



## METODE MT, CSAMT, DAN TDEM TERINTEGRASI UNTUK MENDESAIN MODEL KONSEPTUAL PANAS BUMI LAPANGAN WAYANG WINDU JAWA BARAT

**Hafiz Hamdalah**

Program Studi Teknik Geofisika, Fakultas Teknologi Mineral, UPN "Veteran" Yogyakarta

Jl. SWK 104 (Lingkar Utara), Condongcatur, Yogyakarta 55283 Indonesia

Email: [hafizhamdalah@upnyk.ac.id](mailto:hafizhamdalah@upnyk.ac.id)

### ABSTRAK

Lapangan Panas Bumi Wayang Windu, Jawa Barat merupakan lapangan yang sudah beroperasi dan dalam tahap pengembangan. Untuk meningkatkan produksi maka harus ditemukan area prospek baru dengan membangun konseptual model panas bumi yang lebih detail. Metode *Magnetotelluric* (MT), *Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric* (CSAMT), dan *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) merupakan metode geofisika elektromagnetik yang efektif dalam menggambarkan konseptual panas bumi berdasarkan kontras nilai resistivitas batuan di bawah permukaan.

Efek heterogenitas medium di dekat permukaan menyebabkan efek pergeseran statik pada kurva resistivitas semu, sehingga perlu dikoreksi menggunakan data *Time Domain Electromagnetic* (TDEM). Informasi geologi berupa struktur besar dan variasi litologi serta informasi suhu, kedalaman reservoir dan kondisi litologi bawah permukaan dari data lubang bor diperlukan pada tahap interpretasi. Hubungan antara *slope* resistivitas, gradien resistivitas (*RG*), serta gradien suhu dapat digunakan memprediksi klasifikasi potensi sumur dari produksi sangat tinggi sampai sangat rendah.

Interpretasi model resistivitas bawah permukaan menunjukkan nilai resistivitas *overburden* >40 ohm.m, batuan penutup <5 ohm.m, batuan reservoir >5 – 40 ohm.m, dan sumber panas >100 ohm.m. Kedalaman *top of reservoir* bervariasi dari 750 – 900 meter di bawah permukaan. Integrasi data geofisika, geologi, dan sumur menghasilkan model konseptual panas bumi lapangan Wayang Windu yang merepresentasikan zona *up flow*, *out flow*, *primary recharge*, *secondary recharge*, patahan, rekahan, dan sebaran litologi bawah permukaan.

**Kata Kunci:** MT, CSAMT, TDEM, *slope* resistivitas, gradien resistivitas, gradien suhu, panas bumi

### ABSTRACT

*Wayang Windu geothermal field, West Java is a field that has been operating and in the development stage. To increase production, new prospect areas must be discovered by constructing a more detailed concept of geothermal models. Magnetotelluric (MT) method, Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric (CSAMT), and Time Domain Electromagnetic (TDEM) are effective electromagnetic geophysical methods in describing the concept of geothermal based on the contrast of rock resistivity values.*

*Heterogeneity effect of the medium near surface causes a static shift effect on the apparent resistivity curve, so it needs to be corrected using Time Domain Electromagnetic (TDEM) data. Geological information such as fault and lithologic variations and temperature information, reservoir depth and subsurface lithologic conditions of borehole data are required at the interpretation stage. The relationship between slope resistivity, resistivity gradient (RG), and temperature gradient can be used to predict the classification of well potential from very high to very low production.*

*Interpretation of the subsurface resistivity shows resistivity value of overburden > 40 ohm.m, the clay cap <5 ohm.m, reservoir rock > 5 - 40 ohm.m, and heat source > 100 ohm.m. Top of reservoir varies from 750 - 900 meters. The integration of geophysical, geological, and well data generates a conceptual model of the Wayang Windu field which represents the upflow, outflow, primary recharge, secondary recharge, fracture, fracture, and subsurface lithology.*

**Keyword:** MT, CSAMT, TDEM, resistivity slope, resistivity gradient, temperature gradient, geothermal

## I. PENDAHULUAN

Sejak tahun 1960 telah dilakukan survei pendahuluan tentang panas bumi di Indonesia. Hasil survei menemukan lebih dari 200 prospek panas bumi dengan manifestasi aktif terdapat di Indonesia, yang sebagian besar berada di daerah gunung api (Hochstein and Sudarman, 2008). Energi panas bumi tersebut dapat dikonversi dan dimanfaatkan menjadi pemasok energi listrik. Hal ini akan membantu pemerintah dalam memenuhi kebutuhan energi listrik nasional sebagai energi alternatif.

Lapangan Panas Bumi Wayang Windu, Jawa Barat merupakan lapangan yang sudah beroperasi dan dalam tahap pengembangan. Untuk meningkatkan produksi maka harus ditemukan area prospek baru dengan membangun konseptual model panas bumi yang lebih detail. Selain itu lapangan ini memiliki karakteristik yang unik ditinjau dari segi geologi. Pada bagian utara merupakan sistem dominasi air (*liquid dominated system*) dan bagian selatan merupakan sistem dua fasa (*two-phase dominated system*) menurut hasil penelitian Bogie dkk (2008), dan Abrenica dkk (2010). Keunikan tersebut menjadi landasan melakukan eksplorasi menggunakan metode geofisika untuk menggambarkan geometri sistem panas bumi daerah penelitian.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mendesain model konseptual panas bumi detail menggunakan Metode metode *Magnetotelluric* (MT), *Controlled Source Audio-Frequency Magnetotelluric* (CSAMT), dan *Time Domain Electromagnetic* (TDEM) terintegrasi.

## II. METODE

Informasi geologi pada peta geologi terdapat beberapa sesar/patahan. Dinamika sesar mengakibatkan munculnya kekar/rekahan (*fracture*) pada batuan di bawah permukaan yang menjadi tempat terakumulasi fluida panas. Fluida panas berupa uap (*vapour*) dan air (*liquid*) akan mengisi rongga-rongga serta saluran terbuka atau rekahan kehadiran rekahan-rekahan ini memungkinkan jalur fluida panas mencari suhu dan tekanan yang lebih rendah di permukaan.

