

Integrated Analysis of Magnetotelluric and Gravity Data for Delineating Reservoir Zone at Patuha Geothermal Field, West Java

Surya Aji Pratama^{1,2}, Yunus Daud^{2,3}, Fikri Fahmi¹, Catra Adiwardhana Darusman⁴

¹PT NewQuest Geotechnology, Indonesia

²Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

³Geothermal Laboratory, Department of Physics, The University of Indonesia

⁴PT Geo Dipa Energi, Indonesia

surya.aji@newquest-geotechnology.com

Keywords: Patuha, geothermal exploration, magnetotelluric, gravity, reservoir zone, conceptual model

ABSTRACT

The objective of geothermal exploration conducted at geothermal prospects area is to find the reservoir zone. Good reservoir zones can be seen from two factors, reservoir rocks with permeability and reservoir fluid with high temperature. Under the first factor, high permeability of reservoir rocks allows the reservoir to contain much geothermal fluids. In general, high permeability of rock is caused by secondary permeability derived from geological structures such as faults. Geophysical methods consist of magnetotelluric (MT) and gravity were applied in this study to delineate the reservoir zone. MT method was used to detect subsurface resistivity structure. Analysis of gravity data in form of bouguer anomaly map (CBA) and residual anomaly can figure subsurface density structures. Under the second factor, high temperature can be obtained from well data. The subsurface resistivity structure revealed by 2-D inversion showed a low resistivity (<15 ohm-m) altered rock at the upper part overlying a reservoir zone with slightly higher resistivity (20-100 ohm-m). The lower part of the resistivity structure showed the highest resistivity value (>500 ohm-m), which indicated a hot rock region and basement. The geometry of the resistivity structure showed three updome structure of the base of the conductive layer centered below the Kawah Cibuni, Kawah Putih, and Kawah Ciwidey. The updome structure indicated an upflow zone that was supported by the occurrence of solfataric-fumaroles on the summit of Kawah Cibuni, Kawah Putih, and Kawah Ciwidey. The outflow zone oriented to northern part of up flow zone, indicated by the occurrence of Alun-Alun Hot Spring, Cimanggu Hot Spring and Barutunggal Hot Spring. The MT & Gravity result was then incorporated with geological, geochemical, and well data to construct a conceptual model of Patuha geothermal system.

PENDAHULUAN

Eksplorasi panasbumi yang dilakukan pada daerah prospek panasbumi bertujuan untuk mencari zona reservoir. Zona reservoir yang baik adalah batuan yang memiliki permeabilitas tinggi sehingga memiliki kandungan fluida panasbumi yang banyak. Batuan reservoir yang memiliki permeabilitas tinggi pada umumnya dikarenakan adanya permeabilitas sekunder berupa struktur patahan (Dezayes *et al*, 2010). Penelitian dengan metode geofisika yang terdiri dari metode magnetotellurik (MT) dan Gravitasi dilakukan pada lapangan panasbumi Patuha untuk mengetahui kondisi geologi bawah-permukaan. Selanjutnya data tersebut

diintegrasikan dengan data geosains lainnya untuk memetakan persebaran zona reservoir pada lapangan panasbumi Patuha.

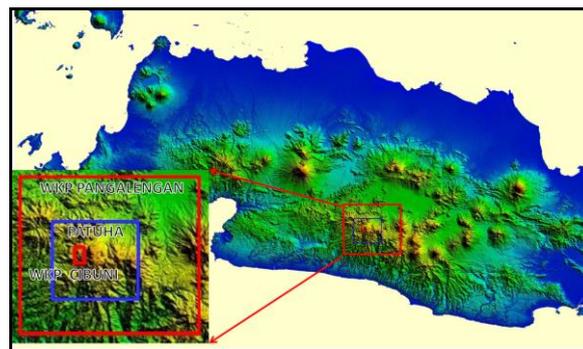
Metode MT menggunakan konsep gelombang elektromagnetik yang dapat memberikan informasi distribusi resistivitas bawah permukaan (Vozoff, 1991). Metode magnetotellurik (MT) dapat diaplikasikan untuk mengetahui struktur resistivitas bawah permukaan. Penelitian sejenis telah dilakukan pada daerah prospek panasbumi Arjuno-Welirang, Indonesia (Daud *et al*, 2015).

Pada metode gravitasi, konsep yang digunakan adalah dengan mengukur percepatan gravitasi yang bervariasi dikarenakan massa batuan bawah permukaan (Telford, 1990). Analisis struktur dengan menggunakan data gravitasi pada lapangan panasbumi pernah dilakukan pada daerah Hohi, Jepang (Salem *et al*, 2005). Dengan menganalisis lebih lanjut pada data gravitasi pada peta *complete bouguer anomaly (CBA)*, anomali residual, dan *second vertical derivative (SVD)* maka dapat dipetakan adanya struktur bawah permukaan.

Proses interpretasi terintegrasi dengan melibatkan data pendukung berupa geologi, geokimia, dan data sumur akan semakin memperkuat keyakinan terhadap model konseptual dan keberadaan struktur bawah permukaan. Informasi yang dihasilkan dari model konseptual dan keberadaan struktur bawah permukaan akan digunakan dalam pengembangan lapangan panasbumi Patuha.

