



Received 00th January 20xx
Accepted 00th February 20xx
Published 00th March 20xx

Open Access

DOI: 10.35472/x0xx0000

Indetifikasi Struktur Bawah Permukaan Daerah Panas Bumi Lapangan “ Z ” Berdasarkan Pemodelan 2-D Data Magnetotellurik

M Rizky Yudhaprasetyo ^{*a}, Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si.^b, Andri Yadi Paembonan, S.Si., M.Sc.^a, Ahmad Zarkasyi, S.T., M.T.^c

^a Program Studi Teknik Geofisika, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia, 35365

^b Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141

^c Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi, Bandung, Indonesia, 40254

* Corresponding E-mail: journal@itera.ac.id

Abstract: Geothermal energy in Indonesia has not been fully utilized. many factors influence this problem, but one of them is lack of subsurface data that describes the area of geothermal potential. In this study, the aim of this research is to complement this deficiency by identify the geothermal structure of the "Z" field based on magnetotelluric data modeling. This method is very good in identify geothermal structures because of its very deep penetration range and it can present a good resistivity contrast between layers and that will produce very good subsurface information. Based on the results of inversion modeling and some supporting data, there are several main fault structures that make up the geothermal system in the study area. Normal Fault (BBL – TTG / N 280 - 300 ° E) forms an intrusion area, Transcurrent Fault (TL– BD / N 15 - 25 ° E), cutting into the basement resulting in the emergence of the Cikawah hot spring manifestation. Transcurrent fault (TTL - BBD / N 60 - 80 ° E), cut into the bedrock (basement) resulting in sealing in the manifestation of Cikawah hot springs. Because the activity of this fault structure, a fluid circulation is formed which rises to the surface due to thermal buoyancy forces. From this fluid circulation and support geology conditions, geothermal systems formed by the components of clay agrilic as Caprock, pyroclastic rocks as a reservoir and source of heat derived from andesite intrusion.

Keywords: Fault Structure, Magnetotelluric Method, Inversion Modeling, Reservoir, Geothermal System

Abstrak: Panas Bumi Indonesia masih belum sepenuhnya di dimanfaatkan. Ada beberapa sebab kenapa energi panas bumi belum di dimanfaatkan sepenuhnya salah satunya karena kekurangan data bawah permukaan yang mendeskripsikan daerah potensial panasbumi. Penelitian ini mencoba untuk melengkapi kekurangan itu dengan mengidentifikasi struktur bawah permukaan daerah Panas Bumi lapangan “ Z ” berdasarkan pemodelan data magnetotellurik. Metode ini sangat baik dalam indetifikasi struktur karena jangkauan penetrasi yang sangat dalam dan dapat mempresentasikan kontras tahanan jenis antara lapisan dengan baik. Berdasarkan hasil pemodelan inversi dan beberapa data pendukung, terdapat beberapa struktur sesar utama yang membentuk sistem panas bumi daerah penelitian. Sesar Normal (BBL–TTG/N 280 - 300° E) membentuk daerah intrusi, Sesar Mendatar (TL– BD/N 15 - 25° E), memotong hingga ke batuan dasar (*basement*) mengakibatkan munculnya manifestasi mata air panas Cikawah. Sesar mendatar (TTL - BBD/N 60 - 80° E) , memotong hingga ke batuan dasar (*basement*) mengakibatkan *sealing* pada manifestasi deretan air panas Cikawah. Karena aktivitas struktur sesar ini terbentuk sirkulasi fluida yang naik kepermukaan karena gaya apung *thermal*. Dari sirkulasi fluida ini dan keadaan geologi yang mendukung terbentuk sistem panas bumi dengan komponen penyusun lempung *agrilic* sebagai caprock, batuan piroklastik sebagai reservoir dan sumber panas yang berasal dari instrusi batuan andesit.

