

Pemodelan 2 dimensi data magnetotellurik berdasarkan analisis *phase tensor* dalam penentuan *geolectrical strike* dan dimensionalitas data di Lapangan Panas Bumi “X”

Fitra Ramdhani¹⁾, Agus Setyawan¹⁾, Imam B. Raharjo²⁾, Lendriadi A.²⁾

¹⁾ Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

²⁾ Fungsi Exploration & Exploitation PT Pertamina Geothermal Energy, Jakarta Pusat

E-mail: fitraramdhani@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Magnetotelluric research has been done on the geothermal field "X" aims to indentify dimensionality of data, direction of *geolectrical strike* and map resistivity distribution of subsurface structure. Before modelling 2 dimensional subsurface structure, MT data must go through stage quality control data, analysis of dimensionalitas data and analysis direction of *geolectrical strike* to get 2 dimensional structure model of the subsurface are accurate. The stages of quality control data was done by eliminate the points in the curve of resistivity and phase which out of the trend that is considered as noise. Dimensionality data analysis use curve of three parameters invariant phase tensor i.e phi maximum, phi minimum and beta. Analysis of the *geolectrical strike* direction was done by showing a reduction of angle α and β in rose diagram. Overall the analysis phase tensor was performed on 60 tensor magnetotelluric data in the geothermal field "X". Modeling subsurface resistivity structure use the scheme forward modelling and inverse modelling. The results of selection cross power showed that magnetotelluric data are dominated by good quality data. The results of dimensionality data analysis indicates that the dimensionality data of MT data in the geothermal field "X" consists of structure with dimensionality 1D, 2D and 3D structure. Structure with dimensionality 1D is in frequency range 320 – 44 Hz, Structure with dimensionality 2D is in frequency range 44 – 0,3 Hz and structure with dimensionality 3D is in frequency range 0.3 – 0.004 Hz in the geothermal field "X". Rose diagram in frequency range 320 – 0.3 Hz was combined with direction of regional structure in geothermal field "X" indicates that the direction of *geolectrical strike* is N330°E. 2 dimensional modeling has been done in the frequency range 320 – 0,3 Hz. Data is rotated in the direction of *geolectrical strike* before the modeling stage. 2 dimensional model consisting of five line perpendicular to the direction of the structure in the field. 2 dimensional model show caprock layer has s resistivity range 5-20 Ohm-m that thicken to the Northwest while the reservoir layer has a resistivity range 80-120 Ohm-m are thinned to the Northwest. The heat source has a resistivity range 400-500 Ohm-m and located at depth 3.5 km below the surface.

Keywords: Dimensionality, *geolectrical strike*, distortion, model 2 dimensi

ABSTRAK

Penelitian magnetotellurik telah dilakukan di lapangan panas bumi “X” bertujuan untuk mengidentifikasi dimensionalitas data, arah *geolectrical strike* dan memetakan distribusi resistivitas struktur bawah permukaan di lapangan panas bumi tersebut. Sebelum melakukan pemodelan 2 dimensi perlu dilakukan tahap quality control data, analisis dimensionalitas data dan analisis arah *geolectrical strike* untuk mendapatkan model 2 dimensi struktur bawah permukaan yang akurat. Tahap quality control data dilakukan dengan cara menghilangkan titik – titik dalam kurva resistivitas semu dan fase yang keluar dari trend yang dianggap sebagai noise. Analisis dimensionalitas data menggunakan tiga parameter invarian phase tensor (phi maksimum, phi minimum dan beta). Analisis arah *geolectrical strike* dilakukan dengan cara menampilkan hasil pengurangan sudut α dan β dalam bentuk diagram rose. Keseluruhan analisis phase tensor dilakukan pada 60 data magnetotellurik di lapangan panas bumi “X”. Pemodelan struktur resistivitas bawah permukaan dilakukan menggunakan skema forward modelling dan inverse modelling. Hasil seleksi cross power menunjukkan bahwa data magnetotellurik didominasi dengan kualitas data yang baik. Hasil analisis dimensionalitas data menunjukkan bahwa dimensionalitas data MT di lapangan panas bumi “X” terdiri dari struktur dengan dimensionalitas 1D, 2D dan 3D. Struktur dengan dimensionalitas 1D berada pada rentang frekuensi 320 – 44 Hz, struktur dengan dimensionalitas 2D berada pada rentang frekuensi 44 – 0,3 Hz dan struktur dengan dimensionalitas 3D berada pada rentang frekuensi 0,3 – 0,004 Hz di lapangan panas bumi “X”. Diagram rose pada rentang frekuensi 320 – 0,3 Hz yang dikombinasikan dengan arah struktur regional di lapangan panas bumi “X” menunjukkan bahwa arah *geolectrical strike* memiliki arah N330°E. Pemodelan 1 dan 2 dimensi hanya dilakukan pada rentang frekuensi 320 –

