

Modeling of Geothermal Reservoir in Lawu field Using 2-D Inversion of Magnetotelluric Data

M.R. Annas Qahhar¹, Yunus Daud¹, Surya Aji Pratama², Ahmad Zarkasyi³, Asep Sugiyanto³, Edi Suhanto³

¹Master Program in Geothermal Exploration, Graduate Program of Physical Science, The University of Indonesia

²PT NewQuest Geotechnology, Indonesia

³Center for Geological Resources, Geological Agency, Indonesia

mrannas.qahhar@ui.ac.id

Keywords: Field of the Lawu Geothermal, Magnetotelluric method, 2D inversion

ABSTRAK

The Lawu geothermal prospect is located in Karanganyar - Central Java and Magetan - East Java. Geologically, Lawu is a quaternary (Pleistocene) active volcanic geothermal indicated by the presence of lava rock. The rocks hosting this area are intrusive and sedimentary rocks developed during tertiary to quarter. Surface manifestations present in this area are Fumarole with temperature of 93°C located on the summit of Mt. Lawu, and Chloride-Bicarbonate hot springs with 30-40 °C temperature spreaded in northwest and southwest directions of Mt. Lawu. Based on geochemical data, the reservoir temperature is estimated to be 250°C. The zone of prospect area, reservoir geometry and geothermal conceptual model are derived from geophysical data by using Magnetotelluric (MT) method. MT survey was focused in southwest direction of Mt. Lawu, associated with the location of manifestations. The total of MT survey locations is 35 points with 1000 m spacing between points. MT data processing was done by using standard procedure with co-gridding method for static shift correction. 2-Dimensional inversion was done by using WinGLink with 10 line sections. The inversion result shows the presence of low resistivity layer (<10 ohm-m) which is interpreted as clay cap. This clay cap is associated with Base of Conductor (BOC) layer that lies on -500 m elevation. The high resistivity zone is interpreted as hot rock. This result could be a guidance in determining drilling target location.

1. PENDAHULUAN

Daerah panas bumi Gunung Lawu terletak di antara Provinsi Jawa Tengah dan Jawa Timur dimana Pulau Jawa merupakan salah satu daerah jalur subduksi atau jalur tumbukan antara dua lempeng besar dunia, yaitu lempeng Eurasia dan Indo-Australia. Daerah Gunung Lawu berada di daerah vulkanik kuartar yang penyusun batuanannya berupa andesit-basaltik. Manifestasi panas bumi yang muncul berupa fumarol, mata air panas, dan batuan ubahan di daerah Candradimuka (lereng selatan Gunung Lawu) dengan indikasi bahwa daerah tersebut merupakan *high temperature*.

Metode magnetotelluric (MT) merupakan variasi medan magnet bumi terhadap domain frekuensi elektromagnetik. Variasi medan magnet mempunyai jangkauan sekitar 10 – 0.001 Hz. Semakin besar nilai frekuensi, maka akan semakin dangkal penetrasi kedalaman yang kita peroleh, begitu juga sebaliknya. Metode MT mengukur medan magnet dan medan listrik secara bersamaan, sumbu pengukuran medan listrik dan medan magnet saling tegak lurus antara satu dengan yang lainnya. Dari hasil pengukuran ini didapatkan nilai resistivitas batuan bawah-permukaan.

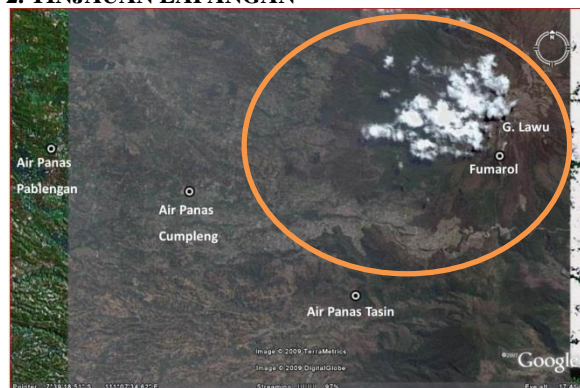
MT merupakan metode geofisika yang sesuai jika digunakan di lapangan panas bumi. Hal ini dikarenakan metode MT dapat mengidentifikasi tinggi rendahnya nilai resistivitas batuan. Daerah panas bumi dicirikan dengan adanya batuan lempung yang disebabkan adanya proses alterasi hidrotermal di bawah permukaan. Nilai resistivitas batuan pada batuan lempung ini sangat rendah.

