

3-D Inversion of Magnetotelluric Data in Kepahiang Geothermal System, Bengkulu

Fikri Fahmi¹, Yunus Daud^{1,2}, Boko Nurdianto Swardi³, Ahmad Zarkasyi⁴, Asep Sugiyanto⁴ and Edi Suhanto⁴

¹PT . NewQuest Geotechnology, Indonesia

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

³Master Program in Reservoir Geophysics, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

⁴Center for Geological Resources, Geological Agency, Indonesia

fikri.fahmi@newquest-geotechnology.com

Keywords: 3-dimension, inversion, MT, Kepahiang, Bengkulu, Indonesia, volcanic geothermal system

ABSTRACT

Kepahiang geothermal prospect area is located in Kabupaten Kepahiang, Bengkulu Province. The geothermal system in this area is associated with Mt. Kaba volcanic activities. Geologically, quaternary rocks produced by volcanic eruption become the dominant rocks in this area. Geothermal manifestations in Kepahiang Prospect consist of fumarol-solfatar (96-360oC), bicarbonate hot springs (31-34oC) with neutral pH, altered rocks and caldera, as well as thick sulphur sublimation on the summit of Mt. Kaba. MT data acquisition was carried out by the Center for Geological Resources of the Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). 3-D inversion of MT data in Kepahiang Prospect conducted by using MT3Dinv-X aims to obtain the structure of rocks resistivity in this area. The result shows that 3-D inversion can delineate Kepahiang geothermal system very well. Conductive layer (<10 ohm-m) with approximately 1-1,5 km thickness is indicated as claycap layer of Kepahiang geothermal system which open to Mt. Kaba direction. The zone below the claycap with higher resistivity (20-80 ohm-m) is indicated as reservoir zone, while a body with high resistivity (>100 ohm-m) is interpreted as heat source which is associated with volcanic activity of Mt.Kaba.

PENDAHULUAN

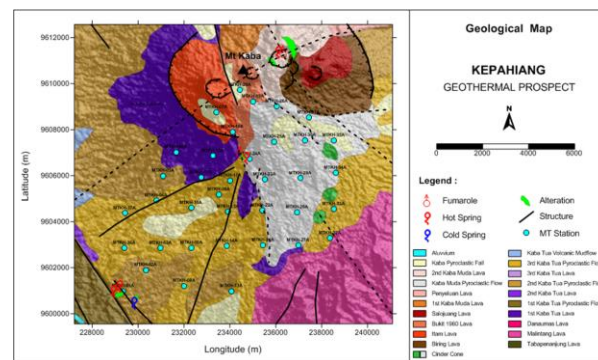
Seiring dengan perkembangan algoritma inversi 3-dimensi dan kemajuan teknologi komputer saat ini, riset tentang pemodelan inversi 3-dimensi data MT semakin banyak dilakukan pada beberapa daerah prospek panasbumi di dunia, termasuk Indonesia. Inversi 3-dimensi dinilai mampu untuk menggambarkan struktur resistivitas dengan baik karena menggunakan asumsi model bumi 3-dimensi yang lebih mendekati dengan model bumi yang sebenarnya. Permasalahan seperti distribusi titik pengukuran yang acak dapat teratasi dengan inversi 3-dimensi, karena dalam prosesnya inversi 3-dimensi akan menempatkan posisi titik pengukuran sesuai dengan posisi yang sebenarnya tanpa perlu dilakukan proyeksi ke lintasan tertentu seperti pada inversi 1-dimensi maupun 2-dimensi. Pada paper ini penulis mengaplikasikan inversi 3-dimensi pada data MT Kepahiang.

Pada tahun 2011, Pusat Sumber Daya Geologi Republik Indonesia telah melakukan akuisisi data MT di daerah prospek panasbumi Kepahiang sebagai tindak lanjut dari survei terpadu pada tahun 2010 yang dikerjakan oleh Kusnadi, D., dkk (2011) dan Arsadipura, dkk (2010). 37 titik MT telah diukur dan terdistribusi di sekitar Bukit Kaba hingga sekitar mata air panas Babakan Bogor dengan jarak antar titik berkisar antara 1-2 km.

Pada paper ini penulis mencoba untuk menggambarkan daerah prospek panasbumi Kepahiang dan aplikasi inversi 3-dimensi pada data MT Kepahiang untuk membuat model konseptual sistem panasbumi di daerah ini. Informasi terkait geologi dan geokimia juga dijelaskan secara singkat dalam paper ini.

