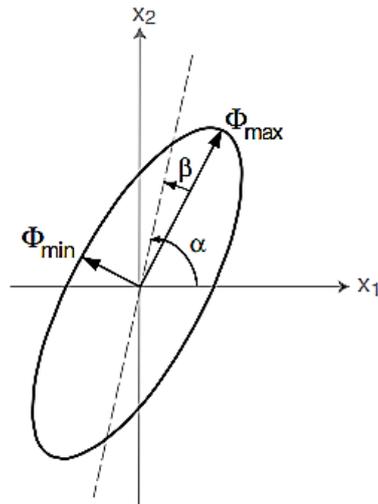
$$\phi = \phi_R$$

dari persamaan (6) dapat diketahui bahwa tensor fase yang diamati sama dengan tensor fase regional dan tidak bergantung pada tensor distorsi. Distorsi tersebut muncul karena terdapat heterogenitas konduktivitas di dekat permukaan bumi yang akan mendistorsi respon elektromagnetik yang dihasilkan oleh struktur konduktivitas bawah permukaan (regional) yang sedang diamati (Caldwell dkk., 2004). Tensor fase diilustrasi sebagai bentuk elips oleh Caldwell dkk. (2004) diperlihatkan pada **Gambar 1**.

Pada dimensionalitas 1-D, nilai sumbu maksimum dan minimum bernilai sama, yaitu

$\phi_{max} = \phi_{min}$, sehingga akan membentuk lingkaran dan $\beta = 0^\circ$. Dimensionalitas 2-D, nilai

$\phi_{max} \neq \phi_{min}$ sehingga mempunyai bentuk elips dan $-3^\circ \leq \beta \leq 3^\circ$. Karena nilai *skew angle* pada tensor fase 2-D mendekati nol, maka arah sumbu utama tensor fase ini bergantung pada besar sudut α . Dan untuk kasus 3-D, semua komponen dalam tensor fase memiliki nilai, nilai $\phi_{max} \neq \phi_{min}$ dengan *skew angle* sebesar $\beta < -3^\circ$ atau $\beta > 3^\circ$. Sehingga besar sudut α tidak dapat diidentifikasi sebagai arah *strike*.



Gambar 1. Representasi grafis tensor fase menurut Caldwell dkk. (2004)

Goelectrical Strike

Goelectrical strike adalah arah yang merepresentasikan orientasi aliran arus listrik di bawah permukaan akibat ketidak-homogenan konduktivitas listrik secara lateral di Bumi. Dalam medium 2-D, diasumsikan bahwa terdapat benda konduktif listrik yang memanjang di mana arus listrik mengalir di sepanjang konduktor ini. *Goelectrical strike* juga memberikan informasi

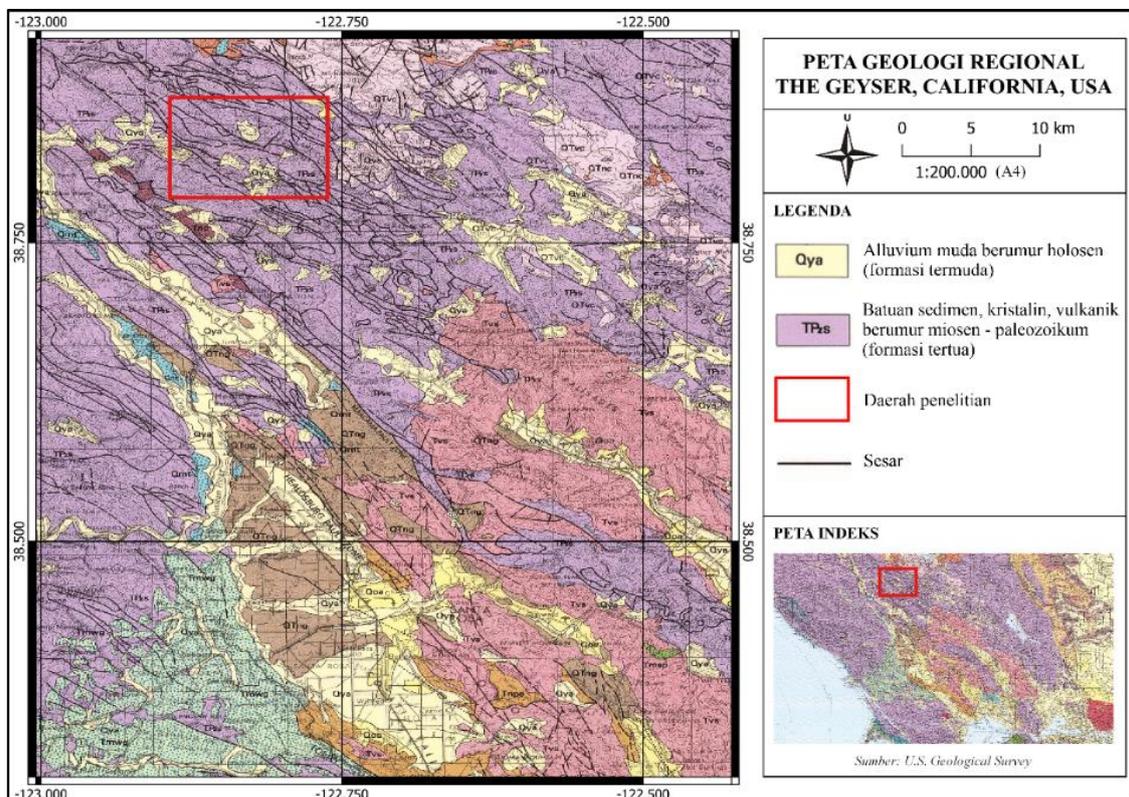
tentang strati-fikasi bawah permukaan dan struktur di dalamnya (Niasari, 2016).

Arah *goelectrical strike* yang diperoleh perlu disesuaikan juga dengan peta lembar geologi daerah penelitian yang ada dan perlu diketahui bahwa dalam analisis *goelectrical strike* terdapat ambiguitas sebesar $\pm 90^\circ$.

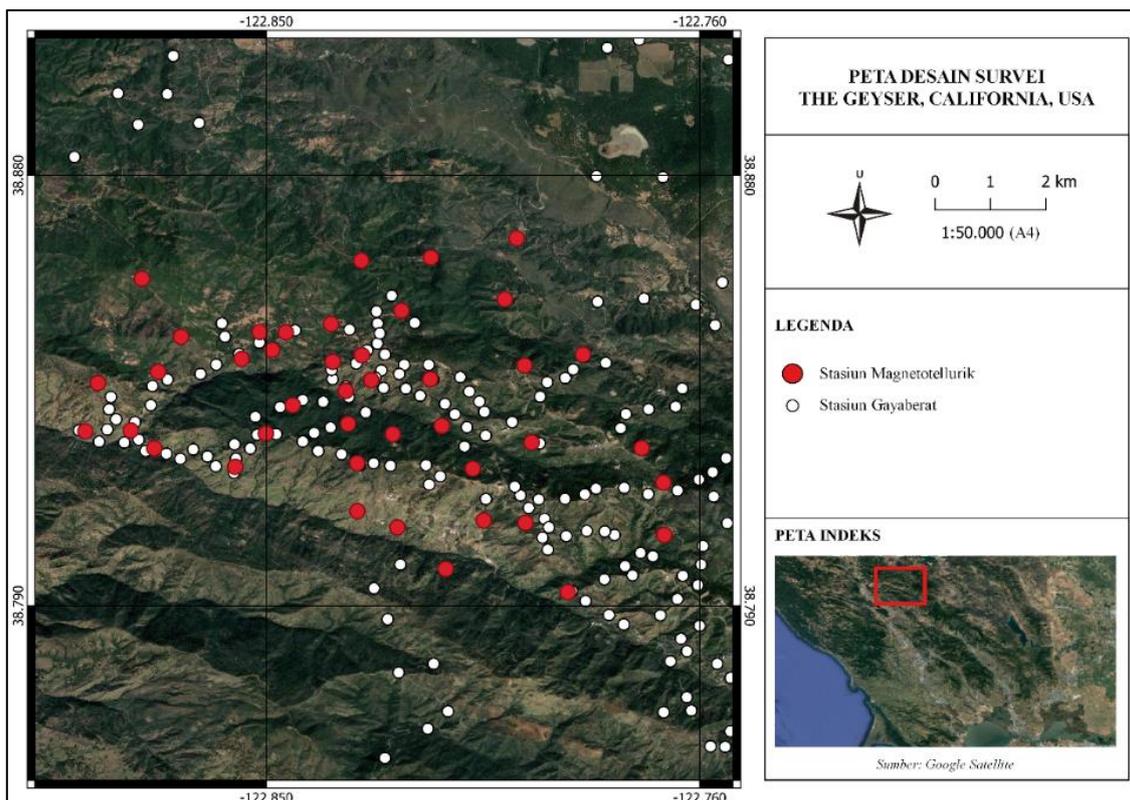
Geologi Regional dan Desain Survei

Lapangan panas bumi The Geysers berada di antara Lake *Regency*, Mendocino, dan Sonoma dengan luas sekitar 45 mil persegi dan terletak di antara patahan *strike-slip* berarah barat laut yang termasuk ke dalam sistem patahan besar San Andreas, seperti di tunjukkan pada **Gambar 2**.