Inversi 2 Dimensi merupakan suatu proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk memperoleh distribusi sifat fisis batuan di bawah permukaan. Pemodelan data lapangan dilakukan dengan pemodelan inversi yang mencari kesesuaian antara kurva pada model dan data lapangan.

Metode yang digunakan adalah metode NLCG (NonLinear Conjugate Gradient), yang dapat secara langsung meminimalisasi problem yang bukan kuadratik, membebaskan kerangka iterasi dan inversi linear (Rody & Mackie, 2001). Metode NLCG mengevaluasi fungsi forward untuk setiap model terbaru. Oleh karena itu, setiap satu kali iterasi pada inversi untuk setiap lintasan menyelesaikan dua atau tiga problem forward (Siripunvaraporn, 2012).

Dari penjelasan ini, maka kita tahu bahwa Inversi 2-Dimensi harus kita lakukan untuk mendapatkan gambaran kondisi di bawah permukaan.

2. TINJAUAN LAPANGAN

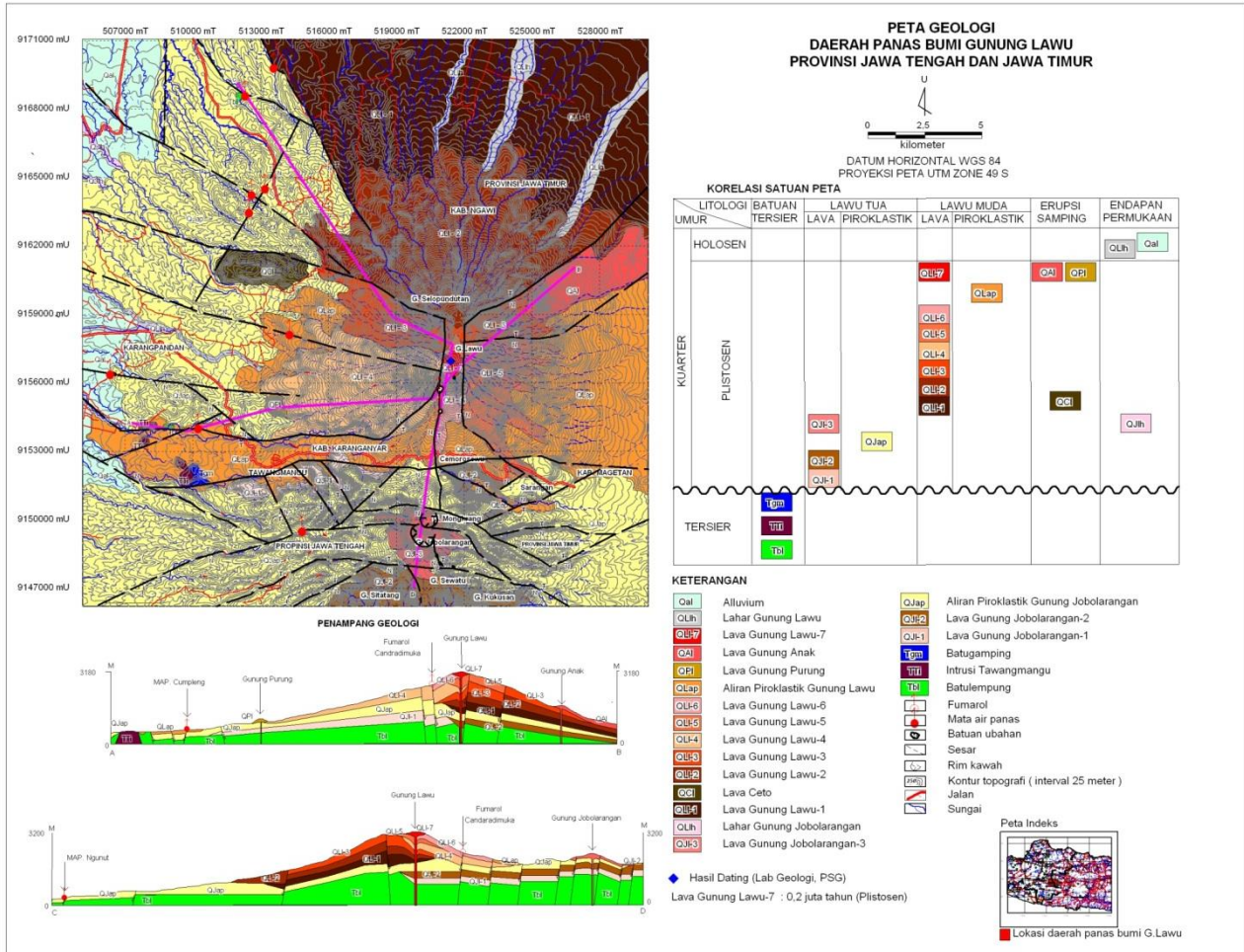


Gambar 1: Lokasi Area Panas bumi Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia

Daerah panas bumi Gunung Lawu (Gambar 1) termasuk dalam wilayah Kabupaten Karang Anyar, Provinsi Jawa Tengah dan Kabupaten Magetan, Provinsi Jawa Timur. Daerah ini berada pada lingkungan geologi vulkanik Kuartar produk Gunung Lawu yang berkomposisi andesit-basaltik. Geomorfologi daerah ini terdiri dari satuan geomorfologi kubah intrusi, satuan geomorfologi vulkanik Gunung

Jobolarangan, satuan geomorfologi vulkanik Gunung Lawu, dan satuan geomorfologi pedataran.

Berdasarkan diagram segi tiga Na-K-Mg (Gambar 4), mata air panas Tasin dan Pablengan terletak pada *partial*



Gambar 2 : Peta Geologi Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia

Struktur geologi yang berkembang berupa struktur rim kawah, sesar-sesar normal arah barat-timur dan arah utara-selatan yang mengontrol kemunculan manifestasi panasbumi di daerah Gunung Lawu, dan sesar mendatar arah Baratdaya-Timurlaut yang memotong dan mengakibatkan pergeseran pada batuan dan struktur yang sudah terbentuk sebelumnya (Gambar 2).

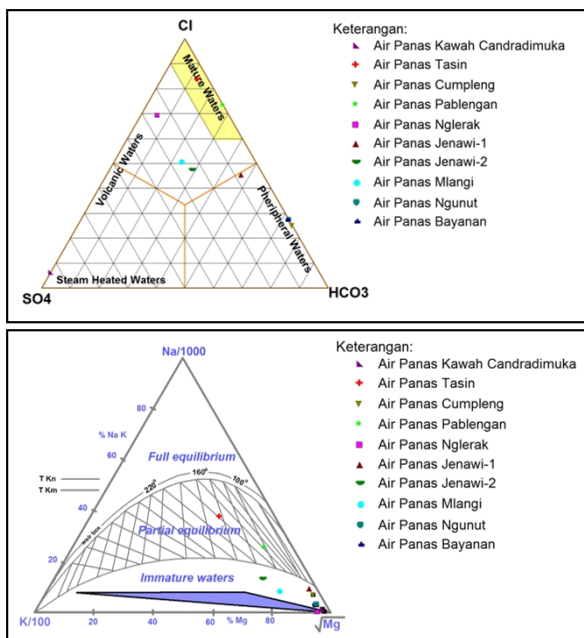
Manifestasi panasbumi yang muncul berupa fumarol, mata air panas, dan batuan ubahan di daerah Candradimuka (lereng selatan Gunung Lawu) dengan temperatur antara 93 – 94 °C, dan pemunculan kelompok mata air panas di daerah barat kaki Gunung Lawu dengan temperatur kurang dari 40°C. Sumber panas (*heat-source*) dalam sistem panasbumi ini diperkirakan berkaitan erat dengan aktivitas vulkanik termuda Gunung Lawu yang masih menyimpan sisa panas dari dapur magma. Fluida panasbumi di daerah Gunung Lawu mempunyai tipe sulfat (kelompok manifestasi Candradimuka), bikarbonat (kelompok manifestasi Cumpleng, Bayanan dan Ngunut), dan klorida (kelompok manifestasi Tasin dan Pablengan). Manifestasi panasbumi Candradimuka diperkirakan merupakan *upflow* dari sistem panasbumi Gunung Lawu, sedangkan kelompok manifestasi yang lain diperkirakan merupakan *outflownya*.