Pada sistem dominasi uap (*vapour dominated system*) suhu dan tekanan umumnya relatif tetap terhadap kedalaman, namun pada sistem dominasi air (*liquid dominated system*) profil suhu dan tekanan sangat berlainan atau dapat dikatakan suhu dan tekanan tidak konstan terhadap kedalaman (Saptadji, 2003). Sesar yang terdapat di daerah penelitian juga menunjang terdapat aktivitas panas bumi dari hasil interpretasi geologi permukaan struktur geologi yang terdapat berupa sesar dan kekar (Alzwar, dkk., 1992). Tetapi melalui observasi/pengamatan langsung di lapangan keseluruhan daerah kondisi permukaan daerah penelitian tertutup oleh lahan pertanian berupa tanah uruk dan pupuk sehingga menyulitkan untuk ditemukannya bukti struktur di permukaan.

Suatu sistem panas bumi dapat dikatakan prospek harus memenuhi komponen-komponen dengan berbagai karakteristik (Hochstein dan Browne, 2000). Komponen tersebut adalah sumber panas (*heat source*), batuan reservoir (*reservoir rock*), fluida panas (*liquid/vapour*), struktur patahan dan kekar (*fracture*), batuan Penutup (*clay cap*). Kelima komponen di atas memiliki karakteristik berbeda-beda baik dari perubahan suhu dan tekanan hingga komposisi mineral ubahan/alterasi. Hal ini menjadi penting untuk dipahami dalam interpretasi data geofisika membangun suatu model konseptual panas bumi. Abrenica dkk. (2010) menyatakan kondisi Lapangan Panas Bumi Wayang Windu merupakan transisi antara sistem dominasi air dan sistem dominasi uap.

### 2.1. Persamaan Maxwell

Pemahaman mengenai persamaan gelombang EM diperlukan relasi yang dapat menjelaskan hubungan antara sifat fisik medium dengan medan yang timbul pada medium tersebut. Pada keadaan homogen isotropis berlaku hubungan berikut (Grant dan West, 1965):

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (1)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (3)$$

Asumsi dengan menganggap bahwa bumi bersifat homogen isotropis (Grant and West, 1965), sifat medium tidak bervariasi terhadap waktu, dan tidak ada suatu sumber muatan dalam medium yang ditinjau, sehingga diperoleh:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (7)$$

Bila persamaan (4) dan (5) dilakukan operasi *curl* dan mensubstitusikan besaran-besaran yang ada, maka akan diperoleh persamaan gelombang untuk medan listrik dan medan magnet berikut:

$$\nabla^2 \mathbf{E} = -\mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} \quad (8)$$

dan,

$$\nabla^2 \mathbf{H} = -\mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (9)$$

Persamaan (8) dan (9) merupakan variasi nilai medan listrik dan medan magnet dinyatakan sebagai fungsi sinusoidal.

## 2.2. Tensor Impedansi

Impedansi ( $Z$ ) dapat dinyatakan dalam bentuk matriks:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (10)$$

atau,

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z} \mathbf{H}, \quad (11)$$

dengan  $\mathbf{Z}$  merepresentasikan tensor impedansi  $E_x(\omega)$ ,  $E_y(\omega)$ ,  $H_x(\omega)$ , dan  $H_y(\omega)$ , adalah transformasi fourier dari perubahan medan listrik  $\mathbf{E}$  dan medan magnetik ( $\mathbf{H}$ ). Impedansi kompleks dapat dinyatakan dalam bentuk tahanan jenis dan fasa. Asumsi bumi homogen isotropis, maka nilai tahanan jenis tersebut adalah tahanan jenis sebenarnya (*true resistivity*) yang diperoleh dengan menerapkan persamaan resistivitas Cagniard berikut:

$$\rho(\omega) = \frac{1}{\mu\omega} \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 \quad (12)$$

jika disubstitusi nilai  $\mu = \mu_0 =$  permeabilitas ruang hampa  $= 4\pi \times 10^{-7}$  (SI), maka persamaan (12) menjadi:

$$\rho(\omega) = 0,2T \left| \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \right|^2 \quad (13)$$

Untuk bumi yang tidak homogen, maka nilai tahanan jenis sebenarnya  $\rho(\omega)$  menjadi tahanan jenis semu (*apparent resistivity*) (Fantaye, 2010). Fase antara medan listrik  $\mathbf{E}$  dan medan magnetik  $\mathbf{H}$  dituliskan sebagai:

$$\phi(\omega) = \arctan \left( \frac{\text{Im}\{Z_{xy}(\omega)\}}{\text{Re}\{Z_{xy}(\omega)\}} \right) \quad (14)$$

## 2.3. Skin Depth

*Skin depth* didefinisikan sebagai jarak pelemahan gelombang elektromagnetik yang menjalar dalam medium homogen sehingga menjadi 37% amplitudo di permukaan atau  $1/e$ . *Skin depth* ( $\delta$ ) mempunyai hubungan berhubungan dengan kedalaman penembusan gelombang (Roy, 2008). Dapat didefinisikan sebagai:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \quad (15)$$

Nilai *skin depth* ditentukan oleh permeabilitas medium ( $\mu$ ), konduktivitas ( $\sigma$ ) atau resistivitas ( $\rho$ ), dan frekuensi gelombang ( $f$ ) elektromagnetik yang melalui medium tersebut. Dengan mengasumsikan harga permeabilitas  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ ohm} \cdot \text{dt}$  dan mensubstitusikan frekuensi dari kecepatan sudut  $\omega = 2\pi f$ , maka persamaan (15) menjadi:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503 \sqrt{\rho T} \quad (16)$$

#### 2.4. Inversi Bostick

Resistivitas Bostick sebagai fungsi kedalaman dihitung dengan beberapa parameter, diantaranya frekuensi ( $f$ ) yang memiliki korespondensi terhadap periode ( $T$ ), nilai *true resistivity*  $\rho_t(z)$  dari inversi *Bostick* dihitung dengan:

$$\rho_t(z') = \rho_a(T) \left[ \frac{1+m(T)}{1-m(T)} \right], \quad (17)$$

dengan  $m(T)$  adalah *slope* (kemiringan) kurva resistivitas semu sebagai fungsi periode dalam skala logaritmik.