0,3 Hz. Data dirotasi ke arah geoelectrical strike sebelum masuk tahap pemodelan. Model 2 dimensi terdiri dari lima lintasan yang tegak lurus dengan arah struktur di lapangan. Model 2 dimensi menunjukkan lapisan batuan penudung yang memiliki nilai resistivitas 5 - 20 Ohm-m yang menebal ke arah Barat Laut sedangkan lapisan reservoir memiliki nilai resistivitas 80 - 120 Ohm-m yang menipis ke arah Barat Laut. Sumber panas memiliki rentang resistivitas 400 - 500 Ohm-m dan terletak di kedalaman 3,5 km di bawah permukaan.

Kata Kunci: Dimensionalitas, geoelectrical strike, distorsi, model 2 dimensi.

PENDAHULUAN

Indonesia terletak di zona subduksi lempeng samudera Indonesia – Australia yang menunjam ke bawah lempeng benua Eurasia. Sistem subduksi membentuk busur vulkanik aktif di sepanjang pulau sumatera jawa dan celebes. Terdapat 324 lokasi yang dianggap sebagai lapangan panas bumi yang berpotensi salah satunya lapangan panas bumi “X” [1]. Beberapa manifestasi berupa mata air panas, fumarol, tanah beruap dan kolam lumpur muncul di lapangan panas bumi “X” sebagai petunjuk adanya suatu sistem panas bumi.

Parameter fisika yang dapat digunakan untuk memetakan distribusi komponen penyusun suatu sistem panas bumi seperti batuan penudung, *reservoir*, sumber panas dan struktur yang permeabel adalah parameter resistivitas. Metode magnetotellurik merupakan metode yang dapat memetakan distribusi resistivitas struktur bawah permukaan melalui pengukuran medan listrik dan medan magnet di permukaan. Penelitian magnetotellurik telah dilakukan di lapangan panas bumi “X” bertujuan untuk memetakan distribusi resistivitas struktur bawah permukaan di lapangan panas bumi tersebut. Sebelum melakukan pemodelan 2 dimensi struktur bawah permukaan perlu dilakukan tahap *quality control data*, analisis dimensionalitas data dan analisis arah *geoelectrical strike* untuk mendapatkan model 2 dimensi struktur bawah permukaan yang akurat.

Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik adalah sebuah teknik eksplorasi geofisika pasif yang

menggunakan ineraksi gelombang elektromagnetik dengan bumi untuk memberikan gambaran tentang distribusi sifat listrik batuan di bawah permukaan bumi. Osilasi elektromagnetik yang digunakan dalam metode magnetotellurik memiliki rentang periode $10^{-5} - 10^5$ detik. Rentang periode yang cukup luas menyebabkan metode magnetotellurik mampu untuk memetakan struktur yang sangat dalam. Metode magnetotellurik didasarkan pada pengukuran secara simultan dari medan elektromagnetik total yaitu medan magnet dan medan listrik terinduksi yang bervariasi terhadap waktu ($\vec{E}(t)$ dan $\vec{B}(t)$).

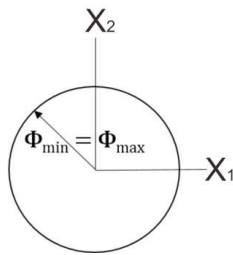
Analisis Phase Tensor

Phase tensor adalah rasio bilangan real (X) dan imajiner (Y) dari bilangan kompleks tensor impedansi (Z). *Phase tensor* dapat diilustrasikan sebagai sebuah elips yang terdiri dari sudut α_p yang bukan rotasional invarian, dan tiga parameter rotasi invarian yaitu sumbu maksimum (Φ_{maks}), minimum (Φ_{min}) dan *skew angle phase tensor* (β) [2].