Lapangan panas bumi The Geysers dibatasi oleh Zona Sesar Big Sulphur Creek–Mercuryville di barat daya, dan di timur laut oleh Zona Sesar Collayomi, keduanya merupakan sesar yang tidak aktif. Diketahui bahwa sesar yang ada di sekitar lapangan panas bumi The Geysers merupakan sesar yang tidak aktif selama 15.000 tahun terakhir (Garcia dkk., 2012). Secara umum geologi daerah penelitian disusun oleh formasi yang berumur Miosen sampai Paleozoikum (TPzs) dan terdiri dari batuan sedimen, kristalin, dan vulkanik (Chin dkk., 1993).



Gambar 2. Peta geologi regional daerah penelitian (Chin dkk., 1993)

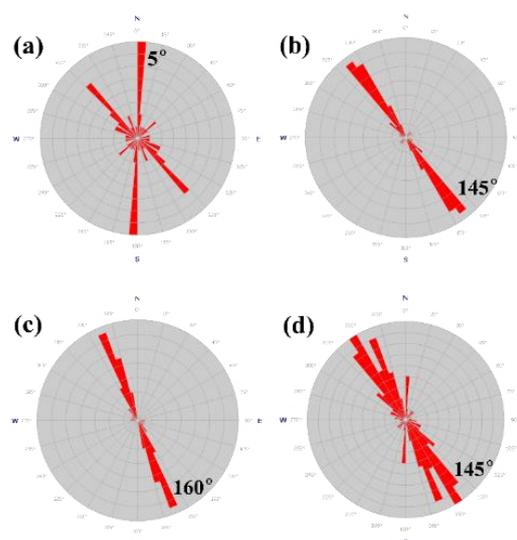


Gambar 3. Peta desain survei daerah penelitian

Lokasi daerah penelitian ini dilakukan di bagian barat laut lapangan panas bumi The Geysers. Data magnetotellurik dan gaya berat yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang diperoleh dari *website U.S. Geological Survey (USGS)*. Akuisisi data magnetotellurik sebanyak 42 stasiun dilakukan pada bulan Juni 2017 dan dipublikasikan di *website USGS* pada 2020. Sedangkan data gaya berat yang digunakan merupakan gabungan dari data baru dengan data yang sudah ada sebelumnya yaitu sebanyak 126 stasiun data baru yang diambil pada tahun 2018 dan sebanyak 408 stasiun sudah ada sebelumnya. Desain survei penelitian ini bisa dilihat pada **Gambar 3**.

HASIL DAN PEMBAHASAN Arah *Goelectrical Strike* dan Jenis Dimensionalitas

Arah *goelectrical strike* daerah penelitian dapat diketahui dengan cara melakukan plot hasil perhitungan arah elips tensor fase tiap periode ke dalam diagram mawar (*rose diagram*), seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Dalam penelitian ini dilakukan perbandingan hasil plot diagram mawar antara periode rendah, sedang, dan tinggi supaya hasil yang diperoleh menjadi



Gambar 4. Plot diagram mawar: (a) periode rendah 0,1 s; (b) periode sedang 10 s; (c) periode tinggi 1000 s, dan; (d) gabungan semua periode

lebih akurat. **Gambar 4(a)** menunjukkan hasil plot diagram mawar pada periode rendah atau 0,1 s yang memiliki arah dominan sebesar N5°E dan N140°E; **Gambar 4(b)** menunjukkan hasil plot diagram mawar pada periode sedang atau 10 s yang memiliki arah dominan sebesar N145°E, dan; **Gambar 4(c)** menunjukkan hasil plot

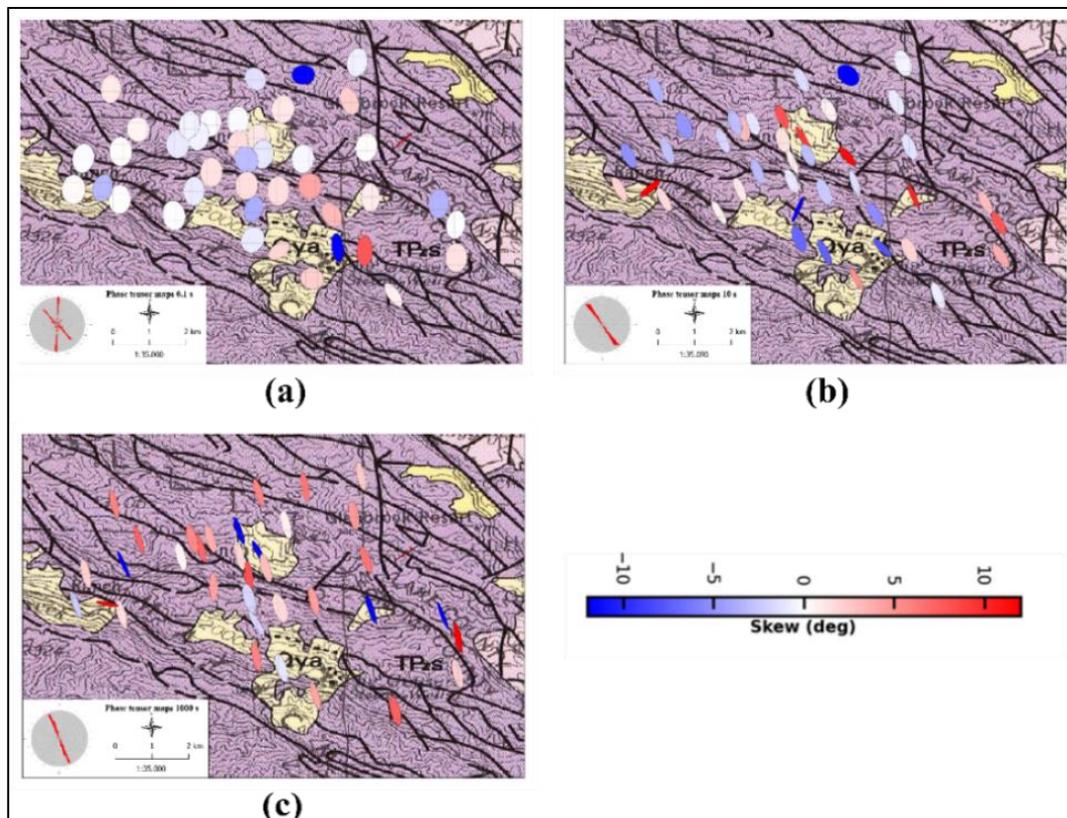
diagram mawar pada periode sedang atau 1000 s yang memiliki arah dominan sebesar N160°E. Apabila ketiga rentang periode tersebut diplot menjadi satu diagram mawar, akan menghasilkan *geoelectrical strike* dominan ke arah N145°E, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4(d)**.

Berdasarkan hasil analisis tensor fase, arah *geoelectrical strike* yang diperoleh pada daerah penelitian memiliki arah dominan sebesar N145°E. Hal tersebut tidak jauh berbeda dengan arah struktur geologi yang ada pada peta yaitu sebesar N130°E dan di sekitar daerah penelitian terdapat dua sesar *strike-slip* aktif berarah barat laut yaitu Sesar Maacama dan Sesar Bartlett Springs (DeCourten, 2008). Selain itu, terdapat dua sesar tidak aktif yang berada tepat di daerah penelitian yaitu Sesar Big Sulphur Creek – Mercuryville di sisi barat daya dan Sesar Collayomi di sisi timur laut.

Menurut Caldwell dkk., (2004) jenis dimensionalitas daerah penelitian dapat diketahui berdasarkan nilai *skew angle* (β) dan bentuk grafis tensor fase. Selanjutnya, dilakukan *overlay* antara elips tensor fase dari periode rendah, sedang, dan tinggi dengan peta geologi daerah penelitian seperti direpresentasikan pada

Gambar 5 di bawah ini, untuk melihat jenis dimensionalitas yang dominan disetiap periode. Pada dimensionalitas 1-D, nilai $\beta = 0^\circ$ dan tensor fase berbentuk lingkaran, dicirikan dengan warna putih. Untuk dimensionalitas 2-D, nilai $-3^\circ \leq \beta \leq 3^\circ$ dan berbentuk elips karena $\phi_{max} \neq \phi_{min}$, dicirikan dengan warna merah pudar atau biru pudar. Dan untuk kasus 3-D, semua komponen dalam tensor fase memiliki nilai, nilai $\phi_{max} \neq \phi_{min}$ dengan nilai *skew angle* sebesar $\beta < -3^\circ$ atau $\beta > 3^\circ$, dicirikan dengan warna merah terang atau biru terang.