Persamaan lain untuk mendapatkan nilai *true resistivity* yang dikemukakan oleh Rodriguez (2001) dimana perhitungan inversi dihasilkan dari pendekatan distribusi resistivitas terhadap kedalaman dengan melibatkan fasa **E** dan **H** maka dapat dituliskan sebagai:

$$\rho_t(z) = \rho_a(\omega) \left[ \frac{\pi}{2\phi(\omega)} - 1 \right] \quad (18)$$

dengan  $\phi$  merupakan fasa antara fasa **E** dan **H** dan  $\pi$  bernilai  $180^\circ$ . Untuk mendapatkan kedalaman dari inversi tersebut digunakan:

$$z' = \left[ \frac{\rho_a(\omega)}{\mu_0 \omega} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (19)$$

dengan  $Z'$  merupakan kedalaman yang memiliki hubungan dengan *skin depth* pada resistivitas semu dan frekuensi sudut ( $\omega$ ).

#### 2.5. Inversi Occam

Proses inversi Occam terbagi menjadi dua bagian, tahap I adalah membawa RMS ke level yang diinginkan dengan mengubah nilai parameter normalisasi model ( $\lambda$ ), tahap II dengan cara meminimalisasi model *norm*. Hal ini dilakukan dengan mengubah  $\lambda$  untuk menemukan model dengan normalisasi terkecil sementara RMS tetap dijaga berada pada level yang diinginkan. Dalam proses ini,  $\lambda$  tidak ditetapkan di awal inversi, namun berubah dari iterasi pertama ke iterasi selanjutnya (Grandis, 2008)

Dalam pemodelan Inversi Occam secara umum dapat diperoleh dari formulasi dalam bentuk:

$$d_i = \int_0^z K_i(z) p_i(z) dz, \quad (20)$$

dengan  $d_i$  adalah respon atau data yang terukur,  $K_i(z)$  adalah matrik Kernel, dan  $p_i(z)$  adalah parameter model, yaitu suatu fungsi yang berkaitan dengan parameter fisis yang hendak dicari. Sedangkan data matrik Kernel merupakan data yang menjelaskan hubungan antara  $d_i$  dan  $p_i(z)$  (Rosid, 2011).

#### 2.6. Gradien Resistivitas (RG)

Hubungan antara *RG* dan gradien suhu di bawah permukaan didapatkan dari observasi empiris pada eksponen variasi resistivitas dengan responya terhadap suhu.

Oleh Sudarman dkk. (1986) merumuskan *RG* sebagai:

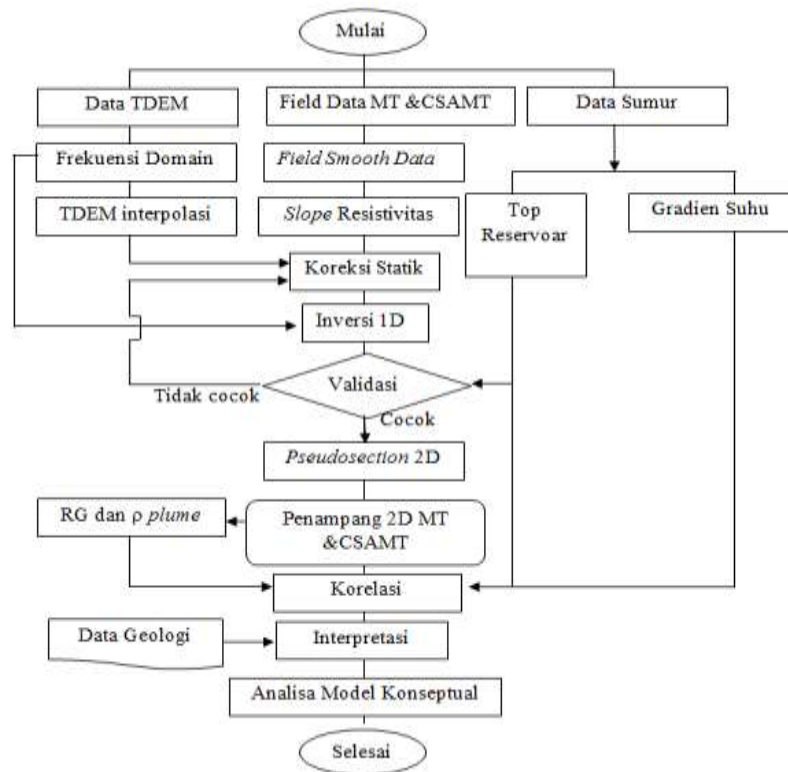
$$RG = \frac{(\Delta\rho_{app} / \Delta Z)}{\rho_f} \quad (21)$$

dengan *RG* merupakan nilai *resistivity gradient* (ohm.m/ohm.m<sup>2</sup>), parameter  $\Delta\rho_{app} / \Delta Z$  adalah *slope* resistivitas semu, dan  $\rho_f$  adalah resistivitas fiktisius atau prediksi dari resistivitas *heat source* untuk lapangan panas bumi dalam satuan ohm.m

**Metodologi**

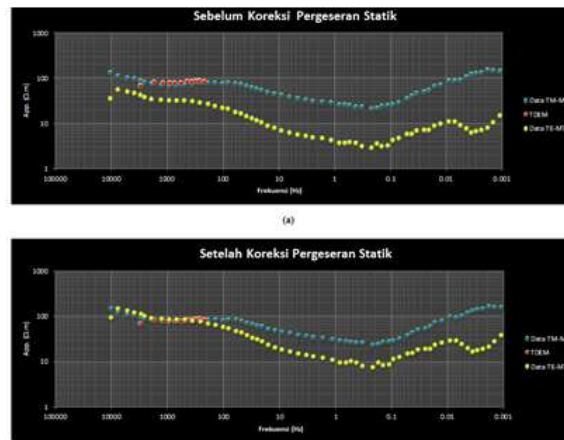
Tahap awal penelitian melakukan pengumpulan data lapangan untuk metode MT, CSAMT, dan TDEM. Data MT dan CSAMT tidak diperoleh dalam bentuk *time series* tetapi berupa data domain frekuensi yang merupakan hasil perekaman data lapangan. Selanjutnya data MT dan CSAMT dilakukan proses *smoothing* terhadap data lapangan karena masih terdapat noise sehingga S/N masih rendah. Data TDEM digunakan untuk proses koreksi pergeseran statik terhadap nilai resistivitas dikarenakan pengaruh topografi dan efek heterogenitas tanah di permukaan. Setiap titik pengukuran MT diwakili oleh perekaman data TDEM, namun titik pengukuran TDEM tidak dilakukan untuk setiap pengukuran CSAMT oleh sebab itu melakukan proses interpolasi.

