

Identifikasi *geological strike* dan dimensionalitas berdasarkan analisis *phase tensor* untuk pemodelan 2D magnetotelurik di lapangan panas bumi “GYF”

Ganap Y. Febrika¹⁾, Agus Setyawan¹⁾, Muhammad Irham N.¹⁾, Imam B. Raharjo²⁾
dan 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: ganapyulianafebrika@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Magnetotellurics method is frequently used in exploration of geothermal resources for determining the subsurface resistivity distribution of the Earth. An accurate representation of the Earth's resistivity structure can be obtained by knowing the direction of geoelectrical strike and dimensionality structure prior to modelling. Besides those both cases, distortion in the data magnetotelluric can lead to errors of interpretation. Therefore, this study was conducted to identify the geoelectrical strike direction and dimensionality structure in the “GYF” geothermal field using phase tensor analysis prior to 2D modelling. Three invariant parameters of phase tensor i.e ellipticity, phase tensor skew angle (β) and Azimuth of phase tensor maximum ($\alpha-\beta$) are used to get the information about the dimensionality and geoelectrical strike direction on 65 magnetotelluric data in “GYF” geothermal field. Results of the phase tensor analysis show that the direction of geoelectrical strike is N60°W or 300° at frequency (10-0,2 Hz) and dimensionality of subsurface structure consists of a structure 1D, 2D and 3D. Structure of 1D and 2D is in the frequency range 320 to 0,2 Hz, while the 3D structure is at a low frequency, i.e $f < 0,2$ Hz. Identification of geoelectrical strike and dimensionality in 2D magnetotelluric modelling can minimize misinterpretation.

Keywords: Dimensionality, geoelectrical strike, distortion, phase tensor

ABSTRAK

Metode magnetotelurik sering digunakan dalam eksplorasi panas bumi untuk menentukan distribusi resistivitas bawah permukaan Bumi. Penggambaran yang akurat dari struktur resistivitas bawah permukaan Bumi dapat diperoleh dengan mengetahui terlebih dahulu arah geoelectrical strike dan struktur dimensionalitasnya sebelum dilakukan pemodelan. Selain kedua hal tersebut, adanya distorsi pada data magnetotelurik dapat menyebabkan kesalahan interpretasi. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi arah geoelectrical strike dan struktur dimensionalitas di lapangan panas bumi “GYF” dengan menggunakan analisa phase tensor sebelum dilakukan pemodelan 2D. Tiga parameter invarian dari phase tensor yaitu eliptisitas, sudut kemiringan phase tensor (β) dan azimuth dari phase tensor maksimum ($\alpha-\beta$) digunakan untuk memperoleh informasi mengenai dimensionalitas dan arah geoelectrical strike pada 65 data magnetotelurik di lapangan panas bumi “GYF”. Hasil analisa phase tensor menunjukkan bahwa geoelectrical strike berarah N60°W atau 300° pada frekuensi (10 - 0,2 Hz) dan dimensionalitas struktur bawah permukaan terdiri dari struktur 1D, 2D dan 3D. Struktur 1D dan 2D berada pada rentang frekuensi 320 – 0,2 Hz, sedangkan struktur 3D berada pada frekuensi rendah, yaitu $f < 0,2$ Hz. Identifikasi geoelectrical strike dan dimensionalitas dalam pembuatan model 2D magnetotelurik dapat meminimalisir kesalahan interpretasi.

Kata Kunci: Dimensionalitas, geoelectrical strike, distorsi, phase tensor.

PENDAHULUAN

Bagian terpenting dalam studi Magnetotelurik (MT) agar dapat diperoleh penggambaran yang akurat dari struktur resistivitas bawah permukaan Bumi adalah

dengan melakukan analisa dimensionalitas serta arah *geoelectrical strike* dari data yang terukur [1]. Akan tetapi, data yang diperoleh dari akuisisi di lapangan masih dapat dipengaruhi oleh adanya *noise* dan distorsi. Adanya distorsi pada data magnetotelurik

dapat menutupi dimensionalitas yang sebenarnya dari struktur resistivitas bawah permukaan Bumi hingga pada akhirnya dapat mengakibatkan terjadinya kesalahan interpretasi. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka diperlukan suatu analisa yang dapat mengidentifikasi dimensionalitas struktur bawah permukaan Bumi serta arah *geoelectrical strike* yang tidak dipengaruhi oleh distorsi elektromagnetik.