TINJAUAN DAERAH PENELITIAN

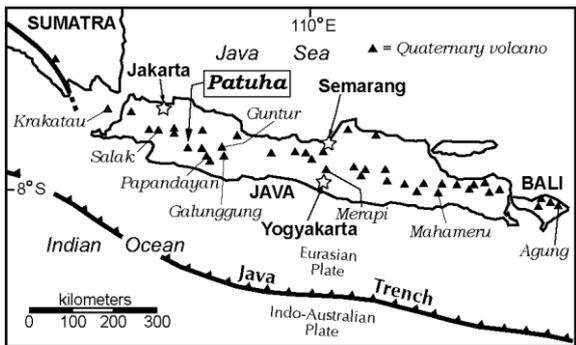
Lapangan panasbumi Patuha berada di area Gunung Patuha, Jawa Barat. Lokasi Gunung Patuha adalah di bagian selatan dari ibu kota Provinsi Jawa Barat, Bandung.



Gambar 1. Lokasi lapangan panasbumi Patuha

Area Patuha memiliki dimensi 11x7.5 km sehingga luas wilayahnya adalah sebesar 82.5 km². Di dalam area kerja panasbumi Patuha terdapat Wilayah Kerja Panasbumi Cibuni yang dimensinya lebih kecil. Lokasi penelitian secara jelas dapat dilihat pada Gambar 1.

Sumber daya panasbumi Patuha dikaitkan dengan aktivitas vulkanik akibat subduksi lempeng Indo-Australia di bawah lempeng Eurasia pada Palung Jawa (Gambar 2). Lapangan Patuha terletak dalam dataran tinggi vulkanik yang terdiri dari lava andesit dan piroklastik pada akhir Pliosen usia Kuartar. (Layman & Soemarinda, 2003) melaporkan usia radiometrik mulai 0,12-1,25 juta tahun untuk batu-batu ini. Tidak ada letusan bersejarah telah terjadi di daerah. Analisis foto udara menunjukkan bahwa terdapat beberapa pusat vulkanik yang muncul di daerah lapangan panasbumi Patuha.



Gambar 2. Lokasi dan tektonik regional daerah panasbumi Patuha

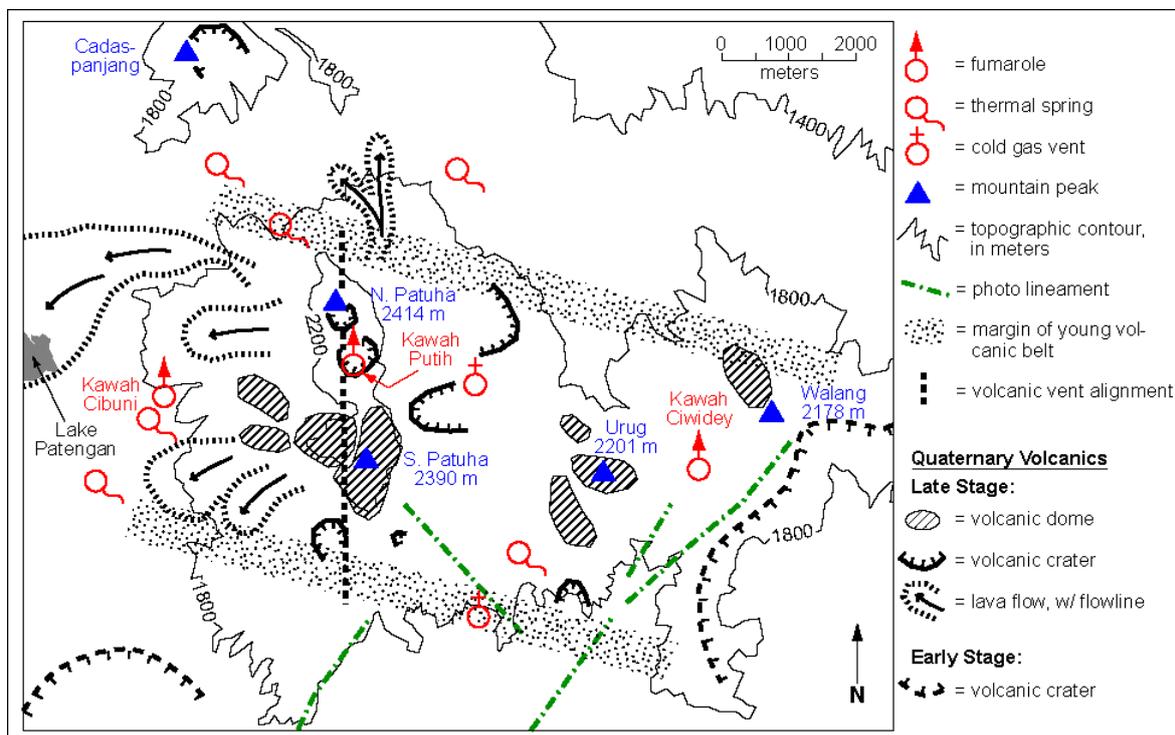
Sumbu vulkanik di Patuha dicirikan oleh distribusi tahap akhir aktivitas vulkanik, yang terkonsentrasi pada arah tren memanjang dari barat ke barat laut dengan dimensi sekitar 5 x 10 kilometer. Tahap akhir aktivitas vulkanik terjadi pada ketinggian di atas 1800 meter dpl mencakup kubah lava,

kerucut, kawah dan sumber aliran lava muda. Kubah di Gunung Urug dan di Selatan Patuha, serta kawah dalam kerucut di Utara Patuha merupakan bagian dari tren ini. Sumbu vulkanik menunjukkan hubungan yang erat dengan sumber panas bumi Patuha. Fitur ini membungkus tiga daerah fumarol utama di lapangan Patuha, dan beririsan dengan area reservoir produktif.