$$\Phi = \mathbf{X}^{-1}\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} \Phi_{xx} & \Phi_{xy} \\ \Phi_{yx} & \Phi_{yy} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Phase Tensor pada Struktur 1 Dimensi

Jika struktur konduktivitas hanya bervariasi terhadap kedalaman (1D), *phase tensor* memiliki bentuk diagonal dengan nilai dua komponen sumbu maksimum dan minimum sama sehingga elips *phase tensor* berbentuk bulat. *Skew angle phase tensor* tidak terdefinisi ($\beta = 0$) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



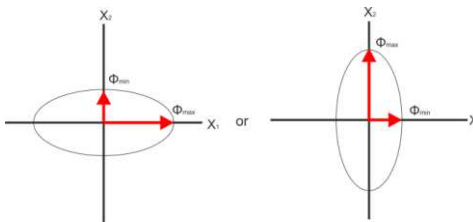
Gambar 1. Phase tensor elips 1D [3]

Phase Tensor pada Struktur 2 Dimensi

Dalam kasus 2D, *phase tensor* memiliki komponen diagonal, tetapi komponen sumbu maksimum dan minimum memiliki nilai yang berbeda sehingga elips *phase tensor* berbentuk elips seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. *Phase tensor* dalam struktur 2D didefinisikan ke dalam Persamaan (2).

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{\perp} & 0 \\ 0 & \Phi_{\parallel} \end{bmatrix} \text{ atau } \begin{bmatrix} \Phi_{\parallel} & 0 \\ 0 & \Phi_{\perp} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Skew angle phase memiliki nilai ($\beta = 0$) sehingga arah dari sumbu utama *phase*



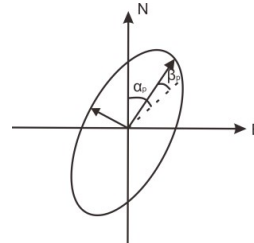
Gambar 2. Phase tensor elips 2D

tensor tergantung pada sudut α_p . Jika elips *phase tensor* diletakan dalam koordinat dimana terdapat sumbu X_1 dan X_2 . Sumbu X_1 sejajar dengan arah *strike* regional. Arah sumbu utama *phase tensor* memiliki faktor ambiguitas sebesar 90° tergantung fase TE atau TM yang dominan.

Phase Tensor pada Struktur 3 Dimensi

Dalam kasus 3D, elips *phase tensor* menunjukkan bentuk elips karena sumbu maksimum dan minimum memiliki nilai yang

berbeda tetapi memiliki nilai *skew angle phase tensor* ($\beta \neq 0$) umumnya memiliki nilai lebih dari 3° . Sehingga sudut α_p tidak dapat diidentifikasi sebagai arah *strike* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Phase tensor elips 3D

Diagram Rose

Diagram rose adalah diagram yang menyajikan data dalam bentuk 1 lingkaran penuh, dimana diagram rose umumnya menyajikan data berupa arah kelurusan dari data struktur dan tabulasi dimulai $0^\circ - 360^\circ$. Diagram rose dalam penelitian ini akan menyajikan data berupa sudut antara sumbu utama elips *phase tensor* terhadap arah *geoelectrical strike* yaitu sudut $\alpha_p - \beta$ seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dalam kasus 2D nilai $\beta = 0$, sehingga data yang ditampilkan dalam diagram rose merupakan sudut α_p . Informasi arah *geoelectrical strike* dapat diketahui dari nilai sudut α_p yang dominan dalam diagram rose. Sama halnya seperti *phase tensor*, diagram rose juga memiliki ambiguitas sebesar 90° . Sehingga masih harus dibandingkan dengan informasi struktur dari peta geologi regional.

Kombinasi antara analisis sudut α_p dan informasi struktur dari peta geologi regional diharapkan mampu untuk mengetahui arah *geoelectrical strike* struktur 2D. Informasi arah *geoelectrical strike* akan digunakan untuk merotasi data MT sebelum dilakukan pemodelan.