Phase tensor magnetotellurik diperkenalkan oleh [2], merupakan salah satu analisa yang dapat digunakan untuk menentukan dimensionalitas serta arah *geoelectrical strike* dari data MT. Dalam teorinya juga dijelaskan bahwa analisa *phase tensor* tidak dipengaruhi oleh adanya distorsi galvanic.

Beberapa studi MT di lapangan panas bumi "GYF" pernah dilakukan untuk mendapatkan hasil pemodelan struktur resistivitas bawah permukaan. Akan tetapi, belum ada penelitian yang menggunakan analisa *phase tensor* untuk mengidentifikasi dimensionalitas serta arah *geoelectrical strike* di daerah penelitian. Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi arah *geoelectrical strike* serta dimensionalitas berdasarkan analisa *phase tensor* sebelum dilakukan pemodelan 2D di lapangan panas bumi "GYF".

DASAR TEORI

Metode Magnetotellurik

Metode magnetotellurik (MT) adalah sebuah teknik eksplorasi geofisika pasif yang menggambarkan distribusi resistivitas Bumi [1]. Sinyal elektromagnetik yang digunakan dalam studi MT memiliki rentang periode gelombang mulai dari ($10^{-3} - 10^5$ s) sehingga memiliki penetrasi yang dalam [3]. Magnetotellurik didasarkan pada pengukuran bersama dari total medan elektromagnetik yang bervariasi waktu pada permukaan Bumi ($\mathbf{E}(t)$ dan $\mathbf{B}(t)$) [1]. Adapun untuk

memahami penjalaran gelombang elektromagnetik yang digunakan dalam metode magnetotellurik, terdapat beberapa asumsi yang berlaku [4], salah satu diantaranya ialah persamaan elektromagnetik Maxwell harus dipatuhi.

Analisis *Phase Tensor*

Phase tensor magnetotellurik diperkenalkan oleh [2], yang merupakan sebuah fase bilangan kompleks yang digambarkan dari perbandingan bagian riil dan imajiner. *Phase tensor* didefinisikan melalui Persamaan (1) [2].

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

dimana \mathbf{X} dan \mathbf{Y} merupakan bagian riil dan imajiner dari tensor impedansi kompleks \mathbf{Z} dan Φ adalah riil. *Phase tensor* memiliki sifat sebagai berikut: (i) tidak dipengaruhi oleh distorsi galvanic, (ii) sudut kemiringannya (β) bernilai nol ketika struktur dimensionalitasnya 2D, (iii) memberikan informasi mengenai arah *geoelectrical strike*.

Sebagai tensor komponen 4 riil, maka *phase tensor* memiliki 4 parameter yang saling berkaitan: satu sudut α_p , yang bukan rotasional invarian, dan tiga rotasional invarian: β_p , Φ_{\max} dan Φ_{\min} .

Phase Tensor dan Struktur Dimensionalitas

Parameter invarian dari *phase tensor*, diantaranya yaitu eliptisitas (Φ_{\max} dan Φ_{\min}) dan sudut kemiringan *phase tensor* (β) menentukan dimensionalitas dari tensor impedansi [2]. Apabila struktur 1D, maka Φ_{\max} dan Φ_{\min} akan bernilai sama, sehingga bentuk *phase tensor* akan menjadi lingkaran dengan β bernilai nol, untuk struktur 2D nilai $\Phi_{\max} \neq \Phi_{\min}$ sementara β masih bernilai nol dan untuk struktur 3D semua komponen dalam tensor impedansi masing-masing memiliki nilai dan $\beta \neq 0$. Dalam *paper*-nya [2] menginterpretasikan struktur 3D dengan nilai $\beta = 3^\circ$.

Distorsi Elektromagnetik

Kehadiran distorsi dalam data MT disebabkan oleh adanya inhomogenitas dekat permukaan dan topografi [5]. Berdichevsky, dkk. (1973) membagi proses distorsi MT menjadi dua efek utama, yakni efek galvanic dan efek induktif [5]. Efek galvanic terjadi ketika terdapat medium (2D atau 3D) yang relatif konduktif atau resistif dalam medium yang homogen, sehingga medan elektrik primer akan menghasilkan akumulasi muatan di kontras resistivitas. Selain itu, efek galvanic juga dapat dihasilkan oleh adanya beda topografi. Dalam medium 2D, efek topografi galvanic utamanya akan mempengaruhi mode TM dan konsentrasi muatan maksimum akan terjadi pada topografi yang curam [5]. Selanjutnya, efek induktif mengikuti aturan Hukum Faraday, yaitu medan magnetik yang bervariasi terhadap waktu menginduksi arus di batuan. Arus yang terinduksi kemudian menghasilkan medan magnetik sekunder yang akan mendistorsi medan magnetik primer.