Gambar 5(a) menunjukkan bentuk tensor fase periode rendah (0,1 s), didominasi oleh bentuk elips yang berwarna biru pudar dan merah pudar, hal ini merepresentasikan bahwa jenis dimensionalitas pada periode 0,1 s adalah 2-D. **Gambar 5(b)** menunjukkan bentuk tensor fase periode sedang (10 s) dan **Gambar 5(c)** menunjukkan bentuk tensor fase periode tinggi (1000 s), keduanya pun didominasi oleh bentuk elips yang berwarna biru pudar dan merah pudar, hal ini merepresentasikan bahwa jenis dimensionalitas pada periode 10 s dan 1000 s juga adalah 2-D. Artinya jika ditinjau dari semua periode, daerah penelitian didominasi oleh jenis



Gambar 5. Peta tensor fase: (a) periode rendah 0,1 s; (b) periode sedang 10 s, dan; (c) periode tinggi 1000 s

dimensionalitas 2-D. Hal ini sesuai dengan keadaan daerah penelitian yang hanya didominasi oleh satu formasi yaitu Formasi TPzs, sehingga keadaan lapisan bawah permukaannya sebagian besar hanya dipengaruhi oleh keberadaan struktur sesar.

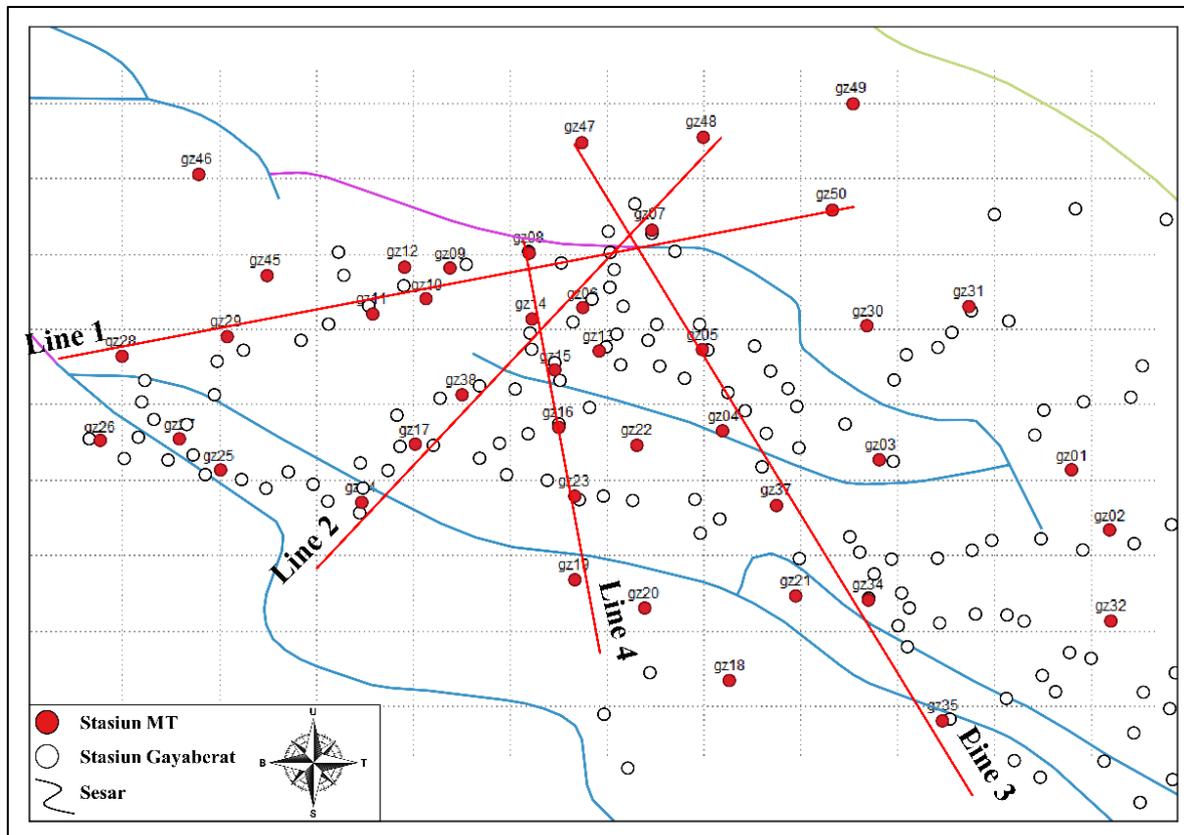
Pemodelan Data Magnetotellurik

Dalam penelitian ini digunakan sebanyak 4 lintasan pemodelan dengan mempertimbangkan keberadaan sesar berdasarkan peta geologi daerah penelitian pada setiap lintasannya, seperti pada **Gambar 6**. Mode inversi yang digunakan pada saat pemodelan menggunakan gabungan mode TE dan TM, karena hasil pemodelan yang diperoleh akan lebih kompleks baik secara vertikal ataupun horizontal dibandingkan jika hanya menggunakan salah satunya saja.

Parameter yang perlu diperhatikan selanjutnya adalah nilai alpha (α), beta (β), dan tau (τ) tetapi dalam penelitian ini nilai β yang digunakan bernilai tetap yaitu $\beta = 3$ karena nilai konduktivitas antar sel yang berdekatan secara horizontal bergantung pada rasio *smoothing* horizontal dan vertikal yaitu α (Rodi dan Mackie,

2001). Nilai τ merupakan faktor yang mengontrol nilai *Root Mean Squared Error (RMSE)* dan *roughness*. Dalam penentuan nilai τ harus dikorelasikan dengan keberadaan struktur geologi daerah penelitian. Nilai *RMSE* dan *roughness* yang minimum tidak dapat menjamin jika pemodelan yang dilakukan sudah optimum apabila tidak dikorelasikan dengan keadaan geologi daerah penelitian. Adapun nilai τ yang dilakukan uji coba dalam penelitian ini yaitu 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300, dan nilai α yaitu 0, 1, 2, 2.5, untuk lebih jelasnya bisa dilihat pada **Tabel 1**.

Setelah dilakukan delapan kali percobaan untuk mencari nilai τ dengan hasil pemodelan paling baik, diperoleh bahwa pada lintasan 1 dan 4 nilai τ yang digunakan $\tau = 10$ dan lintasan 2 dan 3 nilai τ yang digunakan $\tau = 3$. Nilai α dilakukan empat kali percobaan dan hasil pemodelan yang paling baik menunjukkan bahwa untuk lintasan 1 digunakan $\alpha = 2,5$, lintasan 2 dan 3 digunakan $\alpha = 2$, dan lintasan 4 digunakan $\alpha = 1$. Capaian iterasi dan *RMSE* yang diperoleh pada masing-masing lintasan dapat dilihat pada **Tabel 2**.



Gambar 6. Lintasan pemodelan 2-D data magnetotellurik.

Tabel 1. Parameter inversi yang digunakan dalam pemodelan

Line 1				Line 2			
$\beta = 3$	τ	RMS	Roughness	$\beta = 3$	τ	RMS	Roughness
$\alpha = 1$	0,1	1,997	840,4	$\alpha = 1$	0,1	2,027	732,8
	0,3	1,652	727,6		0,3	1,776	972,2
	1	1,668	659,1		1	1,874	1081,8
	3	1,707	748,8		3	2,035	1092
	10	1,707	998,4		10	2,197	1401,3
	30	1,672	1627,8		30	2,412	2305,9
	100	1,819	2800,2		100	2,664	3891,6
	300	2,356	4582,2		300	3,031	5885,1
$\alpha = 0$		1,695	1021,1	$\alpha = 0$		1,954	928,1
$\alpha = 2$	$\tau = 10$	1,666	1233,3	$\alpha = 2$	$\tau = 3$	2,029	1237
$\alpha = 2,5$		1,647	1319,4	$\alpha = 2,5$		2,056	1259,8

Line 3				Line 4			
$\beta = 3$	τ	RMS	Roughness	$\beta = 3$	τ	RMS	Roughness
$\alpha = 1$	0,1	3,496	1273,8	$\alpha = 1$	0,1	2,02	522,4
	0,3	3,185	1297		0,3	2,096	545,1
	1	3,334	1831,5		1	2,263	797,7
	3	3,647	2407,3		3	2,287	890,8
	10	3,413	2852,1		10	2,276	1252,5
	30	3,807	4029,4		30	2,359	1821,3
	100	3,531	4186,5		100	2,686	2967,1
	300	4,053	5498,7		300	3,267	4058,6
$\alpha = 0$		3,447	1892,5	$\alpha = 0$		2,132	676,2
$\alpha = 2$	$\tau = 3$	3,558	3057,1	$\alpha = 2$	$\tau = 10$	2,268	1434,7
$\alpha = 2,5$		3,472	3403,2	$\alpha = 2,5$		2,301	1535,9

Tabel 2. Capaian iterasi masing-masing lintasan dan nilai RMSE yang diperoleh

Lintasan	Iterasi	RMSE (%)
1	27	1,649
2	30	2,028
3	23	3,557
4	30	2,276

Tabel 3. Jenis litologi berdasarkan nilai sebaran resistivitas bawah permukaan daerah penelitian (Peacock dkk. (2019))

No.	Litologi	Resistivitas (Ohm.m)
1	Clay cap Reservoir	<30
2	Graywacke Metagraywacke (HDR)	30 – 90 90 – 300
3	Heat source	>300

Hasil inversi pemodelan menunjukkan sebaran resistivitas yang hampir mirip tiap lintasan. Mengacu pada penelitian sebelumnya, pembagian sebaran nilai resistivitas berdasarkan jenis litologinya dapat dilihat pada Tabel 3.