Kata Kunci : Struktur sesar, Metode Magnetotellurik, Pemodelan Inversi, reservoir, Sistem Panas bumi



Original Article

e-ISSN: 2581-0545 - <https://journal.itera.ac.id/index.php/jsat/>



Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang memiliki potensi daya energi panas bumi terbesar di dunia. Potensi ini disebabkan oleh posisi wilayah Indonesia yang masuk ke dalam jajaran lingkaran cincin api Pasifik. Dalam zona cincin api Pasifik wilayah Indonesia di apit oleh zona pertemuan 3 lempeng tektonik besar yaitu, Lempeng Indo-Australia, Lempeng Pasifik dan Lempeng Eurasia. Dan akibat dari aktivitas 3 lempeng tektonik tersebut terbentuk jalur gunung api (*vulcanic*) yang berpotensi menghasilkan sumber daya energi panas bumi [1]. Untuk menghindari kekurangan energi dan mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil di Indonesia, perlu dilakukan peningkatan pemanfaatan energi terbarukan (panas bumi) sehingga membuat Indonesia mandiri energi dan ramah lingkungan.

Berdasarkan penelitian Pusat Sumber Daya Geologi tahun 2006 terdapat daerah panas bumi di Provinsi Banten dan di perkirakan memiliki potensi panas bumi sebesar 40 MWe[3] (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Daerah Penelitian[3]

Di daerah tersebut telah dilakukan penyelidikan untuk menggambarkan daerah prospek secara lateral berdasarkan metode geomagnetik dan tahanan jenis, sehingga terdapat kekurangan informasi untuk pemodelan bawah permukaan. Kekurangan informasi ini di sebabkan beberapa hal, seperti lokasi daerah potensial panas bumi yang sulit dijangkau dan kurangnya penelitian menggunakan metode geofisika. Solusi untuk masalah tersebut adalah melakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan metode magnetotellurik untuk dapat menggambarkan keadaan bawah permukaan secara vertikal. Metode ini dapat menambah informasi dari hasil

penelitian sebelumnya menggunakan metode geofisika seperti gaya berat dan geomagnetik yang diperoleh beberapa informasi seperti zona lemah yang diidentifikasi sebagai sesar mendukung terbentuknya manifestasi di daerah tersebut[3]. Berdasarkan penelitian geologi dan geokimia terdapat beberapa informasi, yaitu kandungan kimia dari 2 manifestasi daerah penelitian dan informasi geologi daerah penelitian[3]. Penelitian selanjutnya akan menggunakan metode magnetotellurik sangat cocok untuk survei secara vertikal karena mampu menggambarkan sistem panas bumi secara detail karena memiliki penetrasi yang dalam[4]. Dengan menggunakan metode magnetotellurik, tujuan dari penelitian ini adalah untuk melengkapi informasi bawah permukaan daerah penelitian berupa struktur bawah permukaan, model sistem panas bumi, dan alur sistem panas bumi dari daerah penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data magnetotellurik daerah " Z " tahun 2008 dari **Pusat Sumber Daya Mineral Batubara dan Panas Bumi** dan beberapa data pendukung seperti data geologi dan data geokimia.

Metode

Metode magnetotellurik (MT) merupakan salah satu metode eksplorasi geofisika yang memanfaatkan medan elektromagnetik alam. Medan elektromagnetik tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks sehingga spektrum frekuensinya sangat lebar (10^{-5} Hz – 10^4 Hz)[16]. Pada frekuensi yang cukup rendah (< 1 Hz), *solar wind* yang mengandung partikel-partikel bermuatan listrik berinteraksi dengan medan magnet permanen bumi sehingga menyebabkan variasi medan elektromagnetik. Variasi pada jangkah frekuensi audio (*audio frequency band*, di atas 1 Hz) terutama disebabkan oleh aktivitas meteorologis berupa petir [5].

Kebergantungan fenomena listrik - magnet terhadap sifat kelistrikan terutama konduktivitas medium (bumi) dapat dimanfaatkan untuk keperluan eksplorasi menggunakan metode magnetotellurik. Pengukuran metode magnetotellurik dilakukan secara simultan dengan variasi medan listrik (E) dan medan magnet (H) sebagai fungsi waktu. Dalam data magnetotellurik terdapat informasi mengenai konduktivitas medium yang dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan Maxwell menggunakan model-model yang sederhana. Persamaan Maxwell merupakan hasil – hasil eksperimen (empiris) mengenai fenomena listrik – magnet yang dilakukan oleh Faraday, Ampere, Gauss, Coulomb selain yang dilakukan oleh Maxwell sendiri.