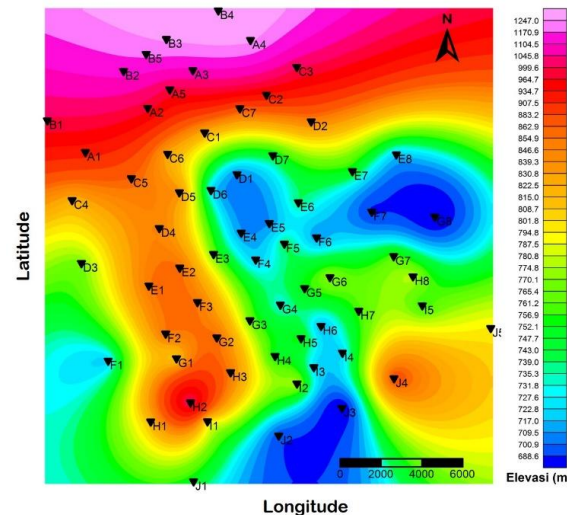
Induction vector

Induction vector menggambarkan perbandingan kompleks (terdiri dari bagian riil dan imajiner) dari medan magnetik vertikal H_z dan masing-masing komponen medan magnetik horizontal (H_x dan H_y). Terdapat 2 konvensi dalam *induction vector*, yaitu konvensi Parkinson dimana ujung panah vektor menuju ke konduktor dan konvensi Wiese dimana ujung panah vektor menjauh dari konduktor [3].

METODE PENELITIAN

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data magnetotellurik yang berformat EDI File milik PT Pertamina Geothermal Energy. Data yang diberikan terdiri dari 2 jenis data, yaitu data MT yang belum dilakukan koreksi *static shift* dan data MT yang sudah dilakukan koreksi *static shift*. Sebanyak 65

titik pengukuran di lapangan panas bumi "GYF" terbagi menjadi 10 lintasan berarah SW-NE yang ditunjukkan pada Gambar 1. Pada masing-masing titik pengukuran MT, diketahui terdapat 45 frekuensi yang dapat dianalisa.



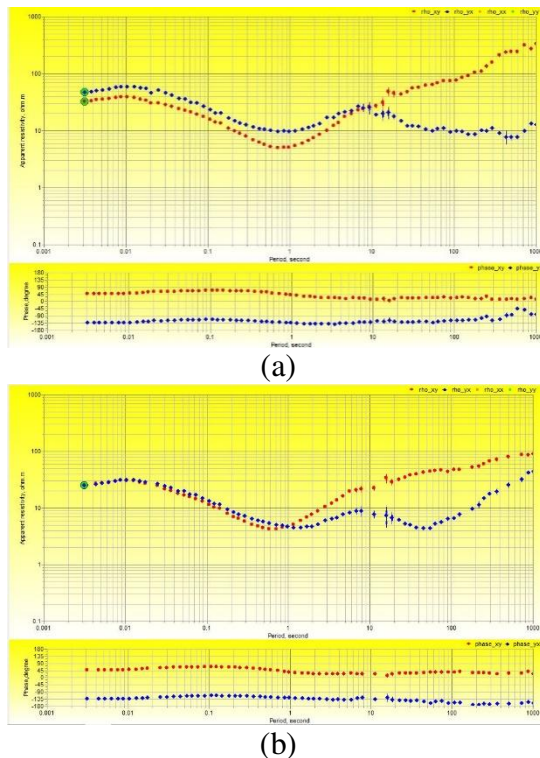
Gambar 1. Peta kontur elevasi daerah penelitian