Pemodelan Data Magnetotellurik

Pemodelan adalah tahap akhir dalam analisis data MT. Pemodelan data MT dapat menggunakan skema *forward modelling* dan *inversi*. Beberapa algoritma *forward modelling*

menggunakan *finite element* atau solusi numerik *finite difference* untuk model konduktivitas isotropik dalam 1D, 2D atau 3D [4]. Dalam penelitian ini kode menggunakan metode *least square* untuk inversi 1D [5]. Ide dari metode *least square* adalah meminimalisasi perbedaan antara data observasi (d) dengan data prediksi (A_m) seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$f(m) = \|(A_m - d)^2\| = \min \quad (1)$$

METODE PENELITIAN

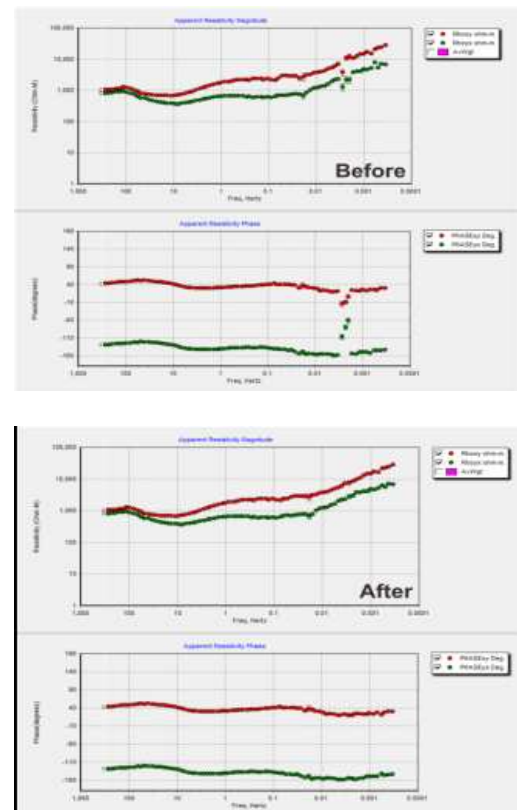
Penelitian ini menggunakan data sekunder milik PT. Pertamina Geothermal Energy. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data magnetotellurik yang berformat *.MTL dan *.MTH hasil proses *fourier transform* dan *.EDI file yang terkoreksi statik. Data *.MTL dan *.MTH dimasukkan ke dalam *software* MT Editor untuk melakukan tahap *editing* kurva resistivitas semu dan fase. Kurva resistivitas semu dan fase yang sudah memiliki *trend smooth* dilakukan proses koreksi statik. Proses koreksi statik dilakukan oleh PT. Pertamina Geothermal Energy. Sehingga penulis mendapatkan data *.EDI file yang terkoreksi statik. Data tersebut kemudian menjadi inputan dalam proses analisis *phase tensor* menggunakan *coding* Matlab untuk mendapatkan informasi dimensionalitas data dan *geolectrical strike*. Tahap selanjutnya adalah melakukan pemodelan 2D menggunakan *software* Truleka milik PT. Pertamina Geothermal Energy dengan prinsip *forward modelling*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan Data

Kurva resistivitas semu dan fase yang didapatkan umumnya memiliki tren yang acak akibat kehadiran *noise* dalam data tersebut. Oleh karena itu dilakukan proses *editing* kurva

menggunakan seleksi *cross power* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



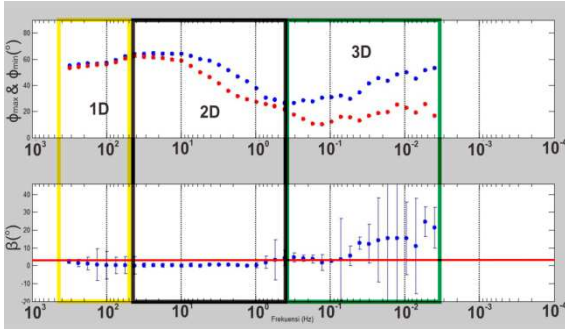
Gambar 4. Kurva resistivitas semu dan fase sebelum dan sesudah dilakukan proses seleksi *cross power*

Analisis dimensionalitas data

Kombinasi analisis dari tiga parameter invarian *phase tensor* dapat digunakan dalam menganalisis rentang frekuensi untuk struktur 1D, 2D dan 3D data magnetotellurik di suatu lapangan seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dan Tabel 1.

- Karakteristik struktur 1D adalah memiliki nilai sumbu maksimum dan minimum yang sama dan nilai beta ($\beta = 0$).
- Karakteristik struktur 2D adalah memiliki nilai sumbu maksimum dan minimum yang berbeda dan nilai beta ($\beta = 0$).