Persamaan tersebut telah banyak diuraikan dalam referensi pengantar geofisika khususnya metode Elektromagnetik. Beberapa sumber menuliskan dalam bentuk diferensial, persamaan Maxwell dalam domain frekuensi dapat dituliskan sebagai berikut, [6] :

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (2.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.4)$$

Dimana :

E : kuat medan listrik (V/m)

H : kuat medan magnet

B : flux magnetik (W/m²)

D : perpindahan listrik (Coulomb/m²)

j : rapat arus (Ampere/ m²)

q : rapat muatan listrik (Coulomb/m³)

Dimana medan listrik E_x tegak lurus dengan medan magnetik H_y . Informasi mengenai struktur tahanan jenis bumi dari pengukuran di permukaan ($z = 0$), maka perbandingan medan listrik E tegak lurus medan magnet H yang terukur digunakan dan didefinisikan sebagai impedansi:

$$Z = \frac{E}{H} \quad (2.18)$$

Dengan substitusi komponen persamaan 2.17, impedansi Z dapat ditulis sebagai :

$$Z_{xy} = \frac{E_x}{H_y} = \frac{(1-i)}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu_0 \rho} \quad (2.19)$$

Apparent Resistivity (ρ_{xy}) merepresentasikan volume rata-rata tahanan jenis bumi dengan jarak yang sama ke *skin depth*, *Apparent Resistivity* (ρ_{xy}) dapat diselesaikan dari persamaan 2.19 :

$$\rho_a = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (2.20)$$

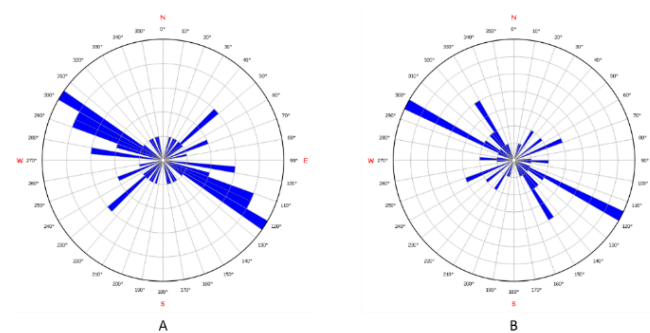
Dan *phase* (ϕ_{xy}) merefleksikan perbedaan fase antara komponen medan listrik dengan medan magnet yang didefinisikan dengan :

$$\phi = \tan^{-1} \left[\frac{Im(Z_{xy})}{Re(Z_{xy})} \right] \quad (2.21)$$

Dari hasil respon anomali *Apparent Resistivity* terserbut dilakukan pemodelan untuk mendapatkan penampang bawah permukaan dan dilanjutkan dengan analisis di bantu dengan data pendukung.

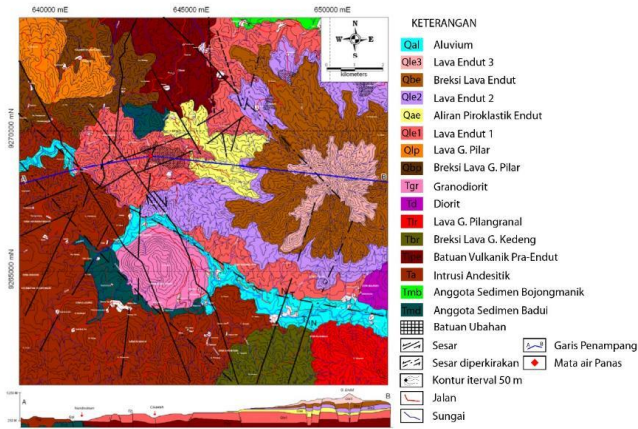
Hasil dan Pembahasan

Setelah dilakukan pengolahan data awal dan menghasilkan respon anomali *Apparent Resistivity* sebelum dilakukan pemodelan terlebih dahulu dilakukan analisis tensor impedansi untuk menyesuaikan arah geoelektikal strike dan arah struktur berdasarkan data geologi menggunakan metode diagram polar (Gambar 2).