Diagram segitiga Cl-SO4-HCO3 menunjukkan bahwa air panas Kawah Candradimuka bertipe sulfat, sedangkan air panas Ngunut, Cumpleng, Jenawi 1, dan Bayanan bertipe bikarbonat; sedangkan air panas Tasin, Pablengan, Nglarak, Mlangi dan Jenawi 2 mempunyai tipe klorida (Gambar 3).

equilibrium, sebagai indikasi manifestasi yang muncul ke permukaan kemungkinan dipengaruhi interaksi antara fluida dengan batuan dalam keadaan panas sebelum bercampur dengan air permukaan (*meteoric water*), bila ditarik ke NaK berada pada pada garis lurus dan jatuh pada temperatur sedang (hanya sekitar 160-180°C), namun pengaruh sedimen pada air panas Tasin dan Pablengan harus diperhitungkan karena kadar Na dan Cl relatif tinggi. Sedangkan air panas Kawah Candradimuka, Jenawi-1, Jenawi-2, Mlangi, Cumpleng, Ngunut, Nglarak, dan Bayanan terletak pada *immature water*. Indikasi manifestasi yang muncul ke permukaan pada temperatur cenderung semakin rendah (32-40°C) selain di pengaruhi interaksi antara fluida dengan batuan dalam keadaan panas, juga bercampur dengan air permukaan (*meteoric water*). Pada diagram segitiga Cl-Li-B terlihat bahwa posisi mata air panas Nglarak, Pablengan, Jenawi-1, Jenawi-2, Cumpleng, Tasin, Mlangi, Ngunut, dan Bayanan terletak pada posisi pojok atas klorida, yang menunjukkan lingkungan pemunculan mata air panas pada umumnya berada di lingkungan vulkanik. Air panas yang terbentuk ditandai dengan rasa air panas agak asin, daya hantar listrik relatif tinggi (2100-20000 µS/cm), Na relatif tinggi (314-3726 mg/l) dan Cl sangat tinggi (338-6485 mg/l). Sementara air panas kawah Candradimuka berada di pojok Boron yang mengindikasikan air panas berinteraksi dengan batuan sedimen sebelum mencapai permukaan.

Hasil analisis gas dari fumarol Gunung Lawu menunjukkan terdeteksinya kadar gas CO₂, H₂, dan Ar. Gas-gas ini dapat digunakan untuk perhitungan geotermometer gas dengan

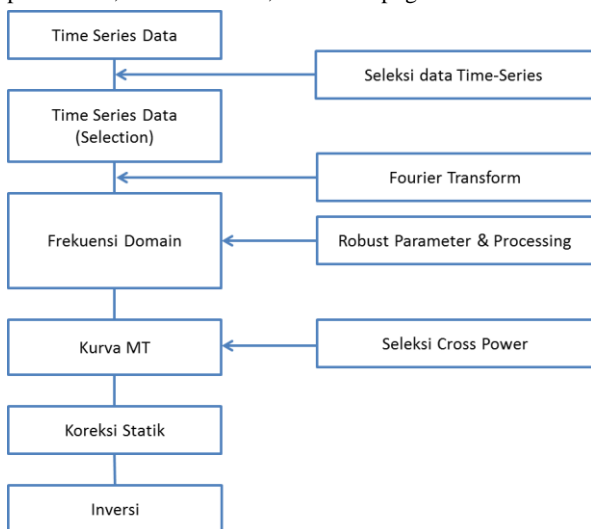
menggunakan grid CO₂/Ar- H₂/Ar (Giggenbach, 1987 dan Arnorrsson, 1985). Hasil interpolasi menunjukkan bahwa temperatur bawah permukaan sebesar 250 °C dengan pH 1,35.



Gambar 3 : Diagram Triliner dari data Geokimia di Daerah Gunung Lawu

3. PRE-PROCESSING dan INVERSI 2-D DATA MAGNETOTELLURIK

Pre-Processing terdiri dari penyeleksian data time series dari lapangan dengan menggunakan program Synchro Time Series Viewer. Lalu menggunakan SSMT2000 dalam memasukkan waktu yang telah diseleksi untuk diubah dari domain waktu menjadi domain frekuensi serta membentuk parameter robust sehingga dapat dilanjutkan pada MT Editor untuk penyeleksian cross power. *Processing* pada data magnetotelurik, diambil dari 320 Hz hingga 0,01 Hz. Setelah penyeleksian dari *cross power* selesai, dilakukan koreksi statik. Koreksi statik adalah koreksi yang dilakukan karena adanya efek statik pada data dikarenakan salah satu dari 3 keadaan, yaitu : adanya heterogenitas pada batuan di dalam permukaan, *vertical contac*, dan efek topografi. Efek statik ini



akan mengakibatkan terjadinya *shifting / splitting* pada kurva MT. Koreksi statik dilakukan dengan menggunakan metode *co-kriging*, yaitu mengoreksi 1 titik MT menggunakan pengoreksi seluruh titik MT yang diukur selain titik MT yang dikoreksi tersebut. Setelah koreksi statik, dibuat pemodelan dengan Inversi data 2-Dimensi menggunakan *software* WinGlink. Sebagaimana diperlihatkan pada *flowchart* Gambar 4.