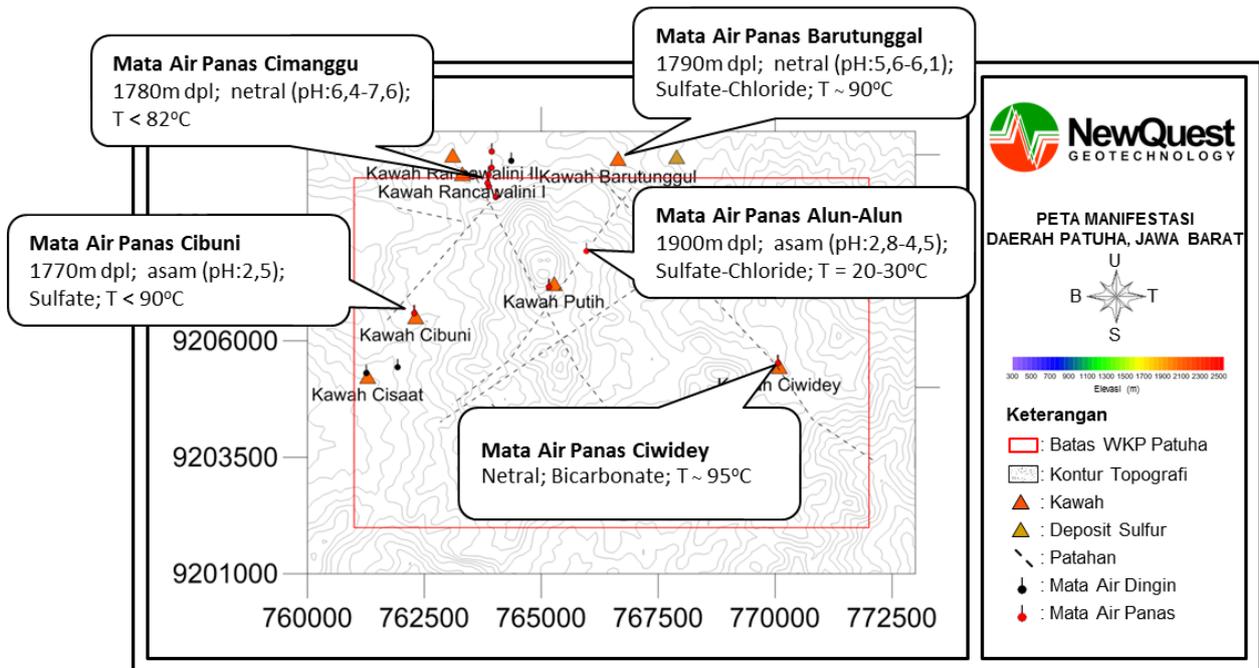
Sumbu vulkanik kemungkinan mencerminkan zona struktur dengan penetrasi yang sangat dalam, dengan arah tren barat ke barat laut. Rekahan dalam sumbu vulkanik kemungkinan mengendalikan intrusi pada kedalaman sumber panas magmatik di sistem panas bumi Patuha, serta letusan magma ke permukaan. Struktur dalam zona ini juga tampak mengontrol perkembangan rekahan pada reservoir panas bumi, dan kemunculan fumarol di permukaan.

Tren struktural yang teridentifikasi di Patuha mencakup, zona utara-selatan sepanjang 4 kilometer dicirikan oleh kelurusan puncak Utara dan Patuha Selatan serta 3 puncak lainnya. Struktur berarah timur laut, tegak lurus dengan tren sumbu vulkanik, mungkin memainkan peran dalam pengembangan perluasan reservoir produktif ke arah barat daya antara puncak dari Urug dan Patuha Selatan, dan batas timur dari daerah prospek dekat Kawah Ciwidey.

Manifestasi permukaan pada lapangan panasbumi Patuha terdiri dari fumarole (berupa kawah), mata air panas, dan kemunculan gas. Manifestasi ini mencakup 3 daerah fumarole di Kawah Cibuni, Kawah Putih, dan Kawah Ciwidey, yang berada pada ketinggian 1.800-2.250 meter dpl (Gambar 3). Mata air panas berada pada ketinggian yang lebih rendah, yaitu pada elevasi di antara 1.600-1.850 meter dpl pada lembah vulkanik di arah selatan, barat, dan barat laut. Gas dingin muncul di antara Kawah Ciwidey dan Kawah Putih pada ketinggian 1.950 meter dpl, dan di lembah bagian selatan pada ketinggian 1.800 meter dpl.