Proses lanjutan melakukan inversi 1D sehingga diperoleh model resistivitas di bawah permukaan. Tujuannya untuk mengetahui kedalaman *base of conductor* sebagai zona konduktif yang diperkirakan sebagai batuan penuding (*clay cap*) dengan nilai resistivitas rendah. Penampang 2D dikorelasikan dengan data sumur berupa gradien suhu untuk memastikan kedalaman dari reservoir. Interpretasi dilakukan dengan mengintegrasikan data geofisika (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram Alir

Proses koreksi statik pada kurva resistivitas semu MT dan CSAMT menggunakan data *Time Domain Electromagnetic* (TDEM). Teknik yang dilakukan mengubah data TDEM dalam kawasan waktu menjadi resistivitas semu dalam kawasan frekuensi. Kurva resistivitas dapat dikoreksi dengan cara mencari faktor koreksi untuk menggeserkan kurva resistivitas MT dan CSAMT mendekati data TDEM (Gambar 2).



Gambar 2. Respon koreksi pergeseran statik terhadap nilai resistivitas

Suhu dan kandungan mineral alterasi pada komponen sistem panas bumi memiliki hubungan terhadap respon nilai resistivitas. Proses alterasi dan tipe produk alterasi mineral tergantung pada mineral utama, komposisi kimia dari fluida panas bumi serta suhu. Intensitas alterasi selanjutnya bergantung pada suhu, waktu, dan tekstur dari batuan induk. Intensitas alterasi rendah untuk suhu < 50°C, pada suhu <220°C terbentuk mineral zeolit dan mineral lempung berupa smektit yang merupakan mineral konduktif/ nilai resistivitas rendah (Arnason dkk. 2000).

Disamping itu penafsiran nilai resistivitas dari bagian sistem panas bumi pada daerah penelitian didasarkan dari berbagai tabel resistivitas batuan yang disusun oleh Kebede (2001) pada kasus lapangan panas bumi Reykjanes Peninsula, Sw-Iceland (Tabel 1).

Tabel 1. Tabel nilai resistivitas batuan (Kebede, 2001)

Rock Type	Resistivity ( $\Omega\text{m}$ )
Recent lava flows, above groundwater level	5,000 – 50,000
Dense intrusive (gabbros, dolerite)	10,000 – 15,000
Recent lava flows, below groundwater level	100 – 3,000
Basalts, rather dense	100 – 300
Low-temperature areas in basalt dormations	30 – 100
High-temperature areas in chlorite-epidote zone, fresh water	20 – 100
Cold rocks with brine	5 – 15
High-temperature areas, in smectite-zeolite zone, fresh water	1 – 10
High-temperature areas, brine areas	1 -4

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Alur interpretasi diawali dengan penentuan *base of conductor* (BOC) dari kurva resistivitas terhadap kedalaman yang diperkirakan sebagai batas atas dari reservoir. BOC dicirikan dengan adanya perubahan nilai resistivitas rendah (zona alterasi argilic) ke resistivitas sedang (Batuan reservoir). Selanjutnya diprediksi batas dari Overburden layer, *clay cap*, *reservoir rock* dan *heat source*. Analisa mengenai hubungan nilai resistivitas terhadap suhu dan alterasi mineral dianggap penting karena akan mempengaruhi penentuan model konseptual panas bumi. Disamping itu dilakukan analisa nilai gradien resistivitas terhadap gradien suhu untuk memprediksi potensi di lokasi yang belum terdapat data sumur. Tujuannya adalah memperkecil resiko kegagalan dalam pemboran serta arah pengembangan lapangan. Langkah terakhir merupakan penentuan konseptual model detail berdasarkan integrasi data geofisika, data geologi, dan informasi dari data sumur di daerah penelitian.

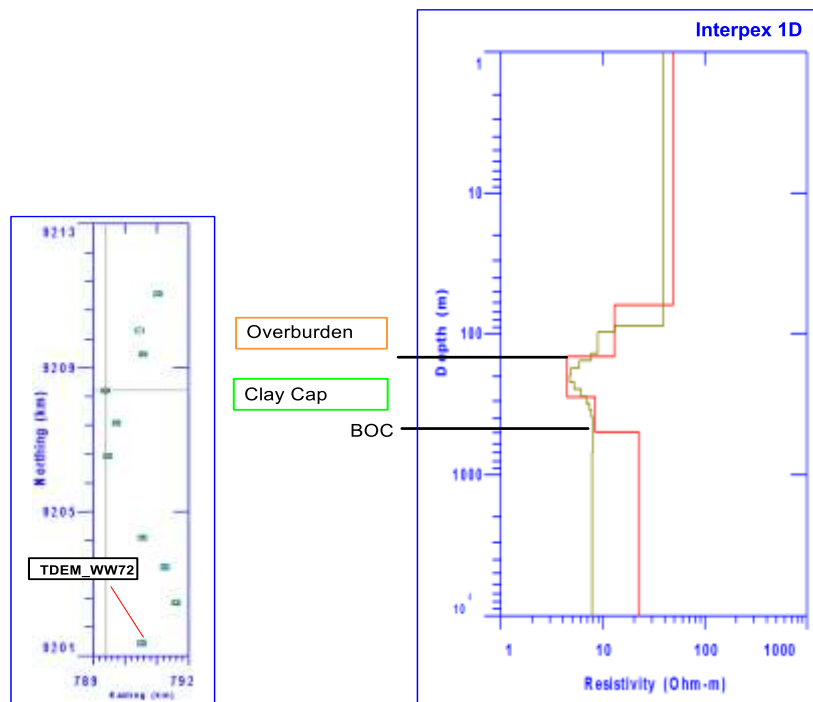
#### 3.1. Penentuan *Base of Conductor*

Hasil analisa 1D data TDEM diperoleh overburden layers dengan nilai resistivitas >40 Ohm.m dengan ketebalan lapisan 144.28 m, terdapat pada bagian atas sebagai lapisan yang menekan lapisan dibawahnya. Bagian paling bawah dari *Overburden layers* mengalami penurunan nilai resistivitas yang dikarenakan keberadaan mineral yang relatif