Hasil pemodelan lintasan 1 berarah barat – timur ditemukan adanya zona yang lebih resistif pada kedalaman 2,5 km ditandai dengan R1 diduga sebagai lokasi HDR yaitu batuan metagraywacke. Kemudian zona konduktif di dekat permukaan ditandai dengan C1 diduga sebagai clay cap dan zona yang ditandai dengan C2 diduga sebagai batuan graywacke yang berperan sebagai reservoir utama pada sistem panas bumi ini, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7 di bawah.

Model lintasan 2 hasilnya tidak jauh berbeda dengan model lintasan 1 dan berarah barat daya – timur laut, dimana pada kedalaman sekitar 1,5 – 3 km ditandai dengan zona resistif R1 diduga sebagai batuan metagraywacke. Kemudian zona reservoir yaitu batuan graywacke ditandai dengan

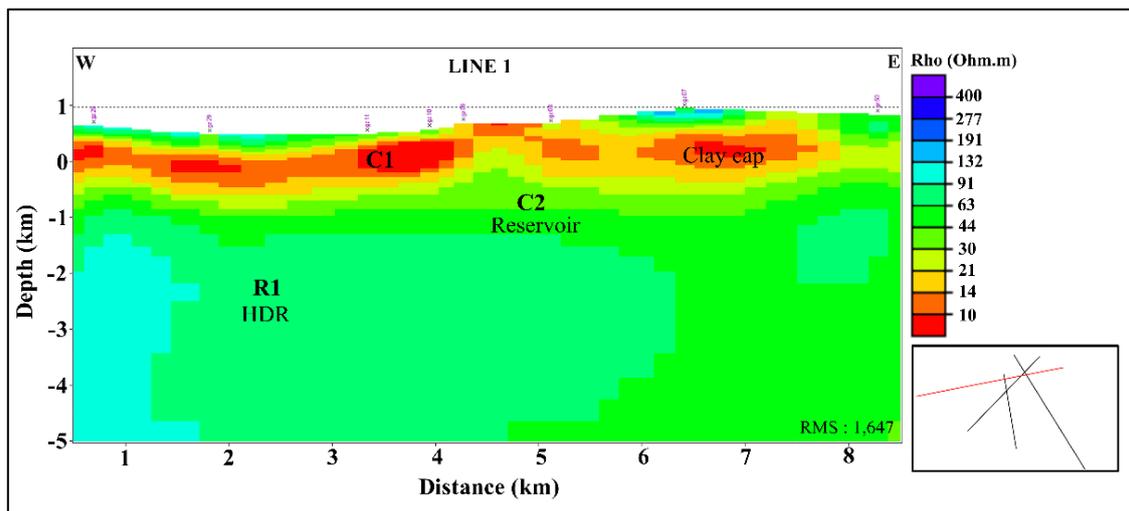
C2 dan *clay cap* ditandai dengan C1, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 8**.

Pemodelan lintasan 3 berarah tenggara – barat laut yang ditunjukkan pada **Gambar 9**. Pada lintasan ini zona resistif yang ditandai dengan R1 ditemukan lebih dangkal dibandingkan lintasan sebelumnya yaitu pada kedalaman sekitar 1 km dan diduga sebagai batuan *metagraywacke*. Selanjutnya, pada kedalaman 3,5 km ditemukan adanya zona yang lebih konduktif dibandingkan dengan zona reservoir C2 ditandai sebagai C3 dengan nilai resistivitas sekitar 20 Ohm.m diduga sebagai fluida bersalinitas tinggi yang mengisi pori batuan *graywacke*.

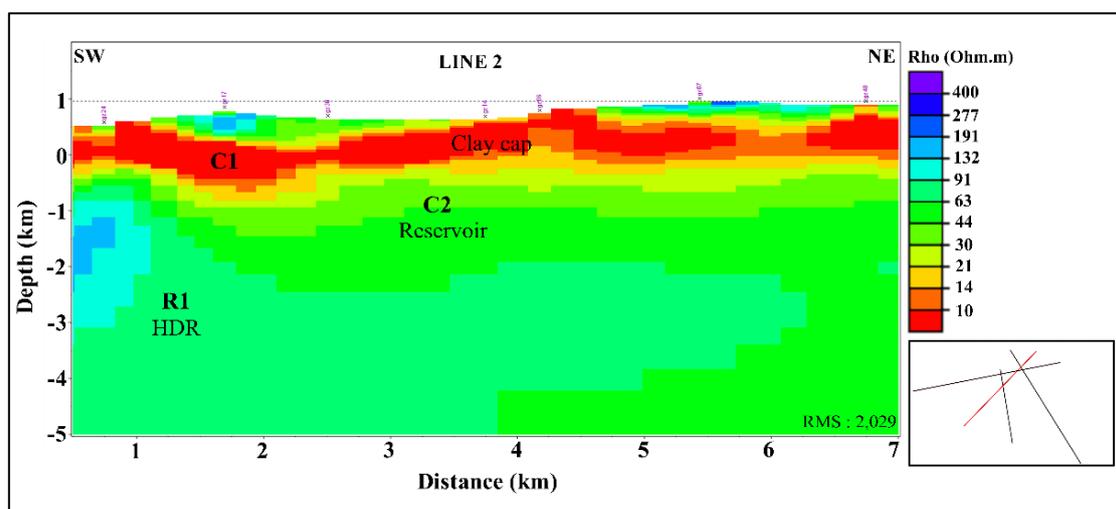
Pemodelan lintasan 4 berarah selatan – utara, sebaran resistivitasnya terlihat didominasi oleh zona resistif dibandingkan dengan lintasan lain yang ditandai sebagai R1. Zona resistif bisa

ditemukan sepanjang lintasan ini pada kedalaman 1,5 km yang diduga sebagai batuan *metagraywacke*. Jika dibandingkan dengan lintasan lain zona reservoir pada lintasan ini tidak terlalu tebal memiliki ketebalan sekitar 0,5 km. Hasil pemodelan lintasan 4 diperlihatkan pada **Gambar 10**.

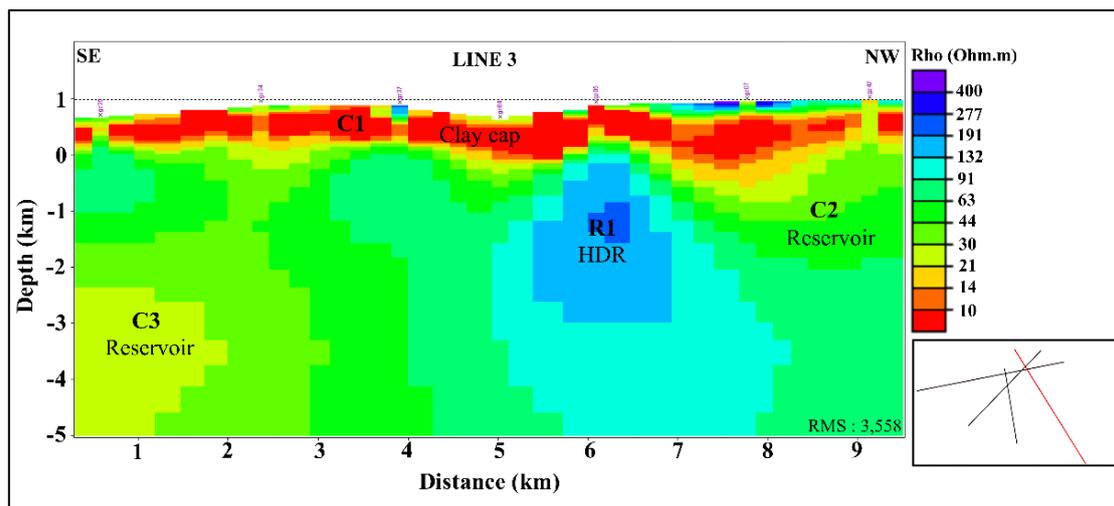
Berdasarkan penelitian sebelumnya oleh Peacock dkk. (2019) pada lokasi dekat permukaan ditemukan adanya batuan hijau atau *greenstone* dengan nilai resistivitas berkisar antara 26 – 32 Ohm.m. *Greenstone* umumnya berasal dari batuan beku yang telah mengalami proses metamorfisme, mengandung mineral klorit dan epidot sehingga batuannya berwarna hijau. Batuan ini juga berperan dalam pembentukan mineral lempung sebagai *clay cap* pada daerah penelitian, karena telah mengalami