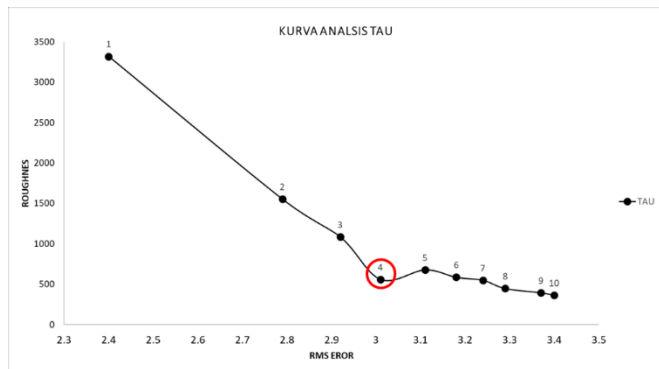
Gambar 2. Diagram Rose frekuensi tinggi(a) & Diagram Rose frekuensi Rendah(b)

Dari hasil analisis data didapatkan arah struktur daerah penelitian dominan berarah Barat Laut (BL) – Tenggara (TG)/ N 300 - 320° E. Jika dibandingkan dengan data geologi[3] memiliki arah yang tidak jauh berbeda (Gambar 3).



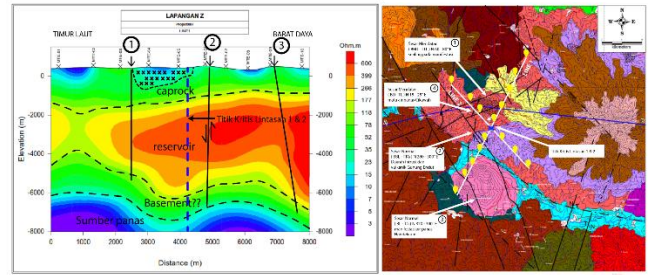
Gambar 3. Peta Geologi [3]

Untuk pemodelan 2-D dipersenatasikan dalam berntuk distribusi tahanan jenis di bawah permukaan. Parameter yang digunakan dalam melakukan pemodelan inversi ini menggunakan pendekatan kurva L, yaitu melakukan beberapa kali pemodelan inversi dengan parameter umum yang sama dan mengubah parameter tau untuk mengatur kehalusan dari hasil inversi. Kurva analisis tau yang didapat dari hasil inversi (gambar 4).

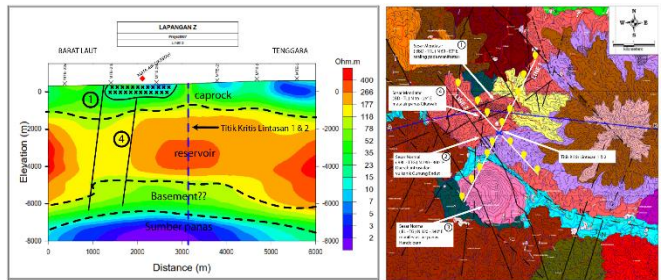


Gambar 4. Kurva Analisis tau

Dari hasil indentifikasi kurva analisis tau didapatkan bahwa para pemodelan dengan parameter 4 memiliki hasil yang memiliki kehalusan dan eror yang baik sehingga pada gambar 5 dan 6 merupakan hasil inversi dengan parameter tersebut.



Gambar 5. Hasil Inversi Lintasan 1



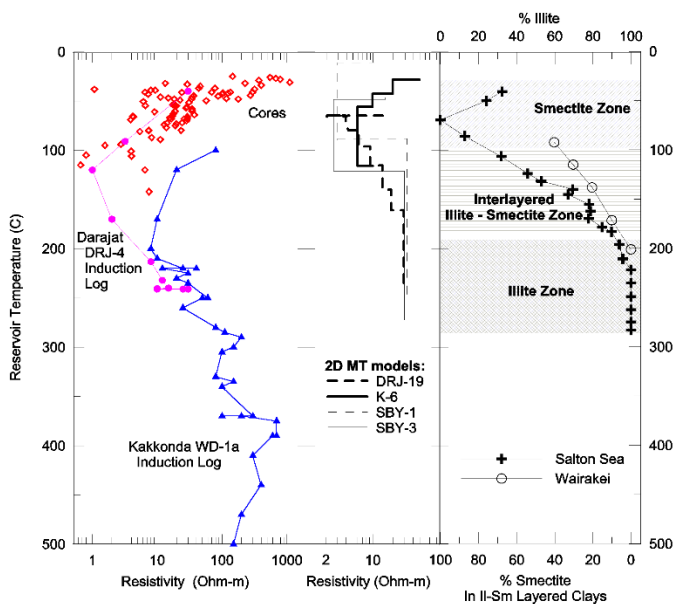
Gambar 6. Hasil Inversi Lintasan 2

Untuk analisis hasil pemodelan data lapangan pada line 1 dan 2 Batas tersebut untuk mengurangi hasil analisis yang ambigu. beberapa poin analisis yang didapatkan diantaranya, yaitu:

1. Lapisan teratas atau lapisan pertama merupakan bagian dari *caprock* di dominasi oleh batuan vulkanik dan daerah alterasi dengan rentan tahanan jenis 34 – 100 ohm.m. Berdasarkan [7] model konseptual panas bumi eltapu tinggi zona *caprock* memiliki ciri-ciri kaya akan produk alterasi. Dugaan ini diperkuat dengan hasil penelitian terpadu [3] yang menyatakan daerah permukaan didominasi oleh batuan vulkanik (intrusi andesit) yang tersingkap. Namun di daerah sekitar mata air Cikawah terdapat batuan ubahan/alterasi berupa *silicified brecciated andesite*, *argillic clay* yang kaya akan mineral silika opal batuan tersebut mengalami proses oksidasi dan hematisasi ditandai dengan warna yang abu-abu keputih-putihan, merah dan kekuningan.
2. Lapisan reservoir terdapat kontras nilai tahanan jenis pada lapisan ini dimana nilai tahanan jenis 173-550 ohm.m (diduga endapan batuan piroklastik). Reservoir ini di bangun oleh zona upflow permeabel di mana fluida panas bumi bermigrasi ke atas sepanjang formasi retak dan / atau sesar sempit yang didorong oleh daya apung termal. Pengaruh suhu berperan penting pada lapisan reservoir ini. Dengan suhu yang tinggi fluida yang terperangkap dalam reservoir mengalami migrasi karena daya apung

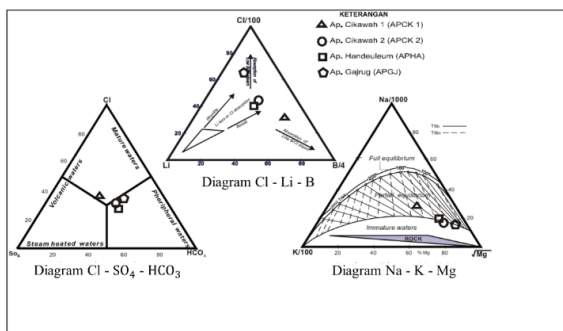
thermal sehingga terbentuk zona aliran atas yang memanfaatkan sesar. Respon Tahanan jenis yang tinggi juga di pengaruhi oleh jenis batuan pada reservoir yaitu batuan vulkanik[3].

Sehingga dapat disimpulkan daerah penelitian memiliki lapisan penyusun caprock berjenis lempung *argilic*, reservoir berasal dari batuan piroklastik dan sumber panas berasal dari intrusi andesit. Respon anomli tinggi pada reservoir disebabkan oleh pengaruh suhu terhadap kedalaman. Dimana berdasarkan penelitian [8] dan [9] temperatur reservoir akan menyebabkan nilai respon tahanan jenis meningkat (Gambar 7).

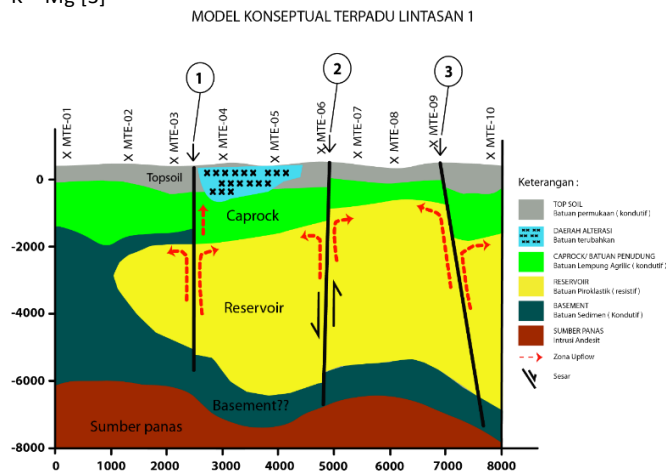


Gambar 7. Hubungan Tahanan Jenis dan Suhu[8] & [9]