TATANAN GEOLOGI DAN GEOKIMIA

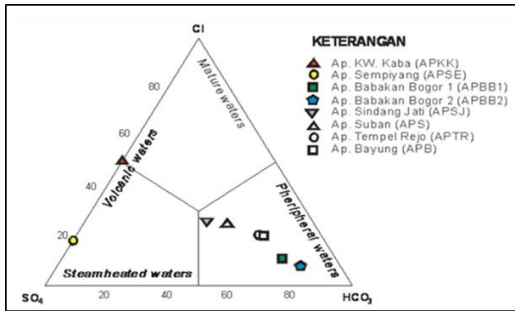
Daerah prospek panasbumi Kepahiang terletak 90 km di timur laut kota Bengkulu, provinsi Bengkulu. Daerah ini terletak pada jalur subduksi pada daerah busur magmatik Sumatera bagian barat pada tatanan tektonik Indonesia Bagian Barat. Keberadaan sistem panasbumi di daerah ini berhubungan dengan aktivitas vulkanik yang berkembang di jalur Ring of Fire pulau Sumatera, khususnya aktivitas vulkanik Gn. Kaba.



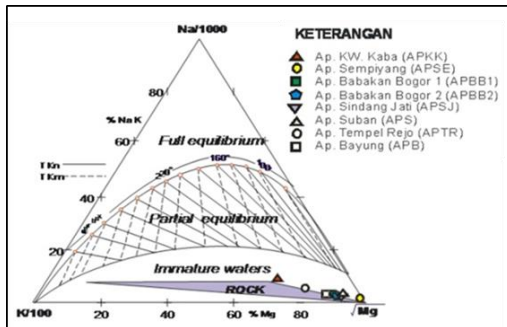
Gambar 1. Peta Geologi Daerah Prospek Panasbumi Kepahiang (Kusnadi dkk, 2011) dimodifikasi oleh Penulis

Kondisi geologi daerah Kepahiang ditunjukkan seperti pada Gambar 1. Wilayah ini sebagian besar ditutupi oleh endapan hasil aktifitas gunungapi, terutama dari zaman Kuartar, berupa endapan Nfa, breksi vulkanik dan aliran lava berkomporsi andesit – basaltik. Bahan sedimen dan vulkanik tersier juga dijumpai di daerah ini yang secara stratigrafi melandasi endapan Kuartar di atasnya (Natawidjaja dan Ruslan, 1994). Kusnadi, dkk., (2011) menjelaskan bahwa sejarah pembentukan Gunung Kaba diawali pada Kuartar Awal, berupa erupsi yang bersifat eksplosif yang menghasilkan produk lava Kaba Tua I hingga III dan produk piroklastik aliran maupun jatuhan. Seiring dengan aktivitas tektonik yang berkembang di daerah Sumatera pada kala tersebut, di daerah Gunung Kaba mengalami letusan hebat yang membentuk rim kaldera seperti yang ditunjukkan pada peta di bagian barat dan timur Komplek Kaba. Setelah terjadi letusan besar yang membentuk pola rim kaldera terjadi kekosongan dan rekahan yang cukup intensif. Sesar – sesar yang berarah

baratlaut – tenggara seperti sesar Kaba dan sesar Sempiang memfasilitasi terjadinya erupsi magmatik berikutnya dari mulai produk Bukit Itam, Bukit 1960, Biring, Salojuang dan Gunung Kaba yang berarah hampir barat – timur sesuai dengan arah sesar Itam. Masing-masing produk tersebut berada di dalam rim kaldera Komplek Kaba sedangkan sesar Bandung Baru yang berkembang pada tubuh Kaba bagian selatan memfasilitasi munculnya kerucut – kerucut sinder seperti yang dijumpai di daerah Kepahiang Indah.



Gambar 2. Diagram segitiga Cl-SO₄-HCO₃ (Kusnadi dkk, 2011)

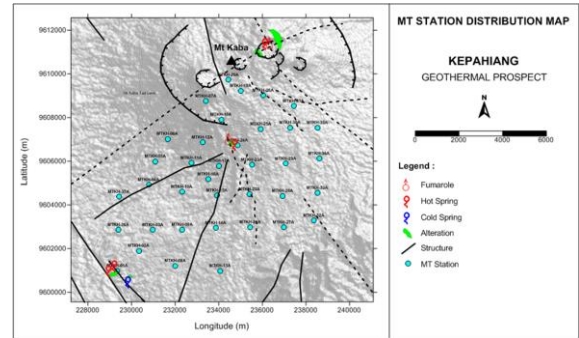


Gambar 3. Diagram segitiga Na-K-Mg (Kusnadi dkk, 2011)