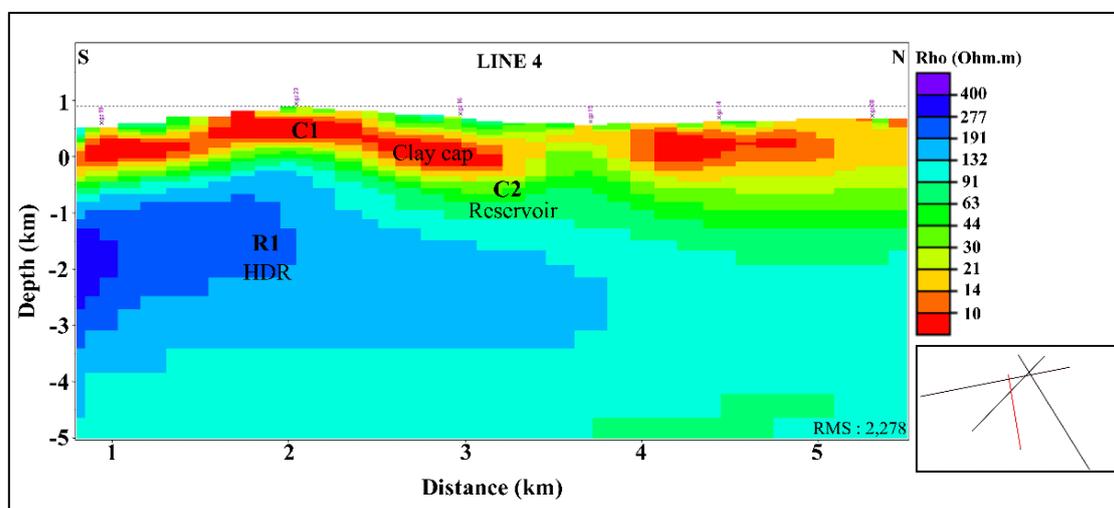
Gambar 7. Model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik lintasan 1



Gambar 8. Model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik lintasan 2



Gambar 9. Model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik lintasan 3



Gambar 10. Model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik lintasan 4

proses alterasi termal. Hasil inversi pemodelan juga menunjukkan kesesuaian dengan penelitian sebelumnya, dimana pada zona dekat permukaan di-identifikasi sebagai *clay cap* dan memiliki nilai resistivitas yang cukup rendah sekitar <30 Ohm.m.

Pada kedalaman rata-rata sekitar 1 km diidentifikasi sebagai batupasir *graywacke*, jenis litologi ini termasuk kedalam jenis batuan sedimen klastik. *Graywacke* merupakan batuan utama yang berperan sebagai reservoir pada lapangan panas bumi The Geyser (Garcia dkk., 2012). Lapisan ini umumnya memiliki nilai resistivitas sekitar 30 – 90 Ohm.m, tetapi akan menjadi lebih konduktif ketika porinya diisi oleh fluida bersalinitas tinggi seperti pada lintasan 3 di kedalaman 3,5 km yang ditandai C3. Menurut Thompson dan Gunderson (1992); Walters dkk. (1992); Lutz dkk. (2012) dalam Peacock dkk.

(2019) menjelaskan bahwa porositas matriks reservoir diperkirakan sekitar 1% dan porositas yang disebabkan oleh rekahan sekitar 1 – 3%.

Terdapat lapisan yang lebih resistif (90 – 300 Ohm.m) pada zona reservoir dengan kedalaman rata-rata 1,6 – 2,5 km. Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Garcia dkk. (2012), menyatakan bahwa terdapat peningkatan temperatur pada zona reservoir di bawah kedalaman 2,6 km hingga mencapai 400 °C yang diduga sebagai peran dari batuan HDR. Peacock dkk. (2019) memodelkan bawah permukaan daerah penelitian dengan data gaya berat dimana pada kedalaman 2,6 – 3 km merupakan batuan *metagraywacke* yang berkontak langsung dengan batuan granit yang berperan sebagai *heat source*. Hal ini juga memiliki kesesuaian dengan penelitian yang dilakukan oleh Romero dkk. (1995), dimana kecepatan gelombang seismik di

daerah penelitian menunjukkan terdapat perubahan kecepatan dengan tingkat kecepatan rendah berada pada kedalaman 1,5 – 2,5 km dan mendekati kedalaman lebih dari 2,5 km tingkat kecepatan gelombang seismik menjadi lebih tinggi. Akan tetapi, pada kedalaman kurang dari 1,5 km kecepatan gelombang seismik terukur sangat rendah, salah satu penyebab hal tersebut adalah karena pelapukan yang terjadi pada permukaan dangkal yang ditandai dengan adanya zona lempung (*clay cap*) pada model yang telah diperoleh.

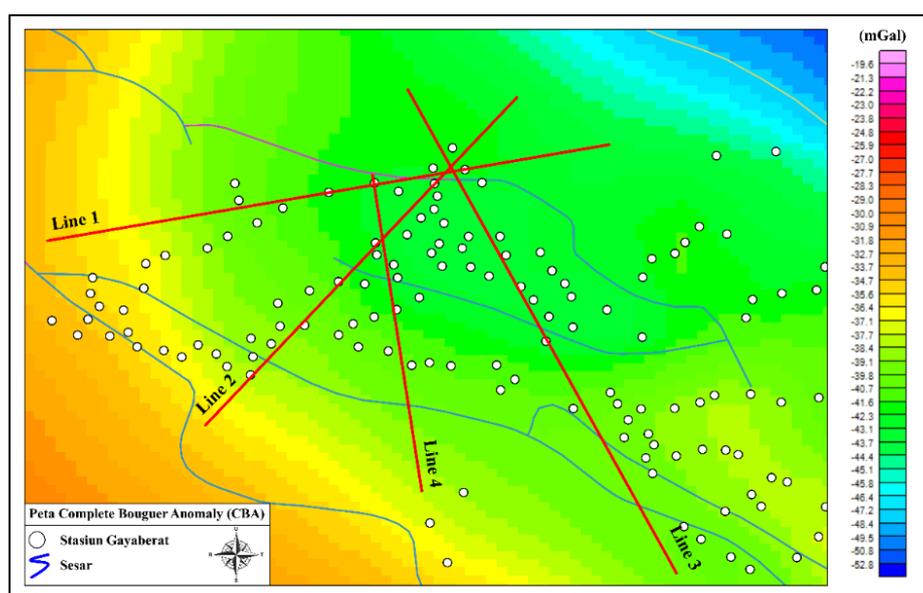
Batuan yang berperan sebagai sumber panas atau *heat source* merupakan produk batuan felsik yaitu granit. Pada kondisi kering batuan granit memiliki suhu berkisar 300 °C dan memiliki nilai resistivitas >100 Ohm.m (Stanley dkk., 1998). Puncak granit pada lokasi penelitian umumnya ditemukan pada kedalaman lebih dari 4 km (Peacock dkk., 2019), akan tetapi pada model yang telah diperoleh tidak ditemukan adanya batuan *heat source*. Pada kedalaman lebih dari 5 km diduga menjadi lokasi sumber magma dengan lelehan parsial <10% dan bertanggung jawab menyediakan panas bagi batuan granit (Peacock dkk., 2019).

Pemodelan Data Gaya Berat

Pemodelan metode gaya berat dilakukan pada data *Complete Bouguer Anomaly (CBA)* dan mengacu pada model yang diperoleh dari data magnetotellurik. Posisi lintasan pemodelan gaya berat harus sesuai dengan lintasan

magnetotellurik supaya hasil pemodelan keduanya bisa dikorelasikan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 11** di bawah ini. Pemodelan data gaya berat digunakan untuk mengidentifikasi kedalaman struktur dan batas lapisan daerah penelitian yang belum bisa teridentifikasi pada pemodelan magnetotellurik.