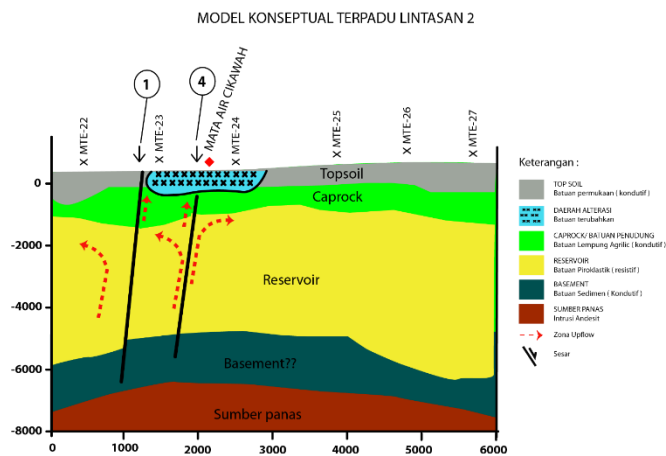
Dari hasil inversi ini kemudian diilustrasikan kedalam model terpadu di bantu dengan informasi geologi, geokimia sehingga menghasilkan model terpadu (Gambar 9 & 10).



Gambar 8. Diagram Cl – SO₄ – HCO₃, Diagram Cl – Li – B, Diagram Na – K – Mg [3]



Gambar 9. Model Konseptual Terpadu Lintasan 1



Gambar 10. Model Konseptual Terpadu Lintasan 2

Pada gambar 9 dan 10 mempresentasikan bahwa daerah penelitian didominasi oleh aktivitas sesar utama yang terlihat pada model lintasan 1. Sesar normal pada lintasan 1 merupakan sesar yang tertulis pada data geologi[3] sebagai sesar utama pembentuk daerah intrusi dan vulkanik Gunung Endut. Dan 2 sesar lain pada lintasan 1 merupakan sesar geser yang memotong hingga ke *basement*. 2 sesar geser ini menjadi awal terbentuknya manifestasi air panas handeuleum dan air panas Cikawah. Sehingga terjadi sirkulasi fluida pada reservoir karena adanya sesar tersebut. Sedangkan pada lintasan 2 terdapat 2 sesar pada model konseptual. Sesar tersebut merupakan sesar utama pembentuk daerah alterasi dan mata airpanas Cikawah menurut data geologi[3]. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sesar tersebut

merupakan struktur utama dalam siklus sistem panas bumi daerah penelitian. Pada hasil penelitian geokimia[3] menjelaskan bahwa kadungan mata air cikawah ini berhubungan dengan *deep water* sehingga memperkuat bahwa fluida pada reservoir daerah penelitian berasal dari air bawah permukaan yang naik keatas melalui struktur sesar yang ada berkat gaya apung thermal dan bersirkulasi dilapisan reservoir.

Dengan demikian dapat disimpulkan dari hasil analisis terpadu di atas. Struktur sesar pada lintasan 1 dan 2 membentuk sistem panas bumi daerah penelitian, dengan sumber panas berasal dari daerah intrusi yang disebabkan oleh sesar utama. Aktivitas sesar tersebut membentuk sesar lain pada daerah penelitian, dari struktur sesar baru ini menghasilkan daerah alterasi dan manifestasi air panas. Berdasarkan data geokimia[3] kandungan air pada manifestasi mata air panas cikawah berhubungan dengan *deep water*. Sehingga dapat disimpulkan bahwa alur terbentuk nya sistem panas bumi daerah penelitian dimulai dengan terjadinya intrusi batuan andesit akibat aktivitas sesar. Kemudian aktivitas sesar menyebabkan terbentuknya sesar lain yang membentuk daerah alterasi dan manifestasi air panas. Struktur sesar ini yang memotong hingga kebasement menyebabkan fluida bawah permukaan naik melalui struktur karena gaya apung thermal sehingga membentuk manifestasi air panas dan sebagian tersirkulasi di lapisan reservoir. Pendapat ini diperkuat dengan hasil penelitian geokimia yang menemukan kandungan *deep water* pada mata air cikawah.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis data pengukuran dan data pendukung daerah penelitian memiliki struktur sesar (Sesar Normal, BBL –TTG /N 280 - 300° E) yang membentuk daerah intrusi dan vulkanik gunung endut. Dari aktivitas sesar tersebut terbentuk sesar lain (Sesar Mendatar, TL – BD/N 15 - 25° E) memotong formasi hingga ke batuan dasar (**basement**) yang membentuk daerah alterasi dan manifestasi sehingga menyebabkan daerah penelitian menjadi sistem panas bumi berkelanjutan.