Analisis *phase tensor* dilakukan terhadap kedua jenis data dengan menggunakan beberapa *coding* Matlab milik PT Pertamina Geothermal Energy. Selain menggunakan Matlab, kedua jenis data tersebut juga diolah dengan menggunakan beberapa *software* milik PT Pertamina Geothermal Energy untuk melihat kurva resistivitas semu vs periode, melakukan analisa *polar diagram*, serta melakukan pemodelan inversi 1D dan 2D.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kedua jenis data MT yang berformat .EDI memiliki perbedaan pada kedua kurva *apparent resistivity*. Perbedaan yang dimaksud adalah kedua kurva ρ_{xy} dan ρ_{yx} yang sebelumnya mengalami pergeseran secara vertikal (*shifting*) akibat pengaruh distorsi elektromagnetik menjadi berhimpit pada suatu nilai *apparent resistivity* ketika sudah terkoreksi *static*. Gambar 2 menunjukkan

perbandingan kurva MT sebelum (a) dan sesudah (b) terkoreksi *static shift*.



Gambar 2. Perbandingan kurva MT pada titik pengukuran B3 (a) sebelum terkoreksi *static shift* dan (b) sesudah terkoreksi *static shift*

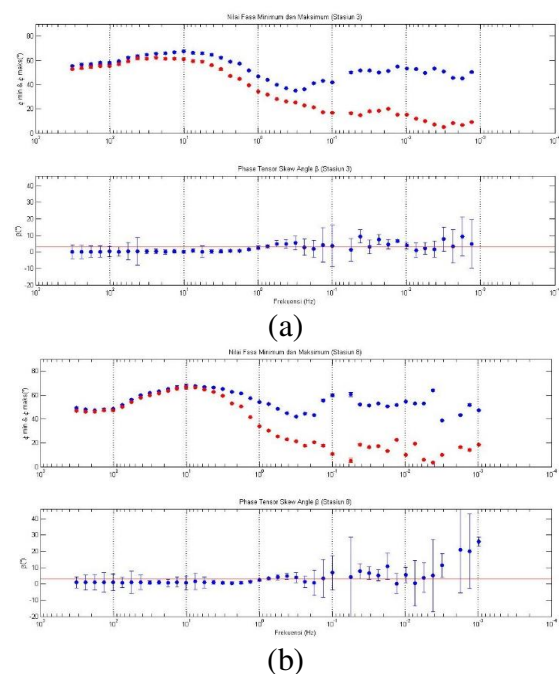
Analisis Geoelectrical Strike dan Dimensionalitas

Analisis ini dilakukan untuk menentukan apakah model resistivitas 1D, 2D, atau 3D yang diperlukan agar sesuai dengan data. Selain itu, pada struktur 2D, arah *geoelectrical strike* harus diketahui terlebih dahulu sebelum dilanjutkan ke tahapan pemodelan. Pada penelitian ini analisa utama yang digunakan ialah *phase tensor*. Selain itu, analisis *phase tensor* juga didukung oleh analisis yang lain, seperti *induction vector* dan *polar diagram*.

Phase Tensor

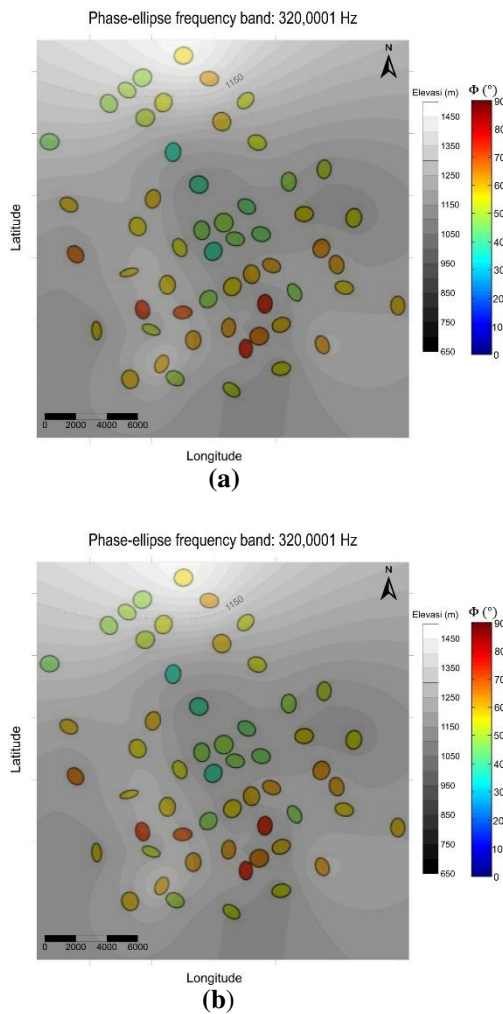
Analisis *phase tensor* dilakukan mulai dari frekuensi tinggi yaitu 320 Hz hingga frekuensi terendah yaitu 9,8995e-04. Pertama, dilakukan analisis dengan menggunakan