Terdapat sesuatu yang menarik perhatian dari sudut pandang geofisika, dimana nilai anomali gravitasinya sangat rendah mencapai -30 mGal dan orang yang pertama kali mencatat hal tersebut adalah Chapman (1966). Chapman menyatakan bahwa anomali tersebut bisa jadi disebabkan oleh batuan yang masih berwujud cair dengan densitas rendah. Setelah itu, banyak penelitian berlanjut yang berupaya untuk menjelaskan bagaimana hal demikian bisa terjadi. Pada tahun 1981, Denlinger dan Kovach mencoba memodelkan area panas bumi yang berproduksi rendah dengan memisahkan anomalnya secara keseluruhan. Mereka menyatakan bahwa kemungkinan besar penyebab anomali gravitasi bernilai negatif di area penelitian adalah kombinasi dari: (1) temperatur tinggi; (2) porositas berlebih; (3) sumber panas yang berada di dalam dan dengan kepadatan rendah (magma); (4) batuan dengan porinya terisi uap; dan (5) alterasi hidrotermal (Stanley dan Blakely, 1995). Sebaran nilai densitas daerah penelitian mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Stanley dan Blakely (1995), seperti yang diperlihatkan pada **Tabel 4**.



Gambar 11. Lintasan pemodelan 2-D data gaya berat

Tabel 4. Jenis litologi berdasarkan nilai densitas bawah permukaan daerah penelitian (Stanley dan Blakely (1995))

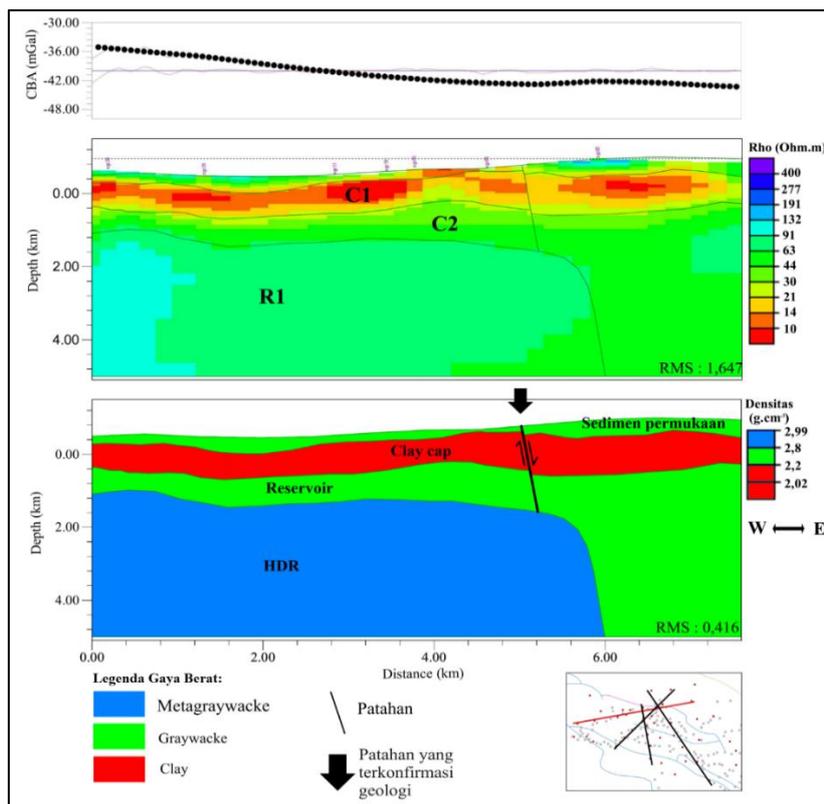
No.	Litologi	Densitas (g/cm ³)
1	Clay	2,02 – 2,2
2	Graywacke	2,2 – 2,8
3	Metagraywacke	2,8 – 2,99

Model 2-D data gaya berat menunjukkan bahwa struktur sesar yang dilewati oleh lintasan 1 pada peta geologi daerah penelitian memiliki kedalaman sekitar 2 km. Batuan *metagraywacke* bisa ditemukan pada kedalaman 1,6 – 2 km dan memanjang ke arah timur sejauh 6 km melewati struktur yang diduga sebagai patahan. Zona reservoir memiliki ketebalan sekitar 0,8 – 1 km dan berada pada kedalaman sekitar 1 km, kemudian pada jarak horizontal lebih dari 6 km batuan *graywacke* mencapai kedalaman sampai 5 km. Zona lempung memiliki ketebalan yang hampir konstan sepanjang lintasan yaitu sekitar 0,7 km dan bisa ditemukan pada kedalaman 0,2 km dari permukaan. Besar nilai *RMSE* pada model gaya berat lintasan 1 ini adalah 0,416%. Hasil pemodelan lintasan 1 data gaya berat ditunjukkan pada **Gambar 12** di bawah.

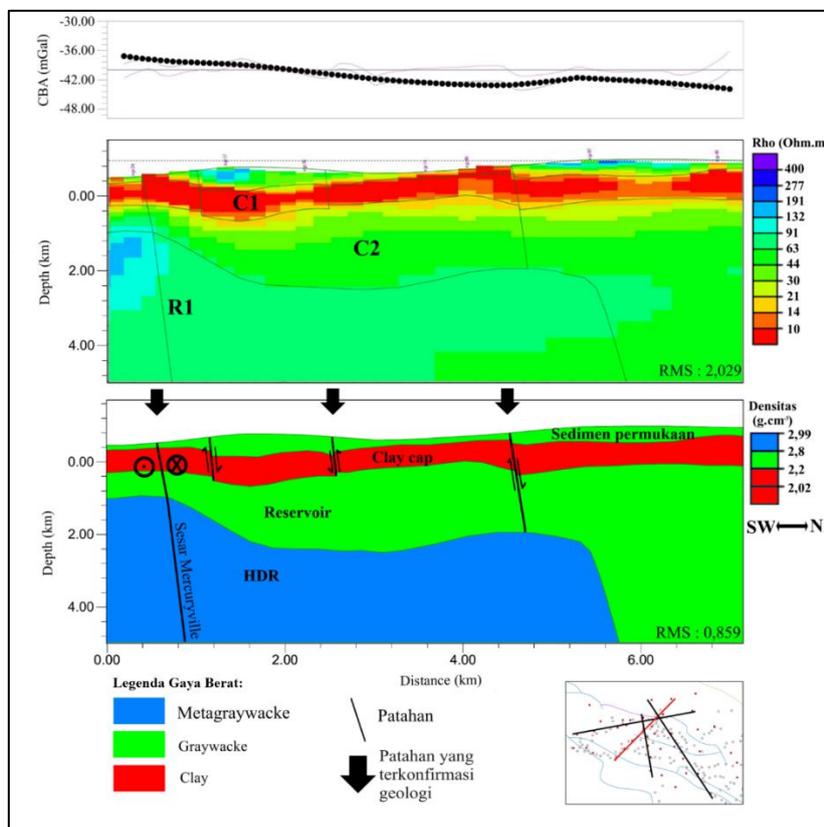
Model lintasan 2 memperlihatkan bahwa terdapat empat buah struktur yang dilaluinya. Patahan yang memanjang sampai kedalaman 5 km merupakan Zona Sesar Mercuryville. Hal ini sesuai dengan penelitian mengenai studi kegempaan yang dilakukan oleh Hartline dkk. (2016) dimana model 3-D menunjukkan bahwa Sesar Mercuryville memanjang hingga kedalaman setidaknya 5 km. Kemudian terdapat dua patahan minor dengan kedalaman sekitar 0,8 km dan patahan dengan kedalaman sekitar 2 km merupakan kemenerusan dari zona patahan pada lintasan 1. Hasil model lintasan 2 menunjukkan bahwa batuan *meta-graywacke* bisa ditemukan pada kedalaman sekitar 1,5 – 2 km di bawah permukaan. Zona reservoir pada lintasan 2 lebih tebal jika dibandingkan dengan lintasan 1 yaitu berkisar 0,7 – 1,7 km dan bisa ditemui pada kedalaman sekitar 0,8 km. Zona lempung atau *clay cap* memiliki ketebalan yang sama dengan lintasan 1 yaitu berkisar 0,7 km dan bisa ditemukan di sepanjang lintasan. Hasil model lintasan 2 ditunjukkan pada **Gambar 13** di bawah. Nilai *RMSE* model lintasan 2 data gaya berat diperoleh sebesar 0,859%.