- Karakteristik struktur 3D adalah memiliki nilai sumbu maksimum dan minimum yang berbeda dan nilai beta ($\beta \neq 0$).



Gambar 5. Kurva phi maksimum, minimum dan beta.

Tabel 1. Rentang frekuensi struktur 1D, 2D dan 3D

Struktur	Frekuensi (Hz)
1D	320 – 44
2D	44 - 0,3
3D	0,3 – 0,004

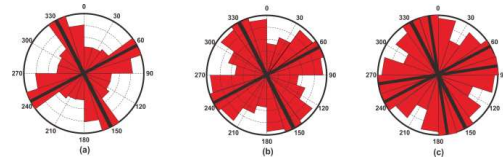
Geoelectrical strike

Diagram rose dikelompokkan menggunakan acuan rentang frekuensi hasil analisis dimensionalitas data. Kemudian dibandingkan untuk menentukan arah *geoelectrical strike* struktur 2D lapangan panas bumi “X”.

- Pada rentang frekuensi 320-44 Hz yang merefleksikan struktur dalam. Diagram rose menunjukkan dua arah *geoelectrical strike* yang dominan yaitu, N330°E dan N60°E seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.
- Pada rentang frekuensi 44 – 0,3 Hz yang merefleksikan struktur antara dangkal dan dalam. Diagram rose menunjukkan dua arah *geoelectrical strike* yang dominan yaitu, N330°E dan N60°E.
- Pada rentang frekuensi 0,3 – 0,004 Hz yang merefleksikan struktur dalam. Diagram rose menunjukkan empat arah *geoelectrical strike* yang dominan yaitu, N330°E N350°E, N60°E

dan N80°E. Banyaknya arah *geoelectrical strike* yang didapat disebabkan pada rentang frekuensi ini merupakan struktur 3D. Secara teori, struktur 3D tidak memiliki arah *geoelectrical strike* karena konduktivitas bervariasi ke segala arah (x, y, z).

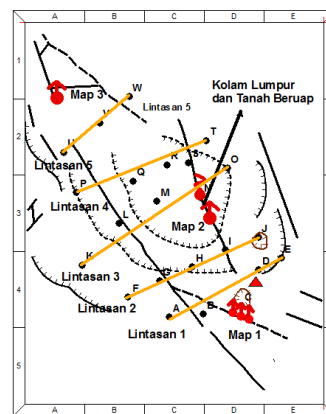
Hasil diagram rose pada rentang frekuensi 320 – 44 Hz dan 44 – 0,3 Hz dikombinasikan dengan informasi arah struktur regional dari peta geologi dapat disimpulkan bahwa arah *geoelectrical strike* dari lapangan panas bumi “X” adalah N330°E.



Gambar 6. Diagram rose. (a) frekuensi 320 – 44 Hz (b) frekuensi 44 – 0,3 Hz (c) 0,3 – 0,004 Hz

Pemodelan Data Magnetotellurik

Sebelum dilakukan pemodelan, data magnetotellurik dirotasi ke arah *geoelectrical strike* sebesar N330°E. Data pengukuran MT dibagi menjadi lima lintasan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

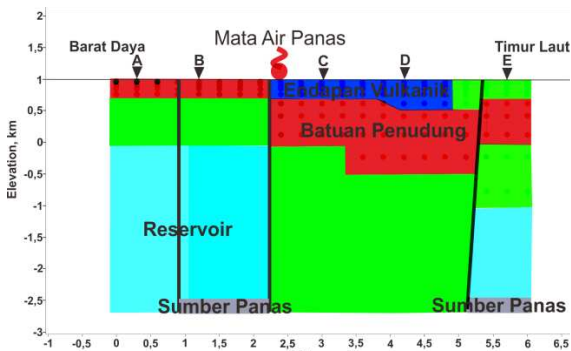


Gambar 7. Peta lintasan pengukuran

- : Patahan
- ++++ : Kaldera
- ⊗ : Kawah
- ⬆ : Mata Air Panas
- : Lintasan Pengukuran

Lintasan 1

Lintasan 1 memotong struktur patahan *strike-slip* diantara titik A dan B yang ditandai dengan garis hitam. Patahan *strike-slip* merupakan patahan yang bergerak satu sama lain ke arah horisontal, sehingga diantara titik A dan B tidak menunjukkan adanya ciri-ciri patahan pada umumnya.