bersifat konduktif seperti zeolit hingga smektit, tetapi proses ini belum sempurna. Lapisan berikutnya adalah zona *clay cap* (batuan penudung) yang merupakan batuan *overburden* yang mengalami proses alterasi berupa argilitik sehingga merubah mineral utama menjadi mineral *clay* seperti illit, smektit, kaolonit, dan monmorilonit dengan ketebalan lapisan penudung 350 meter dan nilai resistivitas <5 Ohm.m (Tabel 2). Lapisan ini merupakan lapisan konduktif akibat keberadaan mineral *clay* tersebut, sehingga menjadi acuan untuk penentuan *base of conductor* (BOC) yang diindikasikan sebagai *top of reservoir* (Gambar 3).

Tabel 2. Interpretasi 1D data TDEM

Resistivitas (Ohm.m)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
48.663	62.671	62.671	<i>Overburden layer</i>
12.954	81.607	144.28	
4.4096	137.28	281.56	<i>Clay cap</i>
8.3253	216.47	498.03	

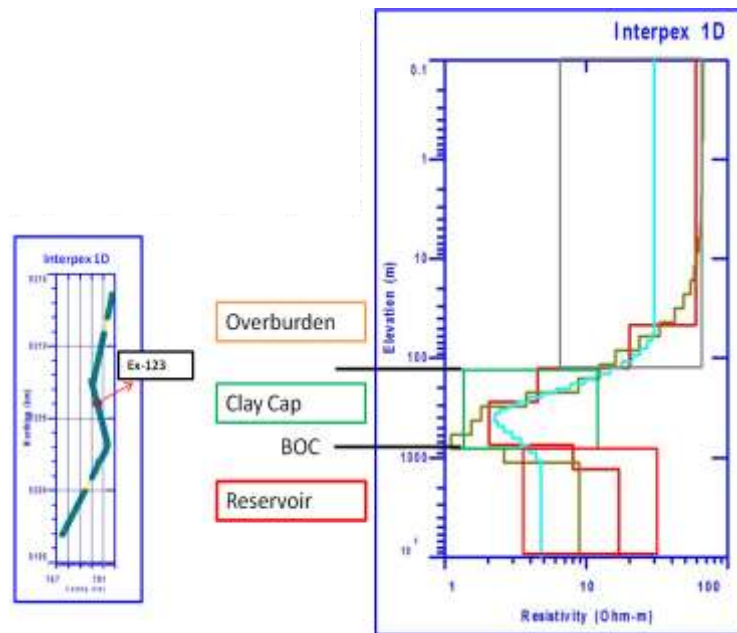


Gambar 3. Interpretasi *base of conductor* hasil inversi 1D data TDEM

Hasil analisa 1D data CSAMT terdapat 3 lapisan utama (Tabel 3) yaitu *overburden layers* dengan nilai resistivitas >40 Ohm.m dengan ketebalan lapisan 126.8 m, bagian ini terdapat pada bagian atas sebagai lapisan yang menekan lapisan dibawahnya. Lapisan berikutnya adalah zona *clay cap* yang merupakan batuan *overburden* yang mengalami proses alterasi berupa argilitik sehingga merubah mineral utama menjadi mineral *clay* seperti illit, smektit, kaolonit, dan monmorilonit (Abrenica dkk, 2010). Pada titik Ex-123 terdapat ketebalan lapisan penudung 623.8 m dengan nilai resistivitas <5 Ohm.m. lapisan ini merupakan lapisan konduktif dikarenakan keberadaan mineral *clay* tersebut, sehingga menjadi acuan untuk penentuan *base of conductor* (BOC) yang diindikasikan sebagai *top of reservoir* pada kedalaman 750.79 m. Lapisan paling bawah merupakan zona *reservoir* yang menjadi target dalam penelitian, dengan nilai resistivitas >5 sampai 40 Ohm.m kedalaman hingga 1313.0 m (Gambar 4). Namun keberadaan zona *heat source* (batuan panas) yang menjadi sumber untuk memanaskan fluida belum dapat diinterpretasikan.

Tabel 3. Interpretasi 1D data CSAMT

Resistivitas (Ohm.m)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
58.88	46.142	46.142	<i>Overburden layer</i>
20.106	80.722	126.86	
4.521	146.69	273.55	<i>Clay Cap</i>
2.042	477.23	750.79	
7.967	562.19	1313	<i>Reservoir rock</i>



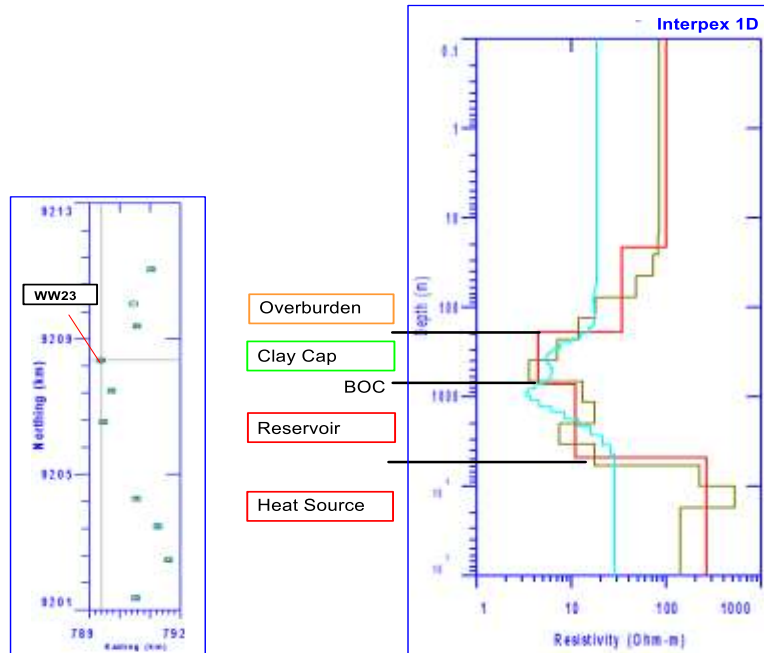
Gambar 4. Interpretasi *base of conductor* hasil inversi 1D data CSAMT