Gambar 3. Peta lokasi manifestasi permukaan pada lapangan panasbumi Patuha (Layman & Soemarinda, 2003)



Gambar 4. Peta lokasi mata air panas dan tipe fluidanya

Analisis mata air panas telah dilakukan pada penelitian sebelumnya oleh (Layman & Soemarinda, 2003). Peta lokasi mata air panas dan tipe fluidanya diperlihatkan pada Gambar 4. *Steam-heated thermal water* pada daerah fumarol Kawah Cibuni dan Kawah Ciwidey merupakan campuran antara asam sulfat dengan klorida yang kadarnya dapat diabaikan dengan pH 2-3. Satu dari mata air panas di dekat Kawah Cibuni adalah campuran antara asam sulfat dengan klorida dengan kadar klorida kurang dari 400 ppm. Sebaliknya, Kawah Putih memiliki tingkat salinitas yang tinggi, bertipe hyper-acid klorida-sulfat, dengan pH 0.5 dan kadar klorida hingga 13.000 ppm (Sriwana *et al*, 2000). Butiran sulfur yang mengambang dengan inklusi fluida sangat umum ditemukan di kawah tersebut. Umumnya fluida tersebut terbentuk dari kondensasi steam magmatic yang memiliki tingkat keasaman yang tinggi dan campuran gas HCl dan SO₂. Evaporasi yang terjadi pada permukaan kawah menambah konsentrasi dari fluida tersebut.

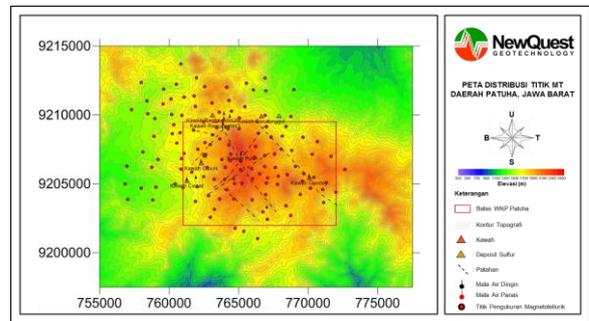
Mata air panas pada lembah bagian utara dari tubuh vulkanik merupakan campuran antara Na-Ca-SO₄-HCO₃-Cl dengan pH netral, TDS di bawah 2.000 ppm. Kadar klorida pada mata air panas ini berkisar antara 150-700 ppm, dengan beberapa campuran sulfat dan bikarbonat.

METODOLOGI

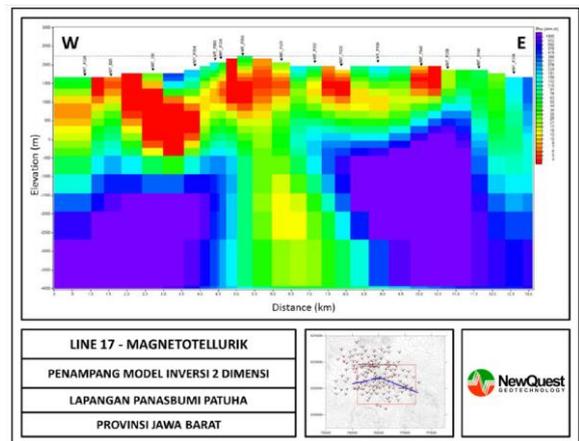
Data MT sebanyak 131 titik terdapat pada lapangan panasbumi Patuha dengan distribusi titik seperti yang diperlihatkan pada Gambar 5. Data MT berupa data *hardcopy* memuat informasi resistivitas semu dan beda fase pada mode TE dan TM. Data tersebut kemudian didigitasi sehingga dapat dilakukan koreksi dan pemodelan menggunakan komputer.

Koreksi statik dilakukan dengan menggunakan data TDEM. Pemodelan data MT dilakukan dengan teknik pemodelan inversi menggunakan algoritma NLCG pada *software*

WinGLink. Hasil pemodelan inversi 2-D diperlihatkan pada Gambar 6.



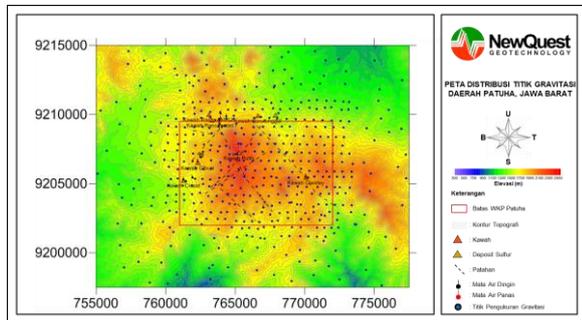
Gambar 5. Distribusi titik MT pada lapangan panasbumi Patuha