Manifestasi panasbumi daerah Kepahiang dan sekitarnya terdiri dari fumarol, solfatara, mata air panas, batuan ubahan dan kawah, disertai sublimasi belerang cukup tebal di puncak G. Kaba (temperatur 96-360°C). Terdapat dua kelompok manifestasi, yang pertama yaitu kelompok Sempiang terdapat di hulu sungai Airputih daerah Bukit Itam berada pada ketinggian 1286 mdpl, terdiri dari pemunculan mata air panas, fumarol dan batuan ubahan. Pada fumarol Sempiang tercium bau H₂S yang sangat kuat, terdapat sublimasi belerang, temperatur tertinggi 94,1 °C. Di sekitar fumarol ini terdapat mata air panas dengan temperatur 94,1 °C dan pH = 4,20 dengan debit 30 l/detik. Kelompok kedua adalah kelompok Babakan Bogor dijumpai di kampung Babakan Bogor pada ketinggian 573-604 mdpl. Manifestasi berupa pemunculan 2 mata air panas dengan temperatur 41,3 °C dan pH = 5,52-6,5 dan debit 2-20 l/detik. Selain itu di babakan Bogor, terdapat mata air dingin, muncul pada elevasi 619 mdpl, temperatur 30,1 °C pH = 6,22 dan debit 20 l/detik (Arsadipura, dkk., 2011). Hasil penelitian Kusnadi, dkk., (2011) menghasilkan diagram segi tiga Cl-SO₄-HCO₃ (Gambar 2), air panas fumarol Kawah Kaba dan Sempiang bertipe sulfat asam, sedangkan air panas Babakan Bogor 1, Babakan Bogor 2, Sindang Jati, Suban, Tempel Rejo, dan air panas Bayung bertipe bikarbonat. Pada diagram segitiga Na-K-Mg (Gambar 3), semua mata air panas berada pada zona *immature water*, selain adanya interaksi antara fluida dengan batuan dalam keadaan panas, juga bercampur dengan air permukaan (*meteoric water*). Temperatur reservoir diperkirakan dengan menggunakan geotermometer gas dari fumarol Sempiang sebesar 250 °C.

SURVEI MAGNETOTELURIK

PSDG telah melakukan akuisisi data MT sebanyak 37 titik yang terdistribusi di sisi selatan dari G. Kaba yang mencakup lokasi manifestasi fumarol dan air panas Sempiang (Gambar 4). Kami mengaplikasikan pemodelan inversi 3-dimensi pada data MT Kepahiang untuk mendapatkan struktur resistivitas batuan yang representatif menggambarkan sistem panasbumi yang berkembang di daerah ini. Pemodelan inversi 3-dimensi dilakukan dengan menggunakan software MT3DInv-X (Daud et al, 2012) yang mengaplikasikan algoritma *occam data space* (Siripunvaraporn, 2010). Hasil inversi 3-D dengan software ini terintegrasi dengan software GeoSlicer-X (Daud dan Saputra, 2010) untuk keperluan visualisasi.



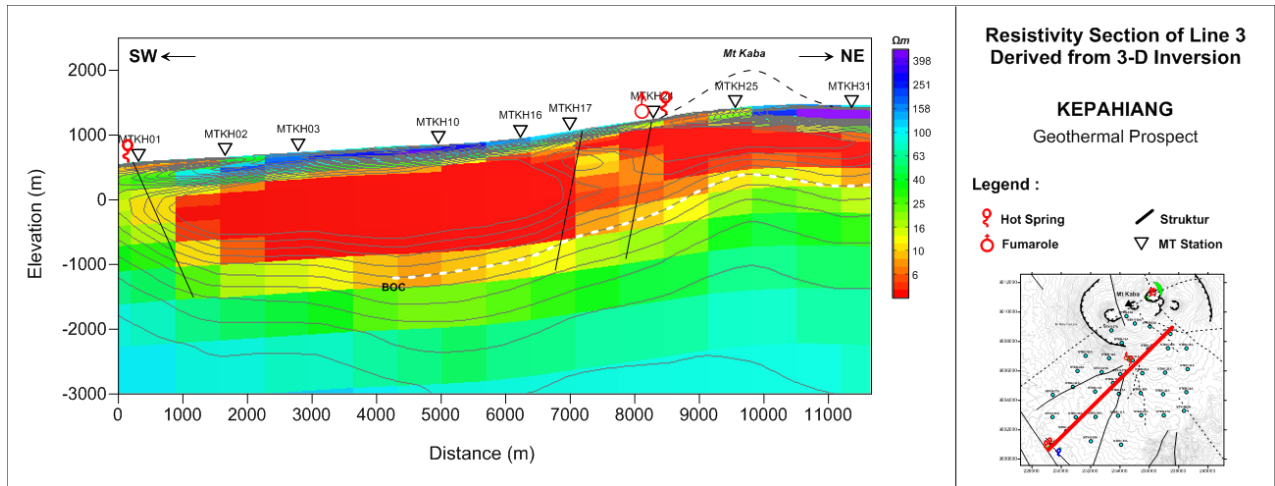
Gambar 4. Distribusi titik pengukuran MT Kepahiang