Hasil dari pemodelan inversi 2-D magnetotellurik mempersetasikan daerah penelitian terdiri dari 3 komponen penyusun, yaitu *caprock* yang diduga bersal dari batuan lempung *argilic* (34 – 100 ohm.m) yang diperkuat oleh hasil penelitian geologi[3] terdapat kandungan lempung *argilic* di manifestasi air panas cikawah. Selanjutnya bagian reservoir di bentuk dari batuan piroklastik. Jika berdasarkan peta geologi daerah

penelitian termasuk dalam kompleks vulkanik dengan dominasi batuan penyusun adalah produk gunung api, sehingga batuan piroklastik (173-250 ohm.m) diduga menjadi reservoir pada sistem panas bumi ini. Dan untuk sumber panas dari sistem panas bumi ini diduga berasal dari intrusi batuan andesit pada daerah penelitian.

Dari 2 kesimpulan di atas alur terbentuk nya sistem panas bumi daerah penelitian dimulai dengan terjadinya intrusi batuan andesit akibat aktivitas sesar (Sesar Normal, BBL –TTG /N 280 - 300° E). Kemudian aktivitas sesar tersebut menyebabkan terbentuknya sesar lain (Sesar Mendatar, TL – BD/N 15 - 25° E) yang membentuk daerah alterasi dan manifestasi air panas. Struktur sesar ini yang memotong hingga kebasement menyebabkan fluida bawah permukaan naik melalui struktur karena gaya apung thermal sehingga membentuk manifestasi air panas dan sebagian tersirkulasi di lapisan reservoir. Pendapat ini diperkuat dengan hasil penelitian geokimia yang menemukan kandungan *deep water* pada mata air cikawah.

Pustaka

- [1] Gupta Hans and Sukapta Roy, 2007, Geothermal Energy An Alternative Resource for the 21st Century, Elsevier.
- [2] Kasbani, (2009), Sumber Daya Panas Bumi Indonesia: Status Penyelidikan, Potensi dan Tipe Sistem Panas Bumi, *Prosiding Pusat Sumber Daya Geologi*.
- [3] Tim Penyelidikan Terpadu, 2006, Penyelidikan Terpadu Geologi, Geokimia, dan Geofisika Daerah Panas Bumi Gunung Endut Kabupaten Lebak, Provinsi Banten, Pusat Sumber Daya Geologi, Bandung.
- [4] F, Simpson & Karsten, B., 2005, *Practical Magnetotellurics*. Cambridge : Cambridge University Press.
- [5] Vozoff, K., 1991, The *magnetotelluric* method, in *Electromagnetic methods in applied geophysics*, Vol. 2 Application, M.N. Nabighian (ed.), SEG Publishing.
- [6] Chave, A. D., & Jones, A. G. 2012. The magnetotelluric method: Theory and practice. Cambridge: Cambridge University Press.
- [7] Johnston, J.M., Pellerin, L. and Hohmann, G.W. (1992). Evaluation of Electromagnetic Methods for Geothermal Reservoir Detection. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol 16, pp 241-245
- [8] Whittome A.J., and Salveson J.O., 1990. Exploration and evaluation of the Darajat Geothermal Field, Waest Java, Indonesia. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol 14, Part II, 999-1005.
- [9] Muraoka H., Uchida T., Sasada M., Yagi M., Akaku K., Sasaki M., Yasukawa K., Miyazaki S., Doi N., Saito S., Sato K., and Tanaka S., (1998). Deep geothermal resources survey program: Igneous, metamorphic and hydrothermal processes in a deep well encountering 500 °C at 3729 m depth, Kakkonda, Japan. *Geothermics*, Vol. 27, No. 5/6, 507-534.