Setelah proses Inversi 2-Dimensi data MT, didapatkan beberapa penampang yang akan dibuat dari setiap line. Setiap line akan diambil dan dimasukkan ke dalam program Geoslicer-X (Daud and Saputra, 2010) untuk mendapatkan visualisasi yang lebih baik dan memudahkan dalam menginterpretasikan data dengan tampilan 3-dimensi.

4. HASIL dan INTERPRETASI

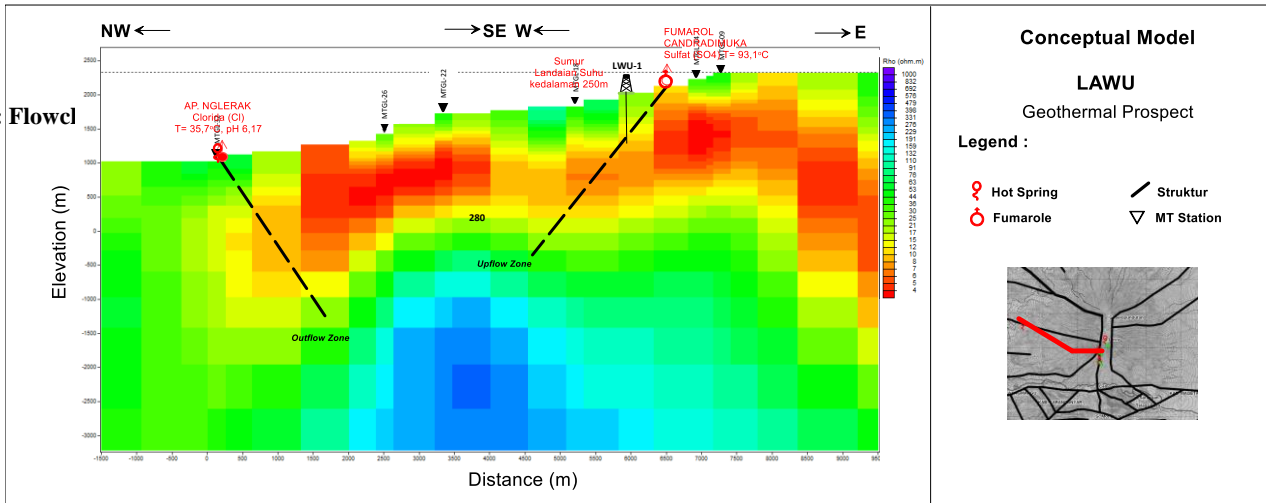
4.1 Penampang resistivitas Daerah Lawu

Penampang resistivitas mengindikasikan adanya sistem panasbumi di bawah permukaan. Hal ini dibuktikan dengan adanya layer yang bernilai <10 Ohm.m. Layer yang mempunyai resistivitas rendah merupakan suatu karakteristik dari sistem panasbumi yang berasosiasi dengan keberadaan clay alterasi. Hal ini terlihat pada penampang resistivitas pada Gambar 5 dan penampang pada Gambar 6. Layer ini berada pada kisaran 1 – 10 Ohm.m dengan ketebalan sekitar 500 – 1500 meter. Selain itu terdapat nilai resistivitas yang nilainya antara 20 – 80 Ohm.m yang berasosiasi dengan keberadaan reservoir panasbumi. Bagian paling bawah mempunyai nilai resistivitas yang sangat besar. Nilainya berada di atas 100 Ohm.m yang kemungkinan berasosiasi dengan keberadaan *Heat Source*. Dari penampang resistivitas ini, menunjukkan bahwa *updome* berada tidak jauh dari pusat gunung Lawu tersebut (sekitar 2 – 3 km dari pusat gunung Lawu)