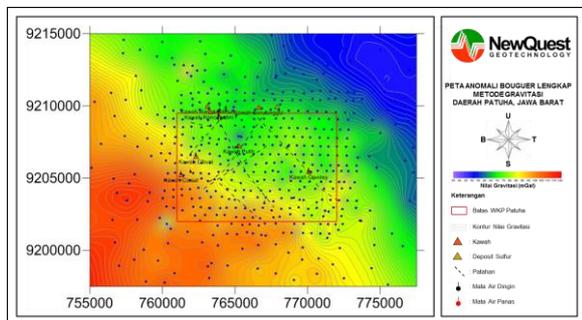
Gambar 6. Hasil pemodelan inversi 2-D data MT

Data gravitasi yang terdapat pada lapangan panasbumi Patuha berjumlah 519 titik. Distribusi titik amat gravitasi

diperlihatkan pada Gambar 7. Data gravitasi yang tersedia berupa nilai gravitasi observasi, yaitu nilai gravitasi yang sudah dikoreksi dengan menghilangkan efek pasang surut dan drift selama pengukuran. Reduksi data dilakukan dengan menggunakan *software* GravPro-X yang dikembangkan oleh PT NewQuest Geotechnology. *Software* GravPro-X memudahkan dalam melakukan reduksi data gravitasi dengan melakukan koreksi lintang, koreksi udara bebas, perhitungan densitas Bouguer, koreksi Bouguer, hingga koreksi medan sehingga mendapatkan nilai *Complete Bouguer Anomaly* (CBA) yang diperlihatkan pada Gambar 8.

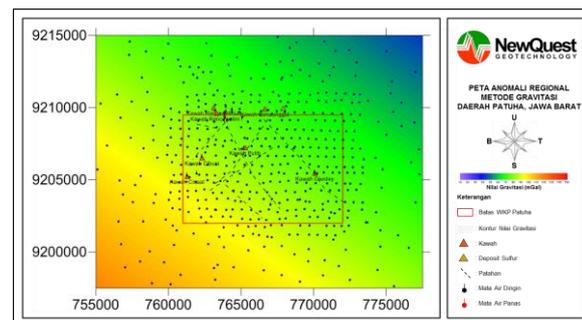


Gambar 7. Distribusi titik gravitasi pada lapangan panasbumi Patuha



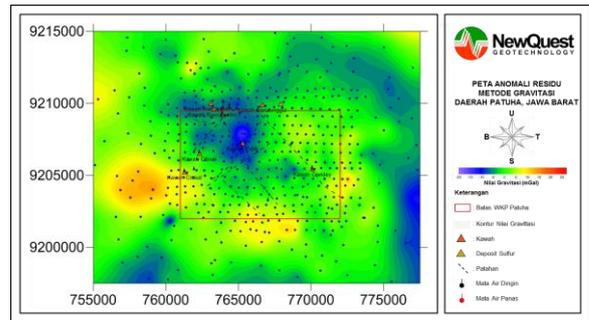
Gambar 8. Peta anomali Bouguer lengkap (CBA) data gravitasi

Pengolahan data dilanjutkan dengan memisahkan anomali regional dan residual dari data CBA. Anomali regional didapat dari perhitungan *Trend Surface Analysis* (TSA) orde pertama (Gambar 9). Anomali residual (Gambar 10) didapat dengan menghilangkan nilai anomali regional pada data CBA.

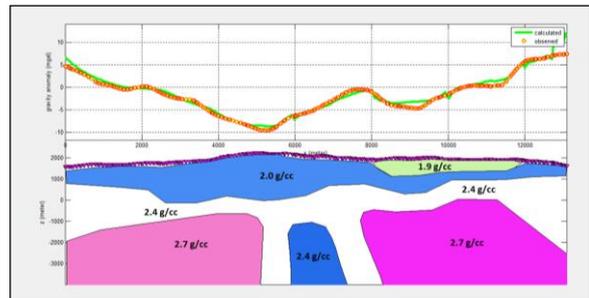


Gambar 9. Peta anomali regional data gravitasi

Pemodelan data gravitasi dilakukan dengan *forward modeling* 2-D menggunakan *software* Grav2D. Lintasan yang dimodelkan disesuaikan dengan lintasan MT (Gambar 11). Densitas *background* diambil dari perhitungan densitas Bouguer dengan metode Paransis, yaitu sebesar 2,41 g/cc.



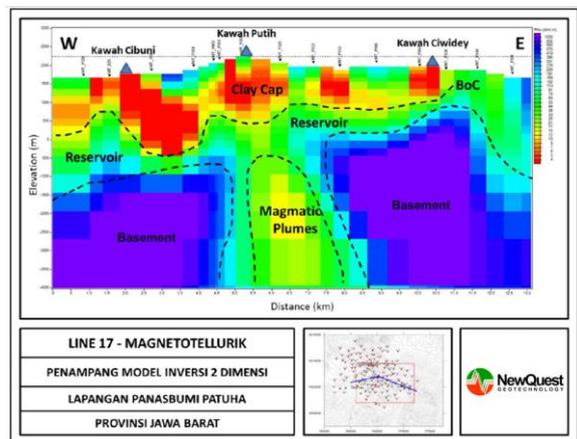
Gambar 10. Peta anomali residual data gravitasi