parameter kurva beta untuk mengetahui apakah pada daerah penelitian terdapat struktur 3D. Struktur 3D ditandai dengan nilai $\beta \geq 3^\circ$ [4]. Gambar 3 (a dan b) merupakan contoh tampilan kurva Φ_{maks} dan Φ_{min} serta kurva beta pada masing-masing titik pengukuran MT. Garis lurus yang berwarna merah pada kurva beta menunjukkan posisi nilai β sebesar 3° . Berdasarkan rata-rata nilai $\beta \geq 3^\circ$ dari semua titik pengukuran, diperoleh hasil struktur 3D pada daerah penelitian dimulai dari frekuensi 0,2 Hz hingga pada frekuensi terendah.



Gambar 3. Kurva Φ_{maks} dan Φ_{min} serta kurva beta pada beberapa titik pengukuran

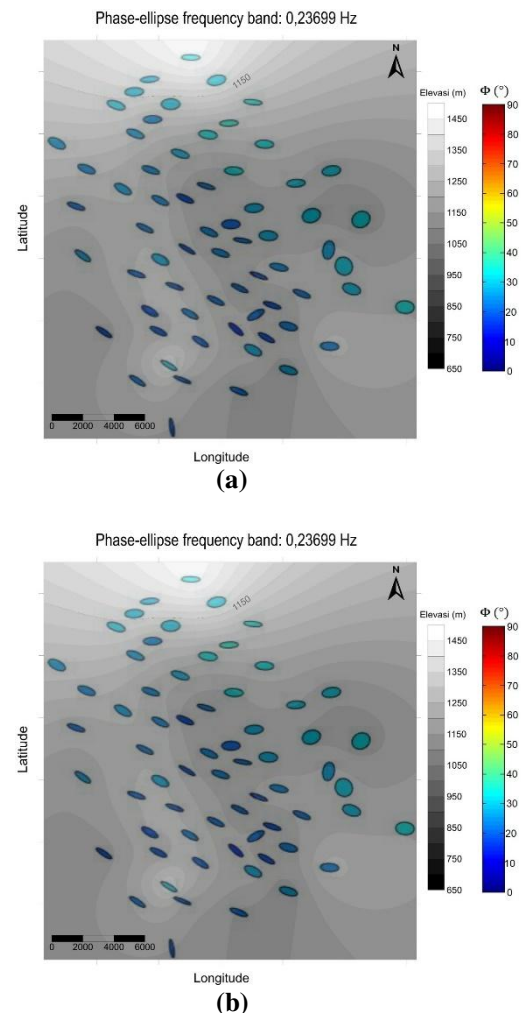
Peta *phase ellipse* di tiap frekuensi menggambarkan variasi lateral dari struktur resistivitas bawah permukaan Bumi. Hasil tampilan peta *phase ellipse* pada frekuensi tinggi 320 Hz (Gambar 4) dan pada frekuensi rendah 0,24 Hz (Gambar 5) menunjukkan tidak terdapat perbedaan antara *phase ellipse* sebelum terkoreksi *static shift* dan sesudah terkoreksi *static shift*. Hal ini sesuai dengan teori yang ada, yaitu bahwa *phase tensor* tidak terpengaruh oleh adanya distorsi galvanic [2].



Gambar 4. Peta *phase ellipse* pada frekuensi 320 Hz (a) sebelum terkoreksi *static shift* dan (b) sesudah terkoreksi *static shift*

Pada frekuensi tinggi (Gambar 4) didominasi oleh struktur yang bersifat konduktif, ditunjukkan dengan nilai $\Phi > 45^\circ$ pada masing-masing elips. Dimensionalitas pada frekuensi tinggi menunjukkan adanya proses transisi dari medium 1D menjadi 2D. Sementara, pada frekuensi rendah (Gambar 5) sudah didominasi oleh struktur yang bersifat resistif, yang ditunjukkan dengan nilai $\Phi < 45^\circ$ pada masing-masing elips. Dimensionalitas pada frekuensi rendah menunjukkan medium 2D, dan sudah tidak terdapat medium 1D. Selain itu, pada frekuensi rendah juga terlihat bahwa bentuk elips

dominan mengarah ke Barat Laut-Tenggara. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa berdasarkan analisa *phase tensor* arah *geoelectrical strike* mengarah ke Barat Laut-Tenggara.