Hasil analisa metode MT didapatkan empat lapisan utama yaitu overburden layer, clay cap, reservoir, dan *heat source* (Gambar 5) yang diperoleh berdasarkan analisa nilai resistivitas terhadap kedalaman. Hasil interpretasi 1D data MT dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Interpretasi 1D data MT

Resistivitas (Ohm.m)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
98.992	21.538	21.538	<i>Overburden layer</i>
33.698	170.67	192.21	<i>Clay Cap</i>
4.4096	527.23	719.44	<i>Reservoir rock</i>
10.914	4127.4	4846.8	<i>Heat Source</i>



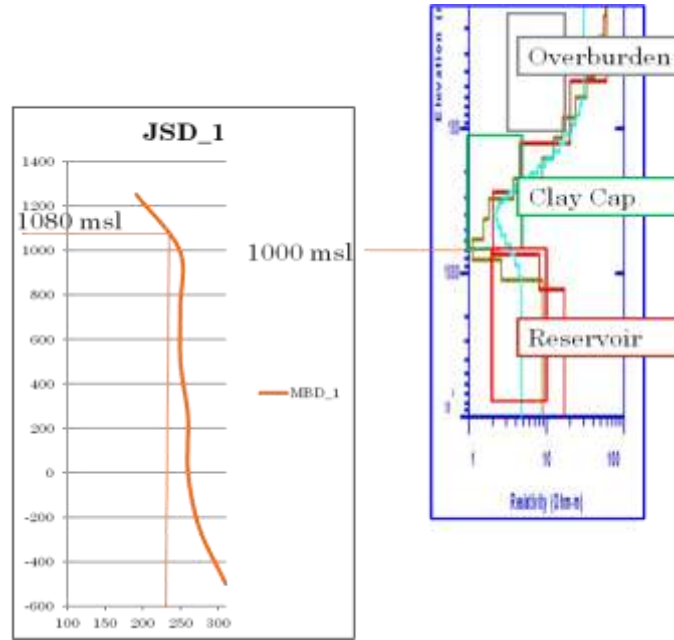


Gambar 5. Interpretasi *base of conductor* hasil inversi 1D data MT

### 3.2. Hubungan Resistivitas Terhadap Suhu dan Alterasi Mineral

Batas dari penentuan TOR (*top of reservoir*) berdasarkan analisa suhu dari sumur diperkirakan memiliki suhu 240 °C. Kedalaman TOR bervariasi dari masing-masing sumur di daerah Wayang Windu tergantung dari keadaan di bawah permukaan. *Top of reservoir* merupakan informasi yang sangat penting untuk memprediksi seberapa dalam casing bor yang harus dipasang.

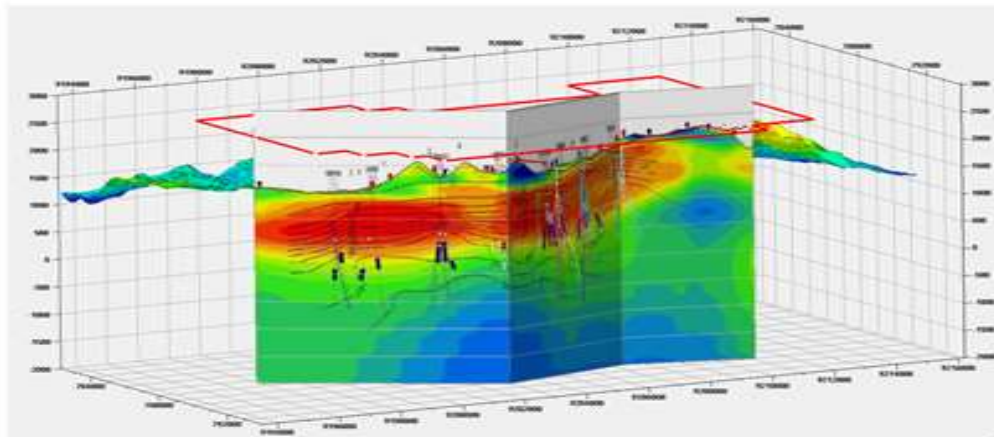
Anomali yang dihasilkan dari MT dan CSAMT berupa lapisan konduktif di zona *clay cap* mengindikasikan terdapatnya BOC (*base of conductor*) yang bervariasi di setiap titik pengukuran. Untuk memperkuat validasi dilakukan korelasi 1D terhadap data sumur yang berdekatan dengan lintasan pengukuran. Diambil titik pengukuran Ex-123 yang berdekatan dengan sumur JSD-1 yang memiliki *trajectory* mendekati lintasan pengukuran CSAMT. *Base of conductor* memiliki kedalaman 1000 msl sedangkan TOR dari sumur pada kedalaman 1080 msl (Gambar 6). Penentuan TOR yang lebih dangkal didasarkan atas suhu dibawah permukaan yang mungkin terdapat pada batas atas dari uap. Untuk sistem dominasi uap penentuan TOR berdasarkan perubahan panas konduksi ke konveksi yang cukup signifikan berubahnya, namun untuk sistem dominasi air penentuan *top of reservoir* tidak dapat secara pasti dari analisa data sumur dan tekanan (Rybach dan Muffler, 1981).