Gambar 11. Model 2-D data gravitasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Struktur resistivitas bawah permukaan yang didapat dari pemodelan data MT dapat mewakili model konseptual lapangan panasbumi Patuha (Gambar 12). Daerah bernilai resistivitas rendah (<15 ohm.m) tersebar sepanjang lintasan pada elevasi antara 1500 hingga -500 m dpl. Daerah ini diperkirakan berhubungan dengan keberadaan batuan panung (*clay cap*) yang memiliki nilai resistivitas rendah dikarenakan proses alterasi oleh fluida panasbumi



Gambar 12. Interpretasi resistivitas bawah-permukaan

Daerah bernilai resistivitas tinggi (>500 ohm.m) berada di bawah Kawah Cibuni dan Kawah Ciwidey pada elevasi di bawah 0 m dpl. Daerah ini kemungkinan berasosiasi dengan basement dan batuan sumber panas (*hot rock*) berupa batuan beku yang sedang mengalami proses pelepasan panas (*cooling*). Daerah bernilai resistivitas sedang (20-100 ohm.m) terletak di antara daerah resistivitas rendah dan tinggi. Daerah ini diduga berhubungan dengan zona reservoir panasbumi. Adapun daerah bernilai resistivitas

sedang yang berada di antara dua batuan sumber panas, diduga merupakan daerah aliran fluida magmatis yang masih aktif.

Hasil pemodelan forward data gravitasi (Gambar 11) memperlihatkan bahwa batuan yang terdapat di daerah penelitian memiliki nilai densitas berkisar antara 1,9 – 2,7 g/cc. Model dengan nilai densitas tinggi (2,7 g/cc) terdapat pada elevasi < 0 m dpl, model ini diperkirakan berhubungan dengan keberadaan batuan sumber panas. Model dengan nilai densitas menengah (2,4 g/cc) terdapat di sepanjang lintasan berada pada kedalaman < 1000 m dpl. Model ini kemungkinan berhubungan dengan batuan reservoir. Model dengan nilai densitas rendah (1,9 - 2,0 g/cc) terdapat pula di sepanjang lintasan dan berada pada elevasi > 0 m dpl. Model ini diduga berhubungan dengan keberadaan batuan penutup (clay cap).

Model Konseptual

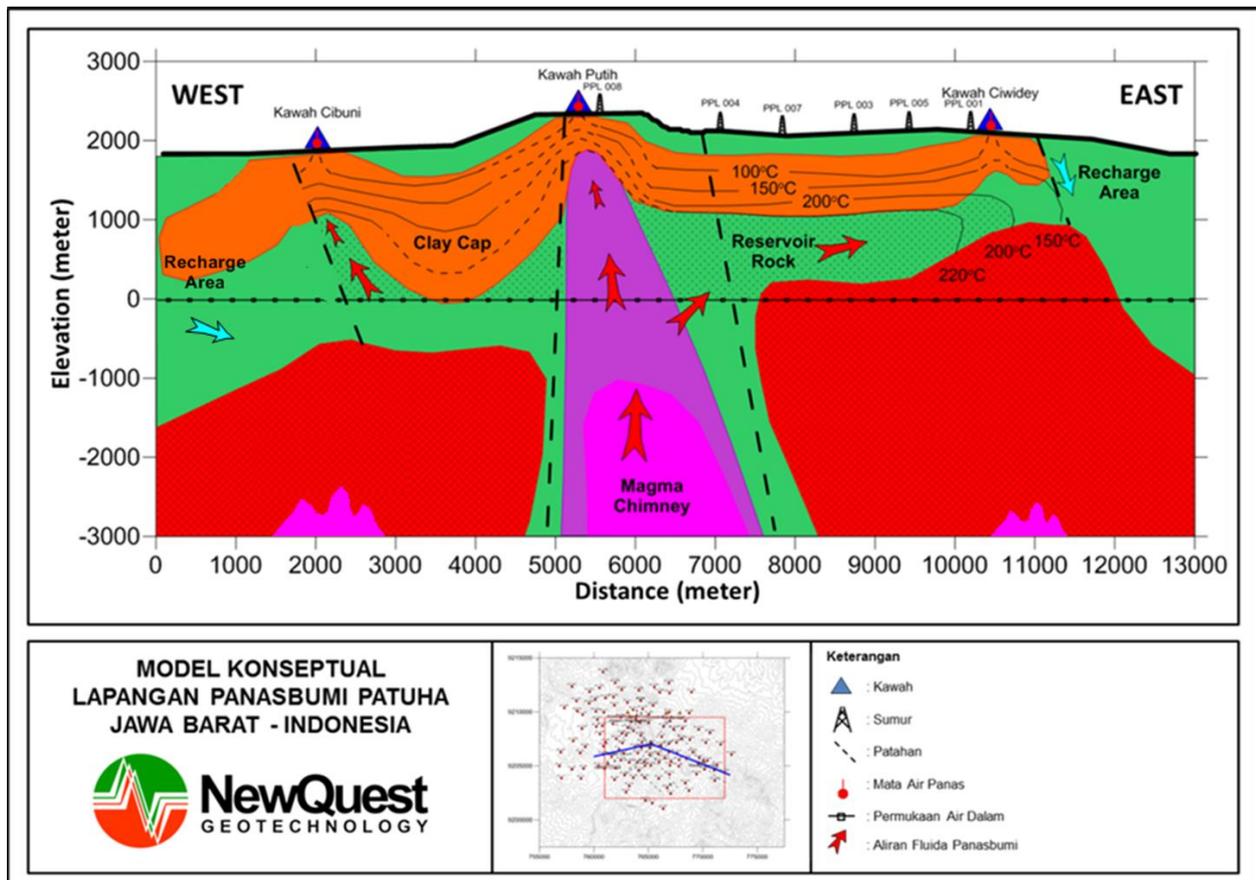
Model konseptual pada lapangan panasbumi Patuha terdiri atas batuan sumber panas (*hot rock*), batuan reservoir (*reservoir rock*), dan batuan penutup (*clay cap*) seperti yang diperlihatkan pada Gambar 13. Batuan penutup tersebar di wilayah prospek dari Barat hingga Timur, pada elevasi 0 – 2000 meter terutama pada Kawah Cibuni, Kawah Putih, dan Kawah Ciwidey. Batuan reservoir terbagi menjadi 2 zona, yaitu zona Kawah Putih – Kawah Ciwidey dan zona Kawah Cibuni. Pembagian batuan reservoir ini dikarenakan kedua zona dipisahkan oleh adanya batuan penutup hingga elevasi 0 meter yang berfungsi sebagai *barrier*. Batuan