Pada model lintasan 3 menunjukkan bahwa batuan *metagraywacke* hanya ditemukan pada perpotongan dengan lintasan 1 dan 2 atau hanya pada arah barat laut saja. Hal ini sesuai jika dikaitkan dengan adanya proyek *EGS* yang hanya dilakukan pada area barat laut The Geysers saja, karena pada zona reservoir area tersebut diidentifikasi terdapat adanya peran batuan *HDR* yaitu *metagraywacke* di keda-laman sekitar 2,5 km sehingga temperaturnya mencapai 400 °C (Garcia dkk., 2012). Hasil pemodelan lintasan 3 ditunjukkan pada **Gambar 14** di bawah. Lintasan 3 melewati empat buah struktur patahan, dimana patahan dengan kedalaman sekitar 5 km merupakan kemenerusan dari Sesar Mercuryville yang telah dilalui oleh lintasan 2. Ketebalan zona reservoir pada lintasan ini diidentifikasi sekitar 0,4 – 1,8 km dan bisa ditemukan pada kedalaman 0,6 – 1 km di bawah permukaan. Pada arah tenggara batuan *graywacke* mencapai kedalaman sekitar 5 km dan diduga masih termasuk ke dalam zona reservoir. Ketebalan zona lempung pada lintasan ini hampir mirip dengan lintasan sebelumnya yaitu berkisar 0,4 – 0,8 km dan bisa ditemukan di sepanjang lintasan dengan kedalaman 0,2 km dari permukaan. Besar nilai *RMSE* yang diperoleh pada model lintasan 3 sebesar 0,637%.

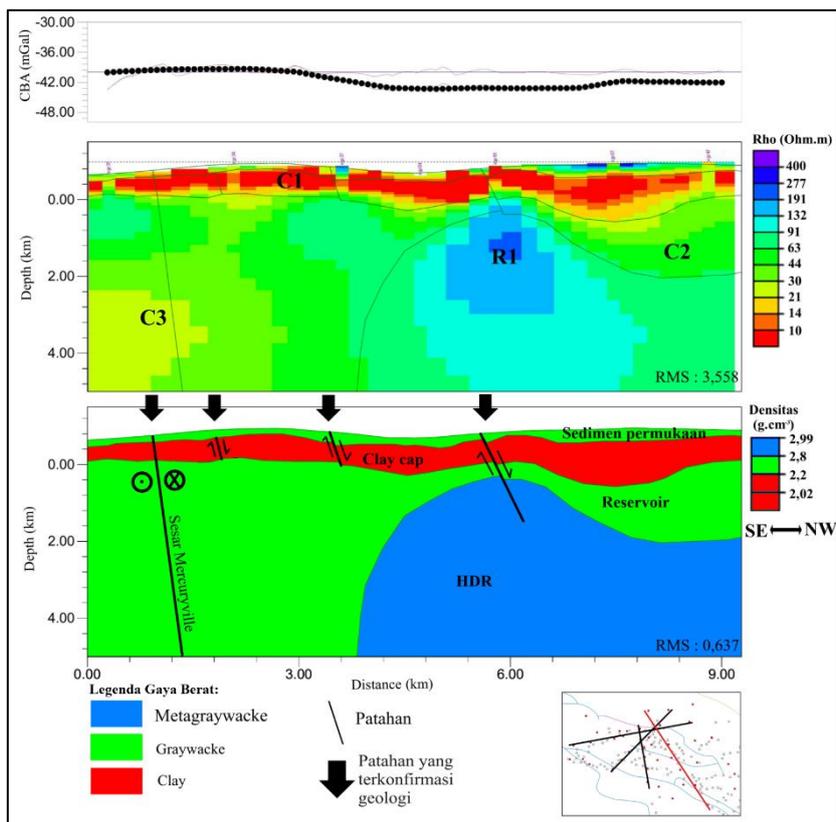
Lintasan 4 merupakan lintasan dengan jarak horizontal terpendek dibandingkan dengan ketiga lintasan sebelumnya, yaitu sekitar 5,6 km dan berada ditengah daerah penelitian. Model lintasan 4 ditunjukkan pada **Gambar 15** di bawah. Berdasarkan hasil pemodelan-nya, terdapat tiga buah struktur patahan yang ada pada lintasan 4. Patahan dengan kedalaman sekitar 5 km merupakan kemenerusan dari Sesar Mercuryville yang melewati lintasan 2 dan 3. Batuan *metagraywacke* pada lintasan 4 bisa ditemukan di sepanjang lintasan dengan kedalaman sekitar 1,4 – 2,5 km dan menunjukkan bahwa pada daerah tersebut zona reservoirnya didominasi oleh batuan *HDR*. Zona reservoir pada lintasan ini memiliki ketebalan sekitar 0,4 – 0,8 km dengan kedalaman 1 km dan terlihat lebih tipis jika dibandingkan dengan lintasan sebelumnya. Kemudian, zona *clay cap* setiap lintasan memiliki ketebalan yang sama termasuk juga pada lintasan 4 yaitu sekitar 0,8 km dan bisa ditemukan pada kedalaman 0,4 – 0,6 km dari permukaan. Nilai *RMSE* yang diperoleh dari model lintasan 4 cukup rendah yaitu sebesar 0,584%.



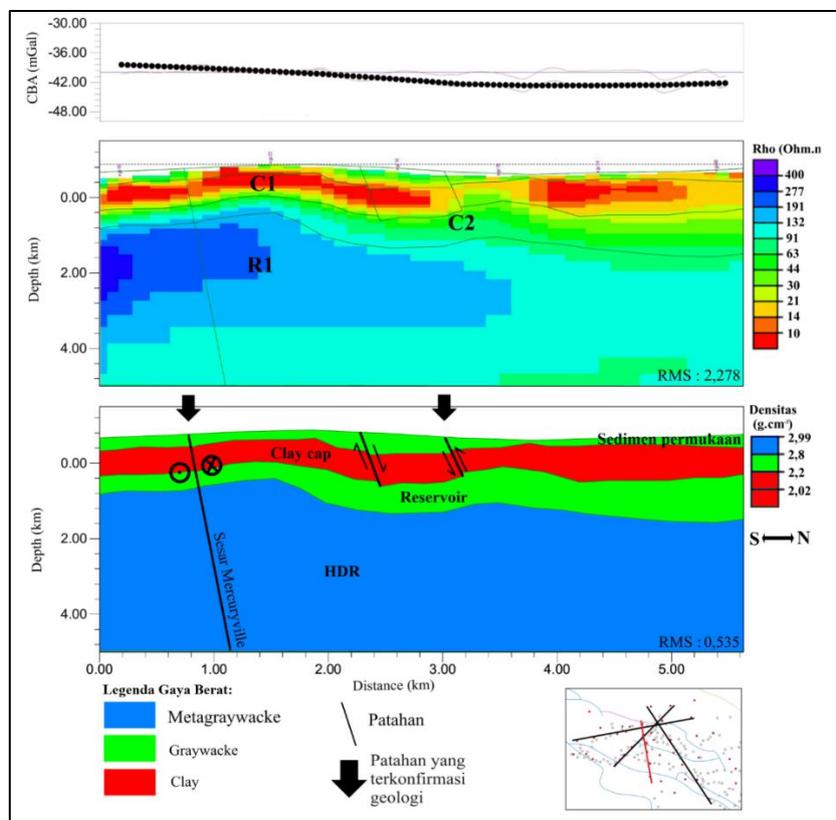
Gambar 12. Korelasi model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik dan data gaya berat lintasan 1.



Gambar 13. Korelasi model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik dan data gaya berat lintasan 2.

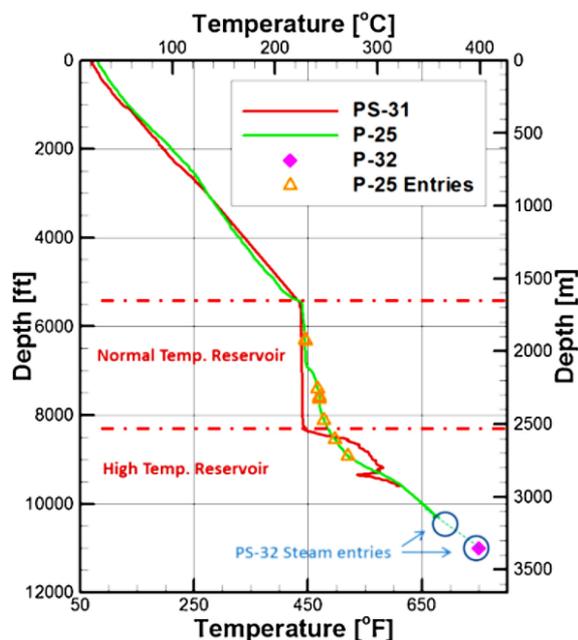


Gambar 14. Korelasi model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik dan data gaya berat lintasan 3



Gambar 15. Korelasi model 2-D bawah permukaan data magnetotellurik dan data gaya berat lintasan 4.

Jika model bawah permukaan dikorelasikan dengan peningkatan temperatur terhadap kedalaman, maka akan terlihat kesesuaian dimana pada kedalaman sekitar 2,5 km terjadi peningkatan temperatur hingga 300 °C, seperti ditunjukkan pada **Gambar 16**.



Gambar 16. Grafik peningkatan temperatur terhadap kedalaman pada daerah penelitian (Garcia dkk., 2012).