Gambar 6. Korelasi data CSAMT dengan sumur JSD-1

### 3.3. Interpretasi 2D

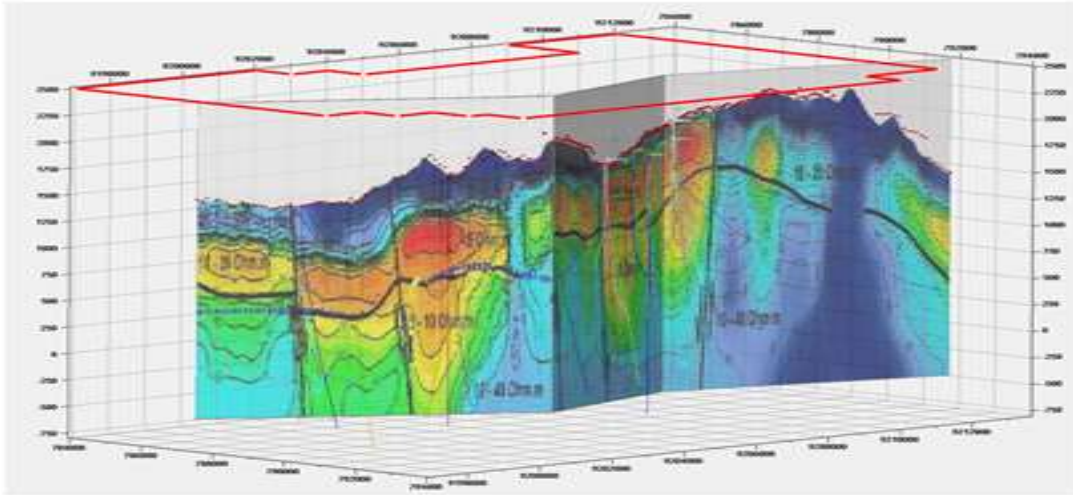
Pengamatan penampang 2D data MT mengindikasikan terdapat pola *base of conductor* pada kedalaman 700 – 1000 meter di bawah permukaan dengan nilai resistivitas <5 ohm.m. Nilai resistivitas rendah ini berasosiasi dengan batuan penudung (*clay cap*) yang mengandung mineral konduktif hasil alterasi argilitik berupa mineral illit, smektit, kaolonit, dan monmorilonit (Arnason dkk. 2000). Nilai resistivitas 10 – 40 ohm.m dibawah zona *clay cap* diinterpretasikan sebagai reservoir yang mengandung fluida panas namun tidak dapat dipisahkan karakter dari fluida (*liquid* atau *steam*). Metode MT dapat memperkirakan keberadaan *heat source* (sumber panas) pada kedalaman 4000 meter di bawah permukaan. Zona *heat source* diperkirakan memiliki nilai resistivitas tinggi sekitar >70 ohm.m. (Gambar 7)



Gambar 7. Penampang 2D MT

Berdasarkan pengamatan penampang 2D data CSAMT bahwa sumur-sumur lapangan Wayang Windu dengan produksi tinggi berkorelasi pada zona resistivitas rendah (<10 ohm.m) yang diperkirakan sebagai reservoir panas bumi.

Sedangkan sumur produksi rendah berkorelasi pada zona resistivitas cukup tinggi (>20 ohm.m) yang bukan merupakan karakter dari reservoir panas bumi, tetapi bagian ini diperkirakan batuan panas dengan ketersediaan fluida panas bumi dalam jumlah kecil (Gambar 8). Disamping itu dapat terlihat jelas pola struktur patahan yang menjadi jalur *out of flow* diinterpretasi berdasarkan ketidakmenerusan pola dari resistivitas.



Gambar 8. Penampang 2D CSAMT

### 3.4. Hubungan Gradien Resistivitas, Gradien Suhu, dan Potensi Sumur

Interpretasi ini dilakukan untuk memprediksi potensi dari sumur berdasarkan parameter-parameter dari CSAMT di daerah Wayang Windu. Karena tidak tersedianya data *production index* (PI). Hal ini biasanya dilakukan untuk lapangan eksplorasi sehingga dapat diprediksi lokasi-lokasi yang akan dilakukan pemboran dan akan mengurangi resiko pemboran. Dari hasil plot *RG* dan resistivitas *plume* dari masing-masing sumur dapat diklasifikasi berdasarkan pola umumnya (Tabel 5).

Tabel 5. Data *RG* dan resistivitas *plume*

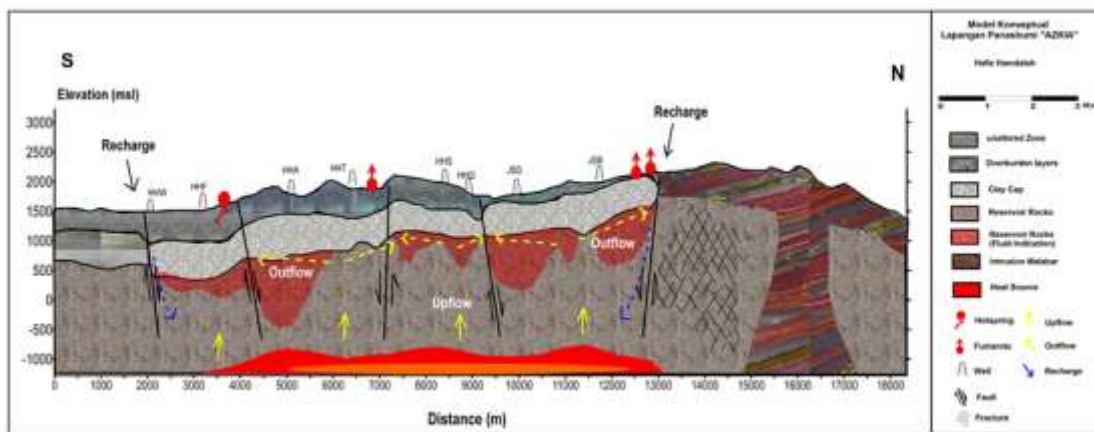
<i>RG</i> (Ohm.m/Ohm.m <sup>2</sup> )	Resistivitas <i>Plume</i> (Ohm.m)
0.635645	13.976995
0.907632	12.430167
1.291231	10.817206
3.643806	7.287075
2.361684	8.309663
0.337784	24.069324
0.057428	37.890565
0.446433	15.519534