Model 3-dimensi terdiri dari blok-blok yang tersusun dalam *mesh-grid* 3-dimensi dalam satu sistem koordinat *dummy*. Pusat dari sistem koordinat *dummy* terletak di tengah-tengah dari distribusi titik MT yang ada. Dalam *software* MT3DInv-X, sumbu x berorientasi utara-selatan (utara positif), sumbu y berorientasi timur-barat (timur positif), dan sumbu z positif ke arah bawah. Proses inversi 3-dimensi data MT Kepahiang menggunakan model awal bumi homogen 100 ohm-m. Jumlah blok yang digunakan untuk arah utara-selatan sebanyak 34 blok, timur-barat sebanyak 34 blok, dan blok ke arah vertikal sebanyak 22. Sehingga total blok yang digunakan dalam proses inversi sebanyak $M=34 \times 34 \times 22=25.432$.

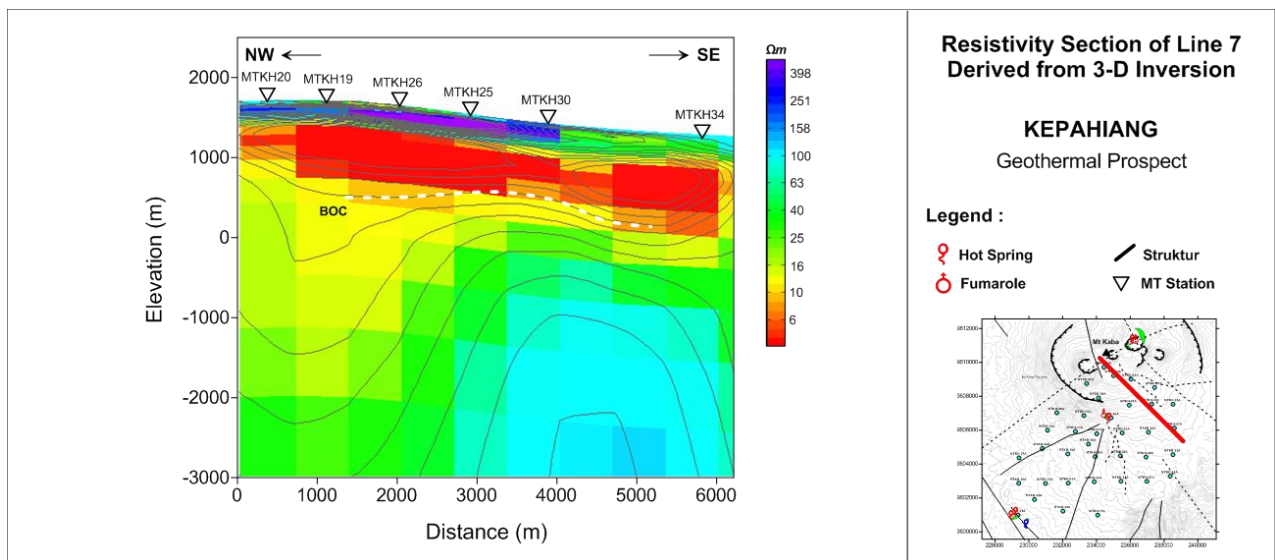
Input data untuk proses inversi menggunakan keseluruhan elemen tensor impedansi yang terdiri dari 8 response ($Z_{xx}.real, Z_{xx}.imag, Z_{xy}.real, Z_{xy}.imag, Z_{yx}.real, Z_{yx}.imag, Z_{yy}.real, Z_{yy}.imag$). *Error floor* diset 5 % untuk mengatasi data-data yang memiliki *error bar* yang besar, sehingga data hasil perhitungan bisa *fit* dengan data lapangan. Besar dimensi data yang digunakan dalam proses inversi 3-dimensi bergantung pada jumlah stasiun, frekuensi, dan element tensor impedansi. Ukuran dimensi data yang digunakan dalam proses inversi kali ini adalah 37 titik MT, 8 periode dengan rentang frekuensi 100 – 0.01 Hz, dan seluruh elemen tensor impedansi. Sehingga total dimensi data yang digunakan adalah $N=37 \times 8 \times 8=2368$.