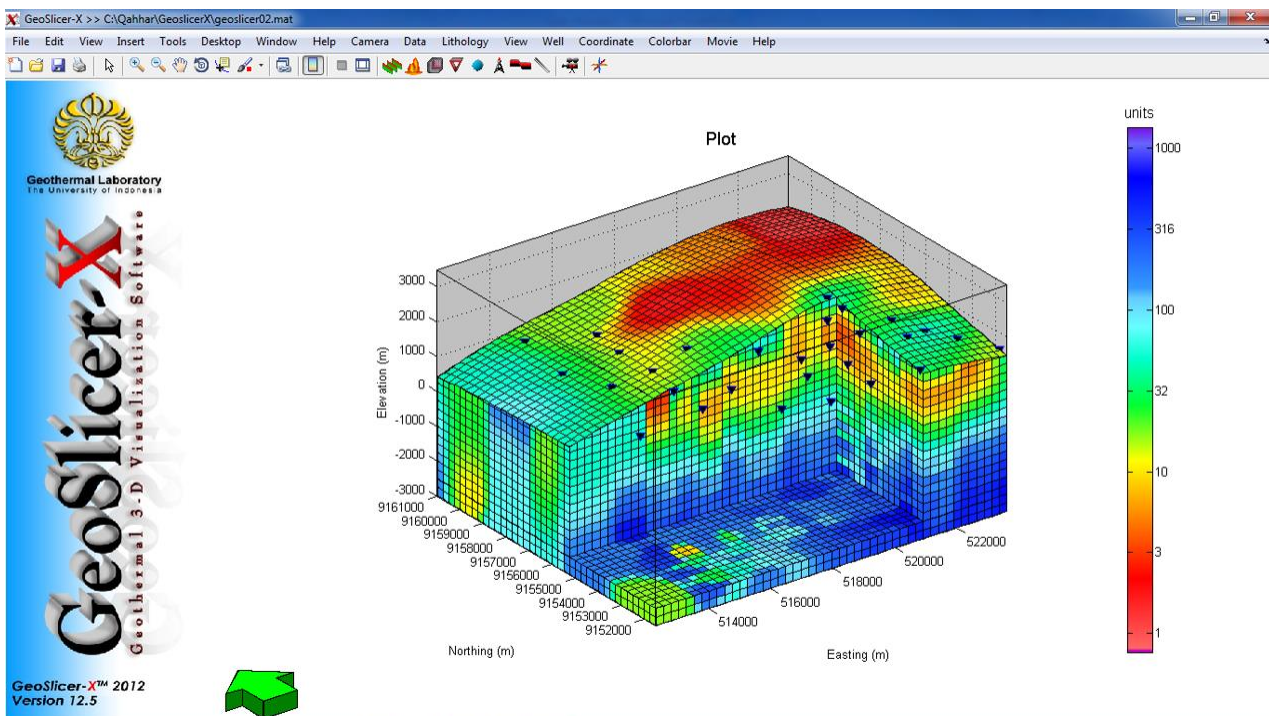
4.2 Interpretasi Terpadu

Interpretasi dari penampang resistivitas akan dibuat menjadi konseptual model dari sistem panasbumi Lawu. Hasil dari inversi data MT 2-D digabungkan dengan data geologi dan geokimia. Data MT memperlihatkan zona *upflow* dan *outflow* dengan bantuan indikasi adanya struktur yang diberikan oleh data geologi. Zona *Upflow* berada dekat dengan *updome* dimana terletak tidak jauh dari pusat gunung Lawu ke arah *West-East* (Gambar 5), sedangkan zona *outflow* sangat jauh dari *updome*. *Upflow* dan *outflow* ini dikontrol oleh struktur yang menerus ke arah *updome*. Terlihat dari Gambar 5 bahwa keberadaan struktur mempengaruhi kontras resistivitas yang ada. Keberadaan *fumarole* didekat puncak dari gunung Lawu merupakan indikasi lokasi *upflow*. Keberadaan gas magmatic yang ditandai juga oleh tingginya pH yang ada di *fumarole* tersebut mengindikasikan bahwa gas tersebut berasal dari sistem vulkanik. Kemenerusan nilai resistivitas yang rendah yang diikuti oleh penurunan topografi memperlihatkan zona *outflow* (Gambar 5). Hal ini juga didukung oleh data Geokimia dari air panas Nglarak yang mengindikasikan zona *outflow*. Gambar 6 merupakan gambaran sistem panasbumi (berdasarkan penampang resistivitas) menggunakan inversi 2-D yang diperlihatkan dalam bentuk 3-D dengan menggunakan program Geoslicer-x (Daud and Saputra, 2010).