Peningkatan temperatur tersebut sesuai dengan perkiraan HDR oleh Garcia dkk. (2012); Garcia dkk. (2016); dan Rutqvist dkk. (2016), dimana model menunjukkan bahwa pada kedalaman sekitar 2,5 km merupakan zona batuan *metagraywacke*. Dengan demikian, zona HDR pada lokasi penelitian yaitu bagian barat laut lapangan panas bumi The Geysers merupakan peran dari batuan *metagraywacke* itu sendiri. Kedalaman rata-rata diidentifikasi adanya batuan *metagraywacke* di setiap lintasan pada zona reservoir adalah 1,5 – 2 km dari permukaan.

KESIMPULAN

Arah *geolectrical strike* daerah penelitian dominan ke arah N145°E dan jenis dimensionalitasnya 2-D. Hasil pemodelan 2-D magnetotellurik menunjukkan bahwa lapisan dengan resistivitas <30 Ohm.m dapat diidentifikasi sebagai lapisan lempung (*clay cap*), lapisan yang diidentifikasi sebagai reservoir utama merupakan jenis batupasir graywacke yang memiliki nilai rentang resistivitas 30 – 90 Ohm.m, dan batuan *metagraywacke* dengan nilai

resistivitas 90 – 300 Ohm.m yang diduga berperan sebagai HDR pada zona reservoir. Selanjutnya, hasil korelasi model data magnetotellurik dengan gaya berat menunjukkan bahwa kedalaman rata-rata lapisan lempung adalah 0,2 km dengan ketebalan sekitar 0,8 – 1 km. Zona reservoir berada pada kedalaman rata-rata 1 km dengan ketebalan bervariasi yaitu sekitar 0,4 – 1,8 km dan batuan *metagraywacke* yang diduga berperan sebagai HDR rata-rata ditemukan pada kedalaman 1,5 – 2,5 km dari permukaan. Kemenerusan Sesar Mercuryville bisa ditemukan di model lintasan 2, 3, dan 4 dengan kedalaman mencapai 5 km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada saudara Jared Peacock sebagai seorang ahli geofisika riset di Pusat Sains Geologi, Mineral, Energi, dan Geofisika di Menlo Park, CA, yang telah mempublikasikan data magnetotellurik dan gaya berat di website *United States Geological Survey (USGS)*, sehingga bisa digunakan penulis dalam penelitian ini untuk keperluan edukasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Caldwell, T.G., Bibby, H.M., dan Brown, C., 2004. The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), hal.457–469. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02281.x>
- Chapman, R.H., 1966. Gravity map of The Geysers area, California. *California Division of Mines and Geology, Mineral Information Service*, 19, hal.148–149.
- Chin, J.L., Morrow, J.R., Ross, C.R., dan Clifton, H.E., 1993. *Geologic maps of Upper Cenozoic deposits in central California*. U.S Geological Survey.
- USGS., 2023. *The Geysers Geothermal Field*. U.S Geological Survey. <https://www.usgs.gov/volcanoes/clear-lake-volcanic-field/science/geysers-geothermal-field>
- Dalrymple, G.B., Grove, M., Lovera, O.M., Harrison, T.M., Hulen, J.B., dan Lanphere, M.A., 1999. Age and thermal history of the Geysers plutonic complex (felsite unit), Geysers geothermal field, California: A 40Ar/39Ar and U-Pb study. *Earth and*

- Planetary Science Letters*, 173(3), 285–298. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00223-X](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00223-X)
- DeCourten, F., 2008. *Geology of Northern California*. Department of Earth Science Sierra College.
- Febrika, G.Y., Setyawan, A., Nurwidyanto, M.I., Raharjo, I.B., dan Agung, L., 2017. Identifikasi Geological Strike dan Dimensionalitas Berdasarkan Analisis Phase Tensor untuk Pemodelan 2-D Magnetotellurik di Lapangan Panas Bumi “GYF”. *Youngster Physics Journal*, 6(2), hal.115–122.
- Garcia, J., Hartline, C., Walters, M., Wright, M., Rutqvist, J., Dobson, P.F., dan Jeanne, P., 2016. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California: Part 1: Characterization and reservoir response to injection. *Geothermics*, 63, hal.97–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.08.003>
- Garcia, J., Walters, M., Beall, J., Hartline, C., Pingol, A., Pistone, S., dan Wright, M., 2012. Overview of the Northwest Geysers EGS Demonstration Project. *Proceedings of the 37th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Grandis, H., Sudarman, S., dan Hendro, A., 2002. Aplikasi Metoda Magnetotellurik (MT) dalam Eksplorasi Geotermal. *Geoforum HAGI Bandung*, 1.
- Harahap, Z.A., Haryanto, A.D., Firmansyah, Y., dan Alfadli, M.K., 2022. Determinasi Zona Reservoir Dengan Data Magnetotellurik Di Zona Prospek Panas Bumi Telaga Ngebel, Jawa Timur. *Padjadjaran Geoscience Journal*, 6(2), hal.803–811.
- Hartline, C.S., Walters, M.A., Wright, M.C., Forson, C.K., dan Sadowski, A.J., 2016. Three-dimensional structural model building constrained by induced seismicity alignments at the Geysers geothermal field, Northern California. *41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, CA*, 1–12.
- Irawati, S.M., Hidayat, Wijanarko, E., dan Grandis, H. (2022). Integrated Magnetotelluric (MT), Gravity and Seismic Study of Lower Kutai Basin Configuration. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 54(1), hal.27–41. DOI: <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2022.54.1.3>
- Jeanne, P., Rutqvist, J., Vasco, D., Garcia, J., Dobson, P.F., Walters, M., Hartline, C., dan Borgia, A., 2014. A 3D hydrogeological and geomechanical model of an Enhanced Geothermal System at The Geysers, California. *Geothermics*, 51, hal.240–252. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.013>
- Marwan, Yanis, M., Zahratunnisa, Idroes, R., Nugraha, G. S., Dharma, D.B., Susilo, A., Saputra, D., Suriadi, dan Paembonan, A.Y., 2022. Geothermal Reservoir Depth of Seulawah Agam Volcano Estimated From 1-D Magnetotelluric. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(3), 754–764.
- Niasari, S.W., 2016. A short introduction to geological strike and geo-electrical strike. *AIP Conference Proceedings*, 1755. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4958531>
- Olhoeft, G.R., 1981. Electrical properties of granite with implications for the lower crust. *Journal of Geophysical Research*, 86(B2), hal.931–936. DOI: <https://doi.org/10.1029/JB086iB02p00931>
- Peacock, J.R., Mangan, M.T., Walters, M., Hartline, C., Glen, J.M.G., Earney, T.E., dan Schermerhorn, W.D., 2019. Geophysical characterization of the heat source in the Northwest Geysers, California. *44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*.
- Rodi, W. dan Mackie, R.L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. *Geophysics*, 66(1), hal.174–187. DOI: <https://doi.org/10.1190/1.1444893>
- Romero, A.E., McEvelly, T.V., Majer, E.L., dan Vasco, D., 1995. Characterization of the geothermal system beneath the Northwest Geysers steam field, California, from seismicity and velocity patterns. *Geothermics*, 24(4), hal.471–487. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(95\)00003-9](https://doi.org/10.1016/0375-6505(95)00003-9)
- Rutqvist, J., Jeanne, P., Dobson, P. F., Garcia, J., Hartline, C., Hutchings, L., Singh, A., Vasco, D.W., dan Walters, M., 2016. The Northwest Geysers EGS Demonstration Project, California – Part 2: modeling and interpretation. *Geothermics*, 63, hal.120–138.

DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.08.002>

- Sari, D.P., Daud, Y., dan Siagian, H., 2023. The Characteristics Of Base Of Conductor In X Geothermal Field Based On The Magnetotelluric And Well Data. *Buletin Sumber Daya Geologi*, 18(1), hal.15–26. DOI: <https://doi.org/10.47599/bsdg.v18i1.362>
- Simpson, F. dan Bahr, K., 2005. Practical magnetotellurics. In *The Press Syndicate Of The University Of Cambridge* (Vol. 9780521817).
- Stanley, W.D., Benz, H.M., Walters, M.A., Villasenor, A., dan Rodriguez, B.D., 1998. Tectonic controls on magmatism in the Geysers-Clear Lake region: Evidence from new geophysical models. *Bulletin of the Geological Society of America*, 110(9), 1193–1207. DOI: [doi.org/10.1130/0016-7606\(1998\)110<1193:TCOMIT>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1998)110<1193:TCOMIT>2.3.CO;2)
- Stanley, W.D., dan Blakely, R.J., 1995. The Geysers-Clear Lake geothermal area, California-An updated geophysical perspective of heat sources. *Geothermics*, 24(2), hal.187–221. DOI: [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(94\)00048-H](https://doi.org/10.1016/0375-6505(94)00048-H)