HASIL DAN PEMBAHASAN

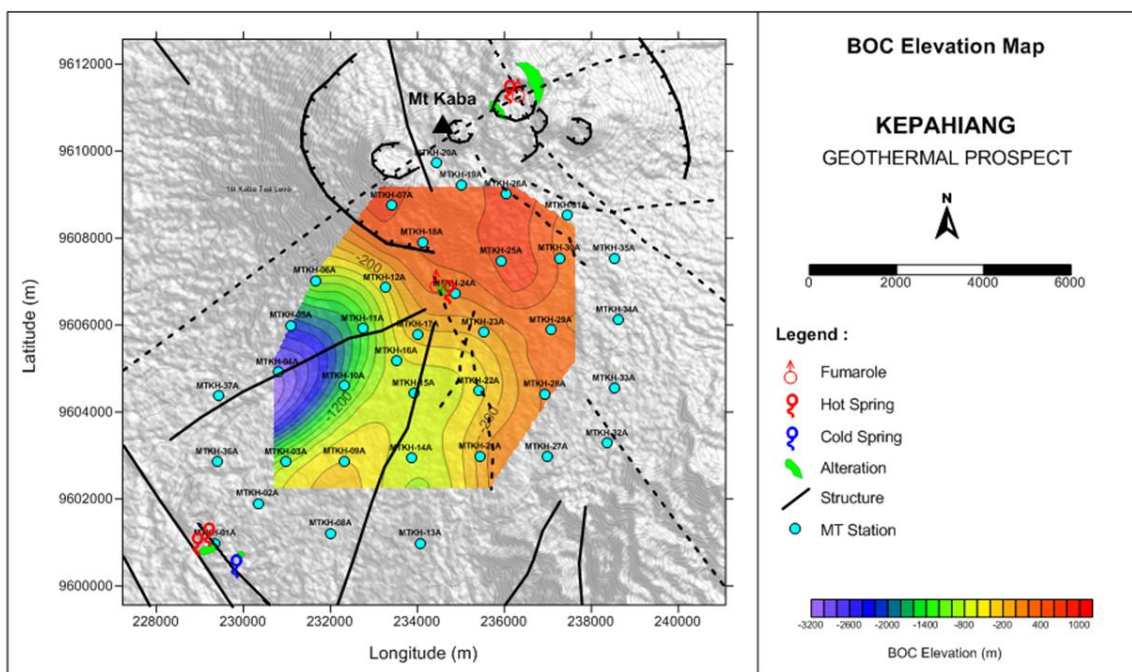
Inversi 3-dimensi data MT Kepahiang pada iterasi 7 menghasilkan model yang cukup representatif untuk menggambarkan sistem panasbumi yang berkembang di daerah ini. Proses inversi 3-dimensi melibatkan data dengan dimensi yang cukup besar sehingga proses berjalannya inversi sangat bergantung pada kapasitas komputer yang digunakan. Proses inversi 3-dimensi data MT Kepahiang dikerjakan pada komputer dengan spesifikasi : processor Intel Pentium core i7 RAM 16GB dan untuk mencapai iterasi 7 diperlukan waktu sekitar 16 jam.



Gambar 4. Penampang resistivitas lintasan 3



Gambar 5. Penampang resistivitas lintasan 7



Gambar 6. Peta Elevasi BOC

Struktur resistivitas bawah permukaan yang dihasilkan dari pemodelan inversi 3-dimensi menunjukkan keberadaan sistem panasbumi yang berkembang di daerah ini. Pola resistivitas *high-low-high* yang merupakan karakteristik umum pola resistivitas yang sering ditemukan di daerah prospek panasbumi tampak di dalam model. Keberadaan lapisan konduktif dan pola *updome* di dalam model juga menjadi indikasi lain. Kedua hal ini pada umumnya berkaitan dengan proses alterasi dan aliran panas pada sistem panasbumi. Semua indikasi tersebut dapat dilihat pada penampang resistivitas lintasan 3 dan 7 (Gambar 4 dan Gambar 5).