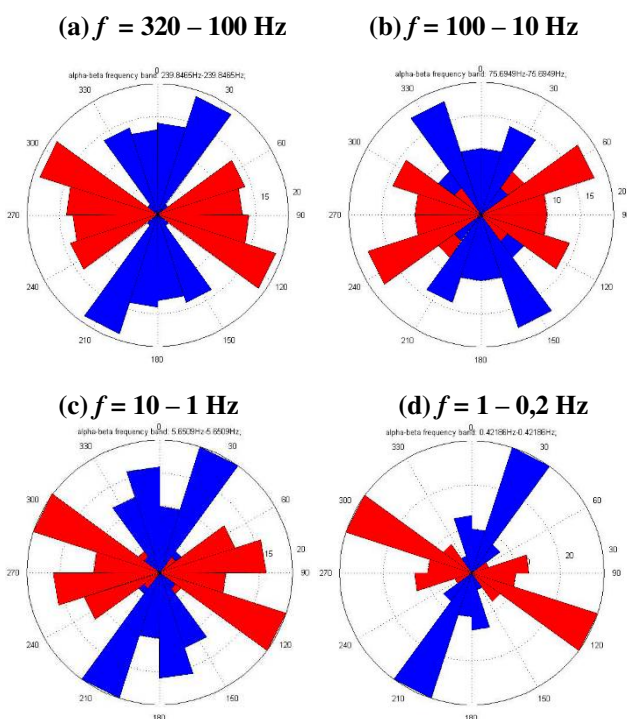


Gambar 5. Peta *phase ellipse* pada frekuensi 0,24 Hz (a) sebelum terkoreksi *static* dan (b) sesudah terkoreksi *static* (gambar kanan)

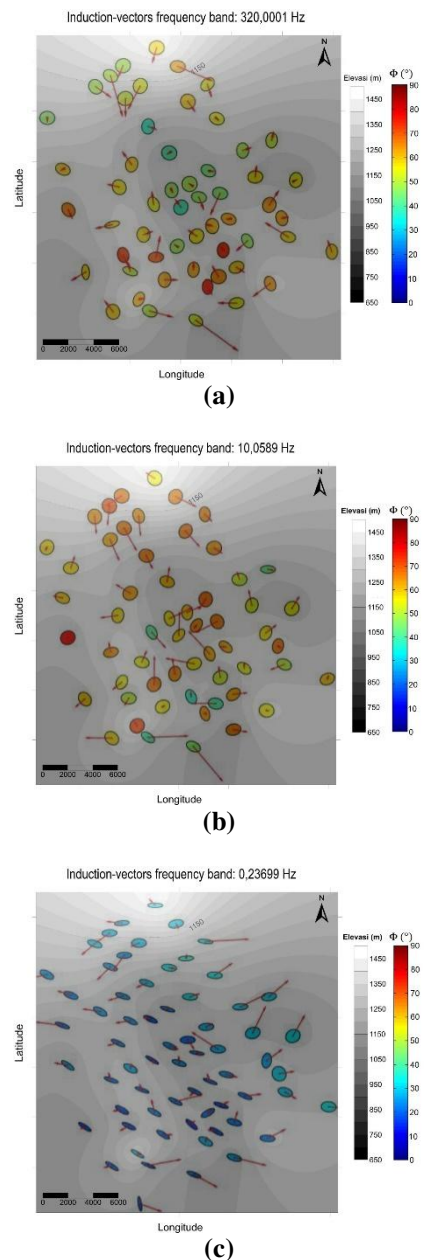
Rose Diagram

Analisis *rose diagram* dilakukan untuk menggambarkan dominan arah *geoelectrical strike* dari semua titik pengukuran pada frekuensi tertentu. Gambar 6 menunjukkan hasil *rose diagram* pada beberapa rentang frekuensi pengukuran. Pada gambar 6 (a) dan (b), rentang frekuensi sinyal EM berada pada kedalaman yang dangkal. Pada kedua