Gambar 4 : Flowcl



Gambar 5 : Penampang Resistivitas di daerah Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia



Gambar 6 : Penampang Resistivitas Inversi 2-D dalam bentuk 3-D Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia

5. KONSEPTUAL MODEL

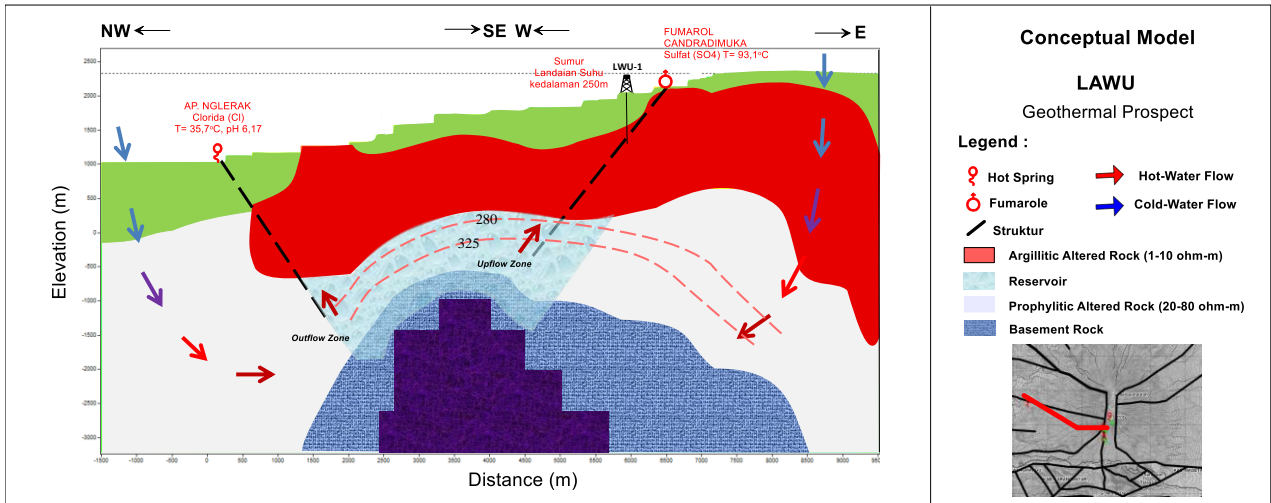
Dari hasil interpretasi data Geologi, Geokimia dan Geofisika, maka dibuatlah sebuah model konseptual pada daerah prospek panasbumi Lawu. Ilustrasi dari model konseptual memperlihatkan BOC (*Base of Conductor*), dan sistem hidrologi yang terdapat di bawah permukaan (Gambar 7). Adapun distribusi BOC pada lapangan Gunung Lawu diperlihatkan pada Gambar 8 yang menjelaskan elevasi dari BOC tersebut.

Model konseptual memperlihatkan distribusi dari batuan yang telah teralterasi (*clay cap*), batuan reservoir, struktur patahan dan kemungkinan keberadaan dari hot rock. Keberadaan *upflow* dicirikan dengan adanya *updome* yang mempunyai *clay cap* berbentuk seperti lengkungan. Keberadaan dari *fumarole* yang disebabkan oleh gas magmatic pada gunung Lawu diperlihatkan dalam model konseptual ini yang mengindikasikan zona *upflow* berasal