Pada penampang resistivitas lintasan 3 dan 7 dapat ditemukan adanya lapisan konduktif dengan nilai resistivitas < 10 ohm-m dengan ketebalan antara 1-1.5 km. Di bawah lapisan tersebut terdapat lapisan dengan nilai resistivitas yang lebih tinggi berkisar antara 20 – 80 ohm-m. Anomali resistif juga ditemukan pada lapisan paling bawah dengan nilai resistivitas > 100 ohm-m.

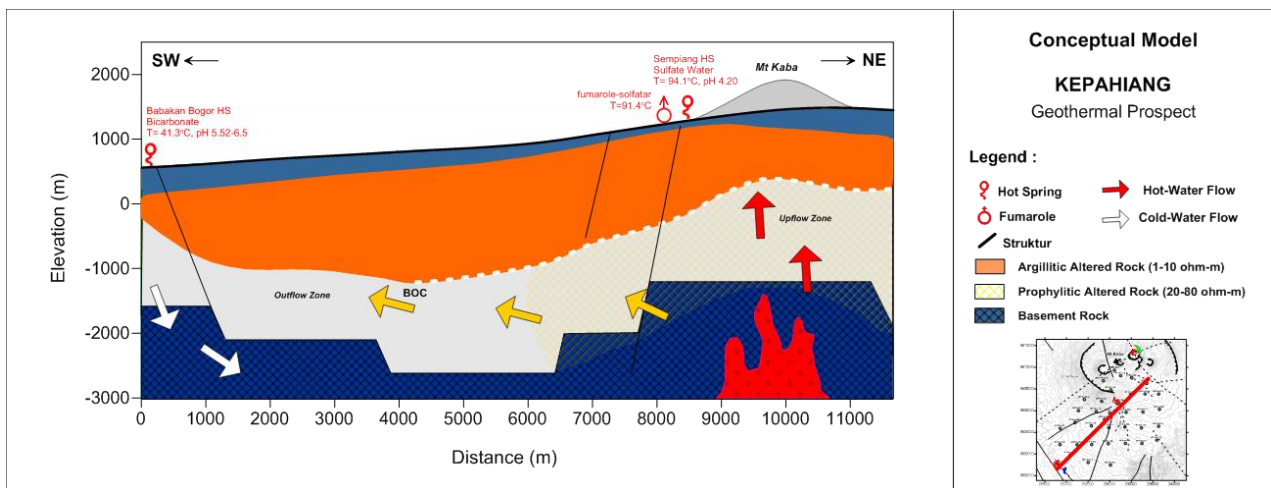
Peta elevasi BOC (Gambar 6) dibuat dengan memplot elevasi kontur resistivitas 10 ohm-m dari model. Dari peta tersebut dapat terlihat bahwa BOC di sekitar fumarol dan air panas Sempiang dan area di sekitar rim Kaldera G. Kaba berada pada elevasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan area disekitarnya. Elevasi BOC semakin rendah ke arah baratdaya G. Kaba yang menunjukkan adanya penebalan lapisan konduktif pada arah tersebut. Trend secara umum kontur elevasi BOC cenderung berarah NW-SE.

Integrasi antara data geologi, geokimia, dan geofisika daerah prospek panasbumi Kepahiang dilakukan untuk membuat model konseptual sistem panasbumi di daerah ini. Lapisan konduktif yang ada di dalam penampang lintasan 3 dan 7 dapat diinterpretasikan sebagai lapisan *clay cap* yang