frekuensi ini belum ditemukan arah *strike* yang dominan dan konsisten menuju ke suatu sudut karena masih terdapat banyak kemungkinan arah *strike*. Gambar 6 (c) menunjukkan pada rentang frekuensi 10 – 1 Hz terjadi proses transisi dari struktur resistivitas 1D menjadi struktur resistivitas 2D. Gambar 6 (d) menunjukkan pada rentang frekuensi 1 – 0,2 Hz ditemukan dominan arah *strike* 2D yang berada di daerah penelitian. Pada rentang frekuensi ini (1 – 0,2 Hz) menampilkan dua kemungkinan arah *geoelectrical strike* di daerah penelitian “GYF” yaitu N30°E atau N60°W. Berdasarkan informasi geologi dan analisa *phase tensor*, dari kedua kemungkinan arah *geoelectrical strike* tersebut diketahui bahwa arah *geoelectrical strike* di lapangan panas bumi “GYF” mengarah ke N60°W.



Gambar 6. Rose diagram pada beberapa rentang frekuensi yang menunjukkan dominan arah *strike* dari semua titik pengukuran



Gambar 7. Induction vector pada beberapa frekuensi: (a) frekuensi tinggi, (b) frekuensi sedang, (c) frekuensi rendah

Induction vector

Analisis *induction vector* digunakan untuk mengetahui keberadaan konduktivitas secara lateral. Gambar 7 merupakan *sampling* tampilan *induction vector* pada beberapa frekuensi pengukuran. Konvensi yang digunakan ialah Konvensi Parkinson, sehingga

tanda panah menuju ke daerah yang konduktif. Gambar 7 (a) menunjukkan pada frekuensi tinggi masih didominasi oleh struktur yang konduktif. Gambar 7 (b) menunjukkan pada frekuensi sedang masih terdapat daerah yang konduktif dan beberapa titik pengukuran mulai menunjukkan sifat resistif. Selanjutnya, gambar 7 (c) menunjukkan pada frekuensi rendah masih terdapat daerah yang konduktif berdasarkan arah panah yang menuju ke bagian ujung dari titik-titik pengukuran MT.

Pemodelan Magnetotellurik

Analisa dimensionalitas dan *geolectrical strike* yang telah dilakukan menjadi informasi awal sebelum dilakukan pemodelan, sehingga data MT harus dirotasi sebesar 300° agar sejajar dengan arah *strike*. Dalam penelitian ini, pemodelan hanya dilakukan pada lintasan F. Hal ini dikarenakan, lintasan F menunjukkan representasi dari *geolectrical strike* dan dimensionalitas daerah penelitian yang sesuai dengan hasil analisa *phase tensor*.

Terdapat dua pemodelan yang dilakukan, yakni pemodelan inversi 1D dan 2D. Dari model 1D (Gambar 8) dapat diketahui pada lapisan pertama memiliki rentang nilai resistivitas yang bervariasi (rendah-sedang), lapisan kedua memiliki nilai resistivitas rendah (1-15 ohm.m), lapisan ketiga memiliki nilai resistivitas sedang (18-100 ohm.m) dan lapisan keempat memiliki nilai resistivitas tinggi (> 100 ohm.m).

Selanjutnya dibuat *mesh* untuk membuat pemodelan 2D. Model 2D pada lintasan F (Gambar 9) berdasarkan nilai resistivitasnya dapat diinterpretasikan pada lapisan pertama (frekuensi tinggi) memiliki nilai resistivitas rendah (1 - 15 ohm.m) dengan tebal 500 m. Lapisan kedua (frekuensi sedang) memiliki nilai resistivitas sedang (16 - 100 ohm.m) dengan tebal sekitar 1500 m dan lapisan ketiga (frekuensi rendah) memiliki nilai resistivitas tinggi (> 100 ohm.m) dengan tebal sekitar 1000 m. Dari hasil interpretasi model 2D, diketahui adanya korelasi yang baik antara

interpretasi model dengan hasil analisa *phase tensor*.