panas pada lapangan panasbumi Patuha juga terbagi menjadi 2, yaitu batuan panas Cibuni dan batuan panas Ciwidey. Batuan panas ini kemungkinan berasal dari lava yang sedang mengalami pelepasan panas (*cooling*).

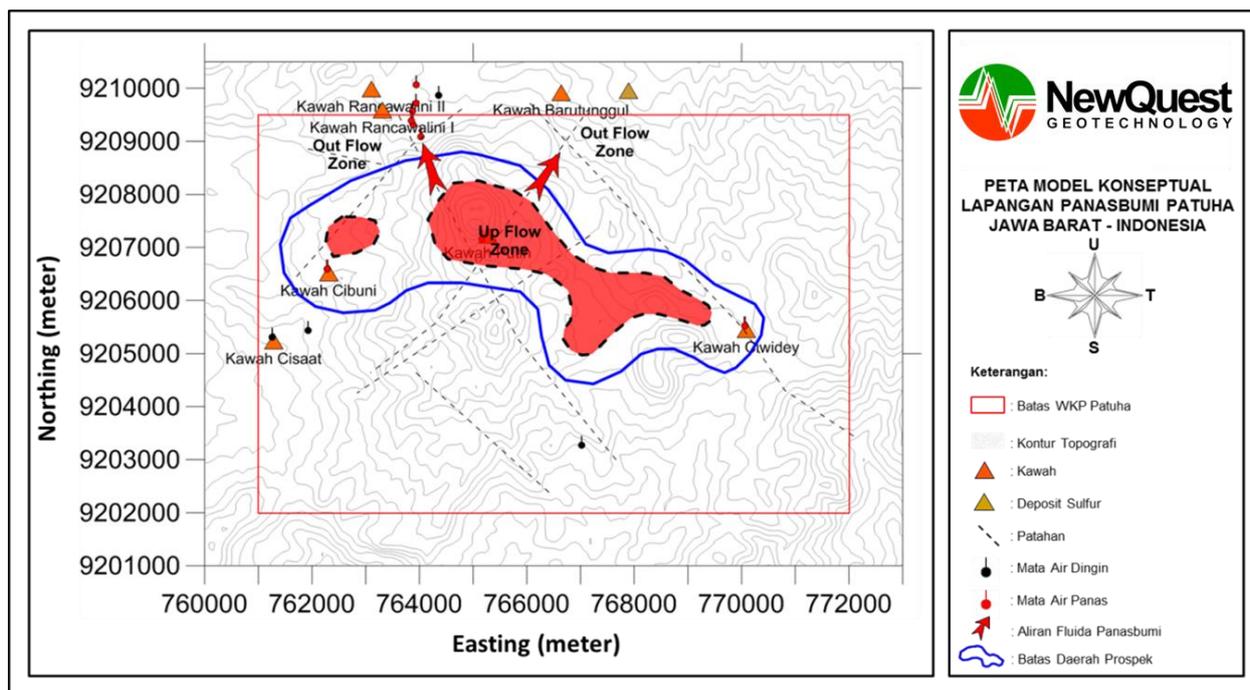
Pada lapangan panasbumi Patuha, selain ketiga batuan tersebut, terdapat pula dugaan adanya daerah yang dialiri zat magmatis yang berada tepat di bawah Kawah Putih. Adanya aliran zat magmatis ini mengakibatkan fluida yang berada di sekitar daerah tersebut bersifat asam. Walaupun memiliki suhu yang cukup tinggi, namun sifat asam yang dimilikinya menjadikan fluida tersebut kurang layak digunakan pada PLTP karena akan mengakibatkan korosi.