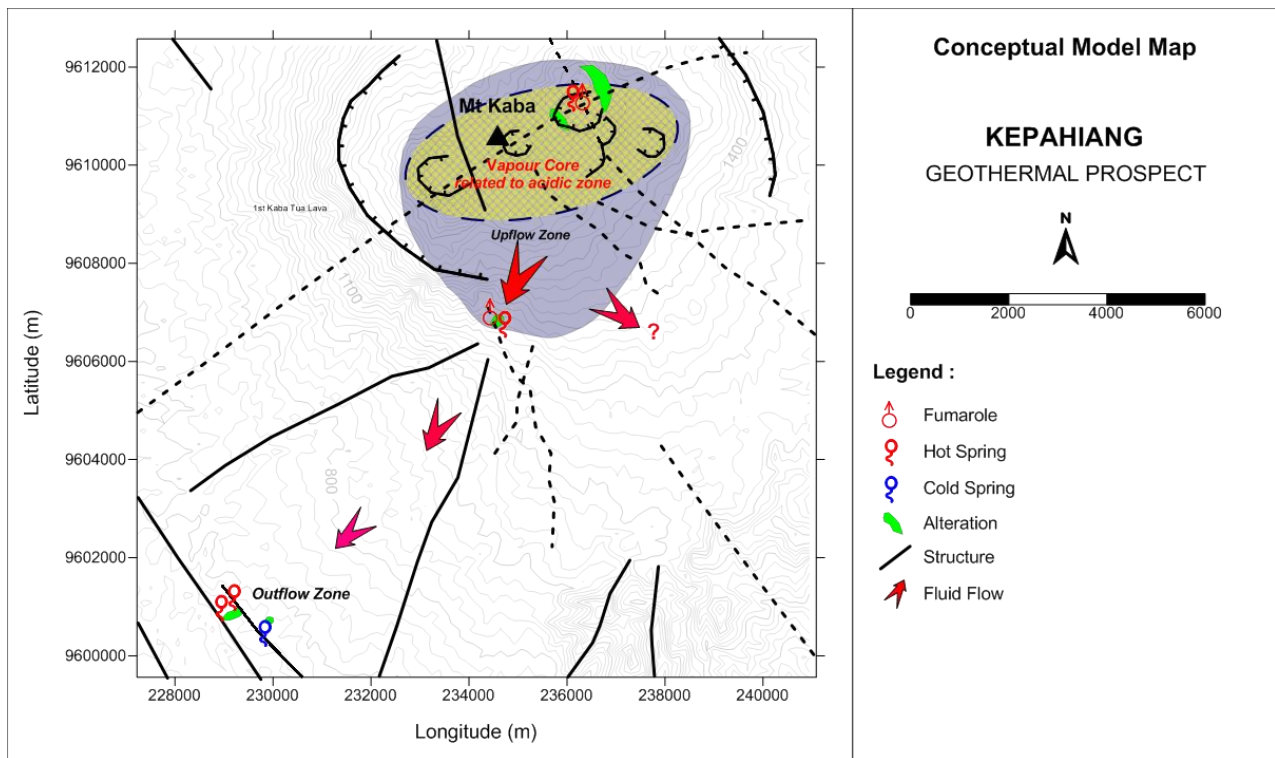
merupakan hasil dari proses alterasi hidrotermal yang terjadi di daerah ini. Data geologi daerah panasbumi Kepahiang menunjukkan adanya batuan yang memiliki sifat *impermeable* dengan kandungan mineral lempung jenis montmorilonit dan kaolinit yang cukup tinggi pada daerah alterasi di sekitar manifestasi Sempiang. Batuan alterasi yang terbentuk merupakan tipe argilik hingga argilik lanjut. Alterasi tersebut muncul pada aliran piroklastik dan lava produk Gunung Kaba. Batuan penudung ini berada pada zona struktur sesar Sempiang yang berarah hampir utara selatan. (Kusnadi, dkk., 2011).

Pola *updome* dalam penampang resistivitas lintasan 3 dan 7 ditemukan di sekitar lokasi manifestasi fumarol dan mata air panas sempiang dan menerus ke arah rim Kaldera G. Kaba. Hal ini mengindikasikan bahwa di sekitar area tersebut merupakan zona *upflow* dari sistem panasbumi Kepahiang. Hal ini diperkuat dengan keberadaan fumarol-solfatar dan air panas sempiang yang bertipe *sulfate water* di sekitar area ini. Adapun zona *outflow* diindikasikan oleh elongasi dan penebalan lapisan konduktif ke arah barat daya dari G. Kaba (seperti yang ditunjukkan pada peta elevasi BOC di Gambar 6) dimana terdapat air panas Babakan Bogor yang bertipe bikarbonat.

Berdasarkan penelitian geokimia yang dilakukan oleh Kusnadi, dkk., (2011) menunjukkan bahwa panasbumi Kepahiang berada di kompleks G. Kaba yang merupakan gunungapi aktif tipe A. Sumber panas diperkirakan berhubungan dengan kegiatan vulkanisme Gunung Kaba Baru. Munculnya anomali resistivitas tinggi pada penampang resistivitas lintasan 3 dan 7 di sekitar rim Kaldera G. Kaba mengkonfirmasi keberadaan sumber panas di area ini.