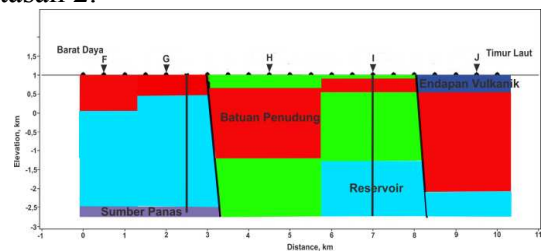


Gambar 8. Model 2 dimensi lintasan 1

Tidak jauh dari patahan *strike-slip* terdapat patahan yang tidak pasti (peta geologi regional) yang menyebabkan keluarnya manifestasi mata air panas di permukaan. Namun model 2 dimensi membuktikan bahwa diantara titik B dan C memang terdapat diskontinuitas yang diindikasikan sebagai patahan. Struktur kaldera digambarkan dengan baik yang terletak diantara titik D dan E. Struktur konduktif memiliki nilai resistivitas 5 – 20 Ohm-m yang ditandai dengan warna merah berada pada kedalaman dangkal dan menebal ke arah timur laut dan diinterpretasikan sebagai batuan penudung. Struktur resistif yang ditandai dengan warna biru tua diinterpretasikan sebagai endapan vulkanik hasil letusan gunung api di lapangan panas bumi “X”. Struktur yang ditandai dengan warna hijau dengan nilai resistivitas 20 – 70 Ohm-m merupakan zona transisi antara lapisan batuan penudung dan lapisan reservoir. Lapisan reservoir terletak di kedalaman 1 km di bagian barat daya ditandai dengan warna biru muda.

Lintasan 2

Lintasan 2 memotong patahan *strike-slip* diantara titik G dan H yang ditandai dengan garis hitam. Selain, patahan *strike-slip* lintasan 2 juga memotong patahan di titik I. Struktur kaldera diantara titik I dan J digambarkan dengan baik pada model 2 dimensi di atas. Lapisan batuan penudung yang ditandai dengan warna merah menebal dan menipis ke arah timur laut dipengaruhi oleh keberadaan struktur. Lapisan reservoir yang ditandai dengan warna biru muda memiliki nilai resistivitas 80 -120 Ohm-m berada pada kedalaman 1,5 km di bagian barat daya lintasan 2.



Gambar 9. Model 2 dimensi lintasan 2

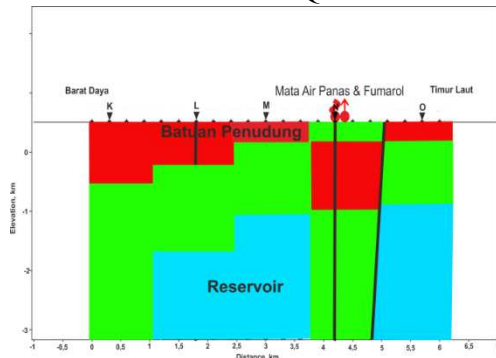
Lintasan 3

Lintasan 3 memotong struktur kaldera diantara titik K dan L tidak digambarkan dengan baik pada Gambar 10. Namun struktur kaldera diantara titik N dan O digambarkan dengan baik. Struktur patahan *strike-slip* terletak pada titik L yang ditandai dengan garis warna hitam. Patahan yang terletak di titik N menyebabkan keluarnya mata air panas dan fumarol di permukaan. Lapisan batuan penudung menebal dan menipis ke arah timur laut dipengaruhi oleh keberadaan struktur. Lapisan reservoir yang ditandai dengan warna biru muda memiliki rentang resistivitas 80-120 Ohm-m terletak pada kedalaman 1,5 km di bawah permukaan yang menipis dan menebal ke arah timur laut.