Daerah Prospek

Daerah prospek (suhu tinggi dan pH mendekati netral) terdapat di antara Kawah Putih dan Kawah Ciwidey yang telah dibuktikan oleh beberapa sumur. Selain itu terdapat pula daerah prospek di antara Kawah Putih dan Kawah Cibuni. Sebagai tambahan, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mengetahui kualitas fluida panasbumi pada daerah tersebut. Aliran *outflow* sistem panasbumi Patuha mengarah ke bagian utara, hal ini dibuktikan dengan semakin menutupnya geometri batuan penutup menuju arah utara. Selain itu, ditemukan manifestasi berupa mata air panas yang menjadi tambahan bukti adanya aliran panas yang diduga berasal dari sistem panasbumi Patuha (Gambar 14).



Gambar 13. Model konseptual lapangan panasbumi Patuha



Gambar 14. Daerah prospek lapangan panasbumi Patuha

KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari penelitian ini antara lain:

- a. Sistem panasbumi pada lapangan panasbumi Patuha terdiri dari batuan penudung (*clay cap*), batuan reservoir (*reservoir rock*), dan batuan panas (*hot rock*). Batuan penudung tersebar di daerah penelitian dari Barat hingga Timur, pada elevasi 0 – 2000 meter terutama pada Kawah Cibuni, Kawah Putih, dan Kawah Ciwidey. Batuan reservoir terbagi menjadi 2 zona, yaitu zona Kawah Putih – Kawah ciwidey dan zona Kawah cibuni. Pembagian batuan reservoir ini dikarenakan kedua zona dipisahkan oleh adanya batuan penudung hingga elevasi 0 meter yang berfungsi sebagai *barrier*. Batuan panas pada lapangan panasbumi Patuha juga terbagi menjadi 2, yaitu batuan panas Cibuni dan batuan panas Ciwidey. Batuan panas ini kemungkinan berasal dari lava yang sedang mengalami pelepasan panas (*cooling*). Pada Kawah Putih, terdapat indikasi aliran zat magmatis dengan pH asam yang bersifat korosif.
- b. Keberadaan zona permeabel dapat dipetakan dengan menganalisis data geosains pada daerah penelitian yang dicirikan dengan nilai resistivitas sedang, anomaly gravitasi rendah, nilai temperature tinggi, keberadaan manifestasi dan struktur geologi. Zona permeabel pada lapangan panasbumi Patuha tersebar di 3 kawah utama yaitu Kawah Cibuni, Kawah Putih, dan Kawah Ciwidey. Penyebarannya relatif berarah Barat-Timur dengan sedikit menerus ke arah Utara sebagai zona (*outflow*).
- c. Model konseptual lapangan panasbumi Patuha dapat dikonstruksi dengan mengintegrasikan data geologi, geokimia, dan geofisika. Zona *upflow* mayoritas berada di sekitar Kawah Putih yang menerus ke arah Kawah Ciwidey. Kawah Cibuni juga memiliki zona up flow yang terpisah dengan Kawah Putih dikarenakan keberadaan barrier berupa *clay cap*. Zona *outflow* menuju arah Kawah

Barutunggul dan kawah Rancawalini yang berada di barat-laut dan timur-laut dari Kawah Putih.

- d. Pengembangan lapangan panasbumi Patuha direkomendasikan berada pada daerah *upflow* yang mayoritas berada di daerah sekitar Kawah Putih dan Kawah Ciwidey. Sebagai catatan, pengembangan di sekitar daerah Kawah Putih memiliki resiko yang lebih tinggi dikarenakan keberadaan aliran zat magmatis dengan pH asam yang bersifat korosif.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Geo Dipa Energi yang telah menyediakan data geosains pada lapangan panasbumi Patuha dan juga atas ijin untuk mempublikasikan hasil penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT. NewQuest Geotechnology yang telah mendukung penelitian dengan *software* GravPro-X.

DAFTAR ACUAN

- Daud, Y., Fahmi, F., Nuqramadha, W.A., Heditama, D.M., Pratama, S.A. & Suhanto, E. (2015). 3-Dimensional Inversion of MT Data over the Arjuno-Welirang Volcanic Geothermal System, East Java (Indonesia). *World Geothermal Congress*.
- Dezayes, C., Genter, A., & Valley, B. (2010). Structure of The Low Permeable Naturally Fractured Geothermal Reservoir At Soultz. In *Comptes Rendus Geosciences* 343 (pp. 517-530).
- Layman, E. B., & Soemarinda, S. (2003). The Patuha Vapor-Dominated Resource West Java, Indonesia. *Twenty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. California: Stanford University.

- Salem, A., Furuya, S., Aboud, E., Elawadi, E., Jotaki, H., & Ushijima, K. (2005). Subsurface Structural Mapping Using Gravity Data of Hoho Geothermal Area, Central Kyushu, Japan. *World Geothermal Congress*.
- Sriwana, T., Bergen, M. v., Varekamp, J., Sumarti, S., Takono, B., Os, B. v., et al. (2000). Geochemistry of the acid Kawah Putih lake, Patuha Volcano, West Java, Indonesia. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 97, 77-104.
- Telford, W. M. (1990). *Applied Geophysics*. New York: Cambridge University Press.
- Vozoff, K. (1991). The Magnetotelluric Method. In *Electromagnetic methods in applied geophysics applications part A and part B* (pp. 641-711).