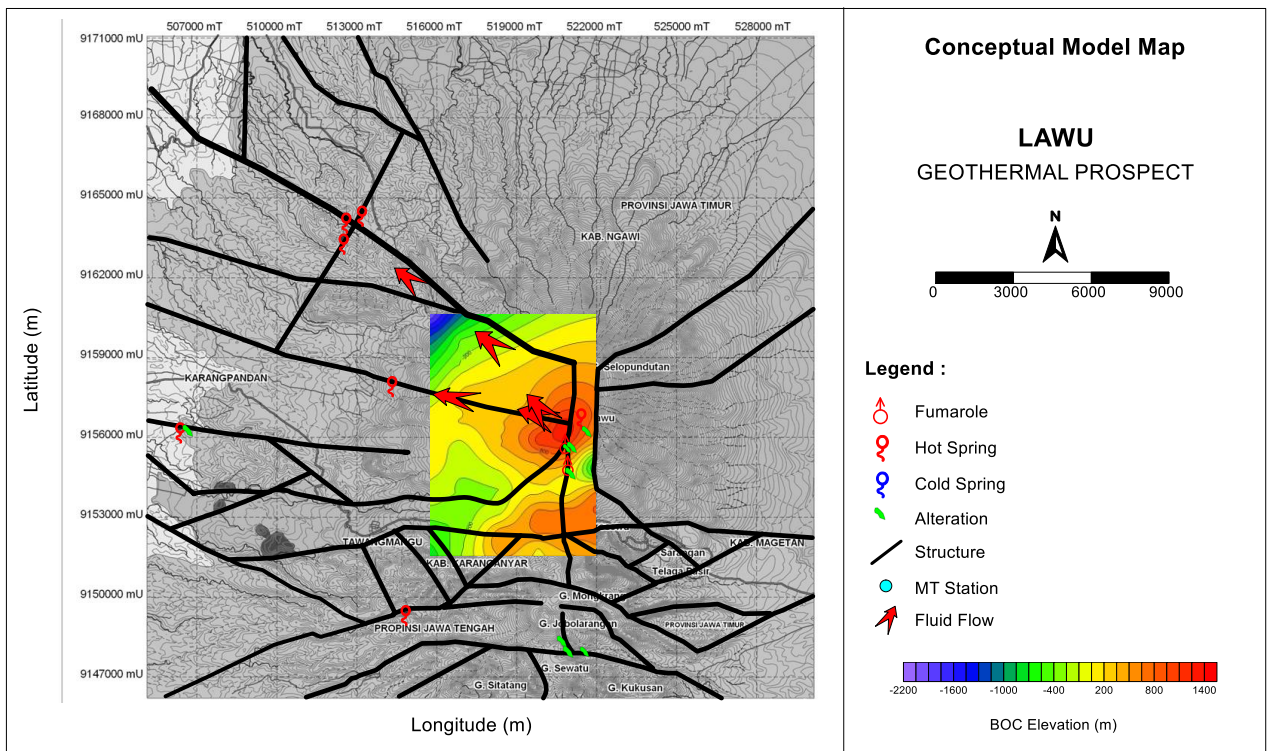
dari sistem bawah permukaan dari panasbumi vulkanik. *Base of Conductor* (BOC) pada gunung Lawu berada pada elevasi hingga -500 meter. Sumur landaian suhu memperlihatkan keberadaan titik sumur yang mencapai kedalaman 250 m. Data Geokimia dan sumur landaian suhu memperlihatkan temperatur reservoir di bawah permukaan diperkirakan mencapai 250°C. Model konseptual yang dimaksud diperlihatkan pada Gambar 7.

6. KESIMPULAN

Inversi 2-D dapat menggambarkan daerah prospek sistem panasbumi daerah Lawu. Keberadaan struktur sebagai pengontrol dari manifestasi bisa terlihat dengan perubahan kontras resistivitas batuan bawah-permukaan. Keberadaan struktur mengontrol manifestasi *fumarole* yang membawa gas



Gambar 7 : Model Konseptual daerah Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia



Gambar 8 : Peta Sebaran Base Of Conductor (BOC), Gunung Lawu, Jawa Tengah-Jawa Timur, Indonesia

magmatic mengarah langsung pada updome berada di kisaran 2-3 km dari updome. Hasil dari inversi 2-D memberikan informasi keberadaan *upflow* dan *outflow* pada gunung Lawu. Inversi 2-D juga memperlihatkan kedalaman BOC berada antara elevasi -0 hingga -500 meter dengan suhu 250°C dari data pendukung Geokimia

7. REFERENSI

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

Daud, Yunus. (2015). 3-Dimensional Inversion of MT Data over the Arjuno-Welirang Volcanic Panasbumi System, East Java (Indonesia). Proceedings World Panasbumi Congress 2015.

Daud, Yunus. (2010). Diktat kuliah. Metode Magnetotelluric (MT). Laboratorium Geofisika, FMIPA Universitas Indonesia

Rodi, W. & Mackie, R. L. (2001). Nonlinear Conjugate Gradien Algorithm for 2-D Magnetotelluric Inversion. Massachusetts : Massachusetts Institute of Technology. Geophysics 66 : 174 – 187

Simpson, F & Bahr, K. (2005). Practical Magnetotelluric. United Kingdom : Cambridge University Press.

Siripunvaraporn, Weerachai. (2012). Three-Dimensional Magnetotelluric Inversion: An Introductory Guide for Developers and Users. Surv Geophys (2012) 33:5-27.