Lintasan 4

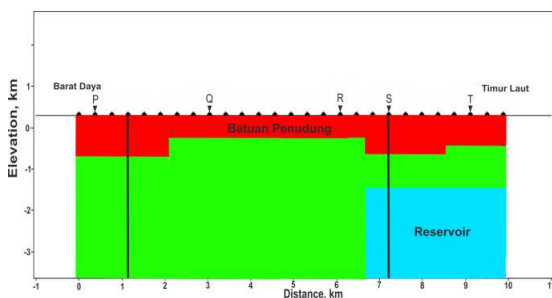
Sama halnya seperti lintasan 1, 2 dan 3. Lintasan 4 juga memotong struktur patahan *strike-slip*, patahan dan kaldera. Patahan *strike-*

slip terletak tepat diantara titik P dan Q. Patahan terletak tepat di titik S. Struktur kaldera yang terletak diantara titik P dan Q



Gambar 10. Model 2 dimensi lintasan 3

tidak tergambarkan dengan baik. Sedangkan, struktur kaldera yang terletak diantara titik S dan T tergambarkan dengan baik berbentuk *graben* dan *horst*. Lapisan batuan penudung memiliki ketebalan 3 km dan menipis ke arah timur laut. Lapisan reservoir yang ditandai dengan warna biru muda berada di bagian timur laut di titik S dan T terletak di kedalaman 1,75 km hingga kedalaman 3,25 km di bawah permukaan. Salah satu komponen penyusun sistem panas bumi yaitu sumber panas terlihat pada lintasan 4 di kedalaman 3,5 km di bawah permukaan yang memiliki nilai resistivitas 400 -500 Ohm-m.

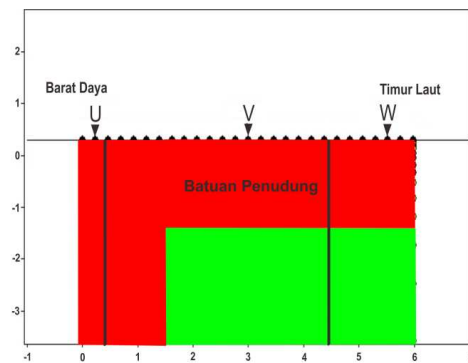


Gambar 11. Model 2 dimensi lintasan 4

Lintasan 5

Lintasan 5 didominasi oleh lapisan batuan penudung yang memiliki ketebalan sebesar 3,75 km dan menipis ke arah timur laut. Lapisan zona transisi dengan rentang nilai resistivitas 20 – 70 Ohm-m terletak pada kedalaman 1,5 km dibawah permukaan. Lintasan

5 memotong struktur berupa patahan *strike-slip* di bagian barat daya yang digambarkan dengan garis hitam. Model 2D lintasan 5 ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Model 2 dimensi lintasan 5

KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan di lapangan panas bumi “X” dapat disimpulkan bahwa rentang frekuensi untuk struktur 1D adalah 320 – 44 Hz, struktur 2D adalah 44 – 0,3 Hz dan struktur 3D adalah 0,3 – 0,004 Hz. Analisis *geolectrical strike* didukung dengan informasi arah struktur dari peta geologi regional menunjukkan bahwa arah *geolectrical strike* adalah N330°E. Metode magnetotellurik mampu memetakan komponen penyusun panas bumi di lapangan berdasarkan nilai resistivitas yaitu, batuan penudung (5-20 Ohm-m), reservoir (80-120 Ohm-m) dan sumber panas (400-500 Ohm-m). Lapisan batuan penudung dan reservoir memiliki ketebalan yang bervariasi dipengaruhi oleh keberadaan struktur di lapangan panas bumi “X” yang relatif menebal ke arah barat laut untuk lapisan batuan penudung dan relatif menipis ke arah barat laut untuk lapisan reservoir, Sumber panas hanya berada di kedalaman 3,5 km dibawah permukaan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Pertamina Geothermal Energy yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian tugas akhir serta izin publikasi hasil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ESDM (2012) *Program Pengembangan Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi (The program on the Development of New, Renewable Energy and Energy Conservation)*.
- [2] Caldwell, T. G., Bibby, H. M. dan Brown, C. (2004) *The magnetotelluric phase tensor*. Geophysical Journal International, Vol. 158, Hal. 457-469.
- [3] Castells, A. M. (2006) *A Magnetotellurics Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of Central Betic Crustal Structure*, Thesis Departemen de Geodinamica I Geofisica, Universitat de Barcelona, Barcelona.
- [4] Wannamaker, P., Stodt, J., dan Rijo, L. (1987) *A stable finite element solution for two dimensional magnetotelluric modelling*, Geophys J. R. Astr. Soc., 88 , 277-296.
- [5] Wannamaker, P.E. (1990) *Finite Element Program for Magnetotelluric Forward Modeling and Parameterized Inversion of Two-Dimensional Earth Resistivity Structure*, University of Utah Research Institute, 41.