Gambar 6. Model konseptual sistem panasbumi Kepahiang



Gambar 7. Peta model konseptual sistem panasbumi Kepahiang

MODEL KONSEPTUAL

Dari hasil integrasi data geologi, geokimia, dan geofisika tersebut kami membuat model konseptual sistem panasbumi Kepahiang seperti ditunjukkan Gambar 6. Adapun model konseptual dalam bentuk peta ditunjukkan pada Gambar 7. Aliran hidrotermal pada sistem panasbumi Kepahiang ditunjukkan dengan menggunakan tanda panah. Aliran *upflow* sistem panasbumi Kepahiang mencakup lokasi rim kaldera G. Kaba sampai dengan lokasi fumarol dan mata air panas Sempiang (*sulfate water*), sedangkan aliran *outflow* menuju ke arah air panas Babakan Bogor yang berada di sebelah baratdaya G. Kaba. Zona Asam kemungkinan berada di dalam rim kaldera G. Kaba dimana aktivitas vulkanik G. Kaba Muda berkembang di sekitar area ini dan muncul manifestasi fumarole-solfatara yang cukup impresif. BOC sebagai posisi puncak reservoir sistem panasbumi Kepahiang berada pada elevasi sekitar 300 m. Sumber panas di dalam model digambarkan berada di sekitar puncak G. Kaba yang menunjukkan bahwa sistem panasbumi Kepahiang berasosiasi dengan aktivitas vulkanik G. Kaba.

KESIMPULAN

Inversi 3-dimensi data MT di daerah prospek panasbumi Kepahiang dapat menggambarkan sistem panasbumi di daerah ini dengan baik. Model resistivitas yang didapatkan menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data geologi dan geokimia di daerah ini. Dari hasil studi ini telah dibuat model konseptual sistem panasbumi Kepahiang. Zona *upflow* berada di area rim kaldera G. Kaba, yang diindikasikan pada pola *updome* resistivitas yang membuka ke arah area ini. Zona *outflow* diindikasikan dari elongasi dan penebalan lapisan konduktif yang mengarah ke arah baratdaya G. Kaba dimana terdapat mata air panas Babakan Bogor yang bertipe bikarbonat. TOR berada pada elevasi sekitar 300 m. Keberadaan fumarol-solfatara, dan mata air panas yang disertai gas H₂S yang sangat kuat

mengindikasikan bahwa sistem panasbumi Kepahiang merupakan sistem panasbumi vulkanik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PSDG yang telah menyediakan data geologi, geokimia, dan data MT Kepahiang dan juga atas ijin untuk mempublikasikan hasil penelitian ini. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada management PT. NewQuest Geotechnology yang telah mendukung penelitian dengan *software* MT3DInv-X dan Geoslicer-X.

DAFTAR ACUAN

Daud, Yunus, and Saputra, Rachman. (2010). GeoSlicer-X: A 3-dimensi Interactive Software for Geothermal Data Analysis, Proceedings World Geothermal Congress 2010.

Daud, Yunus., Heditama, D. M., Agung, Lendriadi., Amriyah, Qonita., Aswo, Wambra., Pratama, A. S., Saputra, Rachman. (2012). 3-dimensi Inversion Of MT Data Using MT3DInv-X Software. Proceedings The 12th Annual Indonesian Geothermal Association Meeting & Conference 2012.

Siripunvaraporn, W., Egbert, G. L., Yongmiwon, dan Uyeshima, M. (2005). Three-dimensional Magnetotelluric Inversion: Data Space Method. Physics of The Earth and Planetary Interiors 150 (2005) 3-14.

Kusnadi, D., Nurhadi, M., Suparman. 2011. Penyelidikan Terpadu Geologi dan Geokimia Daerah Panasbumi Kepahiang, Kabupaten Kepahiang, Bengkulu. Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi Tahun 2010. PSDG, Bandung

Natawidjaja dan Ruslan, 1994. Kondisi Tektonik Serta Hubungannya dengan Kegempaan dan Aktivitas Gunung Api Di Daerah Rejang Lebong, Bengkulu. Prosiding hasil-

hasil penelitian puslitbang geoteknologi LIPI 1994. LIPI,
Bandung

Arsadipura, S., Kholid, M., Djukardi, D., 2010.,
Penyelidikan Geofisika Terpadu Gaya Berat, Geomagnet
Dan Geolistrik Daerah Panas Bumi Kepahiang, Kecamatan
Kaba Wetan, Kabupaten Kepahiang, Provinsi Bengkulu,
Prosiding Hasil Kegiatan Pusat Sumber Daya Geologi
Tahun Anggaran 2010.