### 3.5. Model Konseptual

Hasil integrasi data geofisika, data geologi, dan sumur dapat diinterpretasikan bahwa nilai *true resistivity* rendah yang bervariasi pada kedalaman kurang dari 1000 meter merupakan respon dari batuan penudung (*clay cap*) yang berasosiasi dengan jenis mineral argilik yang berbeda dengan nilai resistivitas  $<5$  ohm.m, berdasarkan hasil *coring* diperkirakan batuan penyusun zona ini adalah tuf-lapili hingga tuf-kristal dengan fragmen terbuka serta terdapat mineral hasil alterasi berupa smektit, kaolonit, monmorilonit yang bersifat konduktif.

Kedalaman reservoir yang memiliki nilai resistivitas 5- 40 ohm.m rata-rata 800-1000 m dari permukaan yang ditunjukkan dari TOR (*top of reservoir*) dari sumur dan merupakan batas bawah dari zona *clay cap*. Secara umum fluida berada pada zona rekahan akibat fenomena geologi seperti sesar/patahan (Gambar 9).

Model konseptual panas bumi merepresentasikan zona *up flow*, *out flow*, *primary recharge*, *secondary recharge*, patahan, rekahan, dan sebaran litologi bawah permukaan.



Gambar 9. Model Konseptual panas bumi lapangan Wayang Windu

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil integrasi metode MT, CSAMT, dan TDEM diperoleh nilai resistivitas *overburden layers*  $>40$  ohm.m dengan kedalaman 150 meter, resistivitas zona *clay cap*  $<5$  ohm.m dengan kedalaman 150 – 900 meter, resistivitas zona reservoir  $>5 - 40$  ohm.m dengan kedalaman 900 – 1200 meter, dan resistivitas zona *heat source*  $>100$  ohm.m dengan kedalaman 4000 meter dengan batas bawah tidak terdefinisi.
2. Berdasarkan hasil analisa *RG* dan resistivitas *plume* diperoleh potensi sumur dengan produksi paling besar memiliki nilai *RG*  $> 2,4$  ohm.m/ohm.m<sup>2</sup> dan nilai resistivitas *plume*  $< 9$  ohm.m serta gradien suhu  $> 3.8$  °C/10 m dan produksi paling rendah memiliki nilai *RG* 0.05 ohm.m/ohm.m<sup>2</sup> sampai  $<0.4$  ohm.m/ohm.m<sup>2</sup> dan nilai resistivitas *plume*  $< 20$  ohm.m serta gradien suhu  $< 1.6$  °C/10 m.
3. Berdasarkan integrasi data geofisika, geologi, dan sumur diperoleh konseptual model panas bumi Wayang Windu yang merepresentasikan *up flow*, *out flow*, *primary recharge*, *secondary recharge*, patahan/*fault*, rekahan/*fracture*, dan perkiraan litologi.

**DAFTAR PUSTAKA**

- Abrenica, Angelina B., Agung Harijoko, Yudi Indra K., and Ian Bogie. 2010. *Characterization of Hydrothermal Alteration in Part of the Northern Vapour-Dominated Reservoir of the Wayang Windu Geothermal Field, West Java*. Proceeding Geothermal Congress, Bali-Indonesia.
- Alzwar, M., Akbar, N., dan Bachri, S. 1992. *Peta Geologi Lembar Garut dan Pameungpeuk, Jawa Barat, skala 1:100.000*. Puslitbang Geologi, Bandung
- Árnason, H., Kristmannsdóttir, H., Torfason, H., and Ólafsson, M., 2000. *Natural changes in unexploited high-temperature geothermal areas in Iceland*. Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan, 521-526.
- Bogie, Ian, Yudi Indra K. and Merry C. Wisnandary. 2008, *Overview of the Wayang Windu geothermal field, West Java, Indonesia*, Jurnal Elsevier Geothermics, 37: 347-365.
- Fantaye, Tamrat. 2010. *Magnetotelluric and Transient Electromagnetic Methods in Geothermal Exploration With Examples From The Krysuvik Area, SW-Iceland*. Geothermal Training Programme
- Grandis, Hendra. 2008. *Pemodelan Inversi Geofisika*. Jakarta: Badan Meteorologi dan Geofisika
- Grant, F.S., and West G.E., 1965, *Interpretation Theory in Applied Geophysics*. McGraw Hill
- Hochstein, M.P., and P.R.L, Browne (2000), *Surface Manifestation of Geothermal System with Volcanic Heat Source*, in Encyclopedia of Volcanoes.
- Hochstein, M. P. and Sudarman, S., 2008, History of Geothermal Exploration in Indonesia from 1970 to 2000, *Geothermics* 37, P. 220-226.
- Kebede, Y., 2001. *Application of the resistivity method in the Krísuvík geothermal area, Reykjanes Peninsula, SW-Iceland*. UNU, G.T.P., Iceland, report 6 appendices, p. 115-142
- Saptadji, N. M., 2003. *Diktat Kuliah Teknik Panas bumi*. Departemen teknik Perminyakan. Institut Teknologi Bandung
- Sudarman, S., R. Pujiyanto dan B. Budiarjo, 1986, *The Gunung Wayang Windu Area in West Java*, Proceeding Indonesia Petroleum Association.
- Rybach, L., dan L.J.P Muffler. 1981. *Geothermal System: Principles and Case Histories*. John Wiley & Sons: A Wiley - Interscience Publication
- Rodriguez, O. D, 2001, *OCCAM and Bostick 1D Inversion of Magnetotelluric Sounding in Chicxulub Impact Crater, Yucatan, Mexico*, Geofisica Internacional. Vol.40, No.4: 271-283.
- Rosid, Syamsu. 2011. *Teori Inversi*. Geofisika Universitas Indonesia
- Roy, K.K., 2008. *Potential Theory in Applied Geophysics*. New York: Springer Berlin Heidelberg