KESIMPULAN

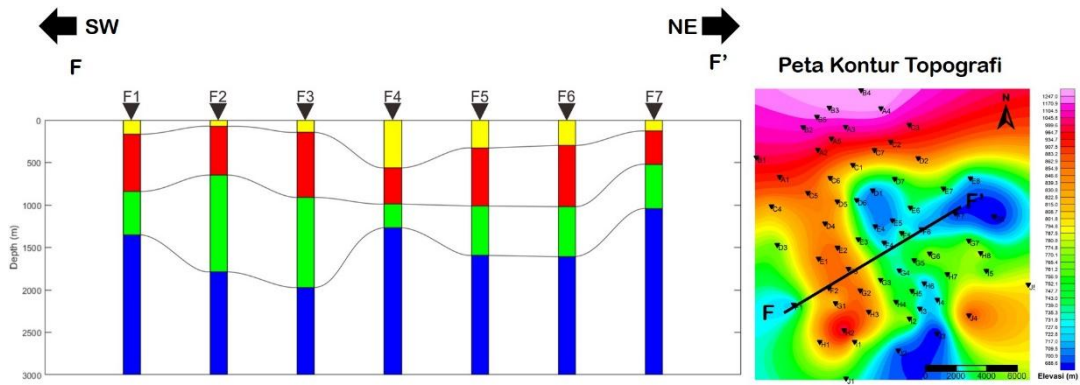
Berdasarkan analisis *phase tensor* yang telah dilakukan maka diperoleh informasi bahwa arah *geolectrical strike* di lapangan panas bumi "GYF" berarah $N60^\circ W$ atau 300° dan dimensionalitas struktur bawah permukaan terdiri dari struktur 1D, 2D, dan 3D. Kedua informasi tersebut menjadi informasi awal sebelum dilakukan pemodelan data MT agar dapat meminimalisir kesalahan interpretasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

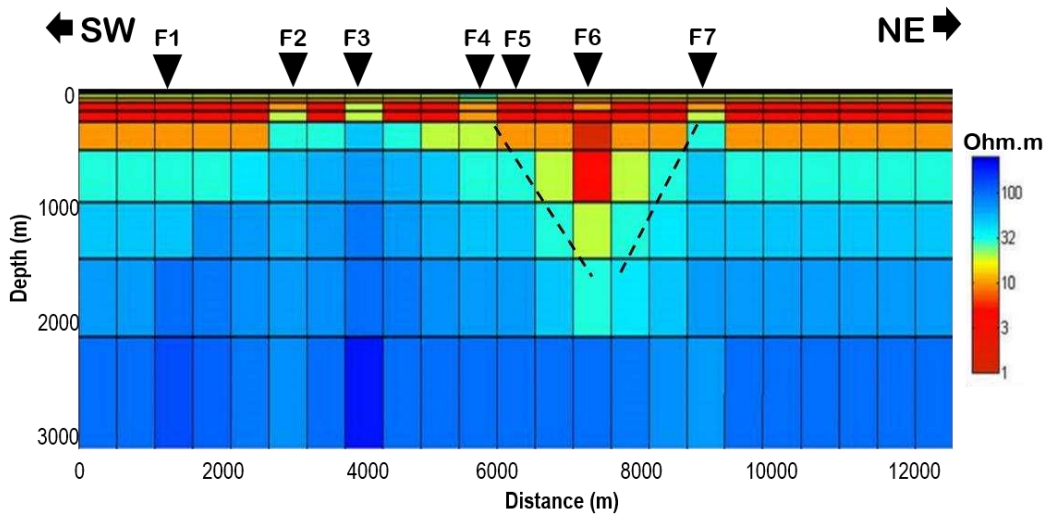
Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Pertamina Geothermal Energy yang telah mengizinkan penulis melakukan penelitian tugas akhir serta izin publikasi hasil.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Castells, A. M. (2006) *A Magnetotelluric Investigation of Geoelectrical Dimensionality and Study of the Central Betic Crustal Structure*, Tesis, Universitat de Barcelona Departament de Geodinamica i Geofisica.
- [2] Caldwell, T. G., Bibby, H. M. & Brown, C. (2004) *The magnetotelluric phase tensor*. *Geophysical Journal International*, Vol. 158, Hal. 457-469.
- [3] Simpson, F. & Bahr, K. (2005) *Practical Magnetotellurics*. United Kingdom: Cambridge University Press.
- [4] Cagniard, L. (1953) *Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting*. *Geophysics*, Vol. 18, Hal. 605-635.
- [5] Jiracek, G. R. (1990) *Near-Surface and Topographic Distortions in Electromagnetic Induction*. *Surveys in Geophysics*, Vol. 11, Hal.163-203.



Gambar 8. Model 1D lapangan panas bumi “GYF” pada lintasan F



Gambar 9. Model 2D lintasan F di lapangan panas bumi “GYF”