

PENCITRAAN TAHANAN JENIS BAWAH PERMUKAAN DI AREA PROSPEK PANAS BUMI GUNUNG SLAMET BERDASARKAN DATA MAGNETOTELURIK

Sub Surface Structure Imaging Beneath Mount Slamet Geothermal Prospect Area Based on Magnetotelluric Data

Dadan D. Wardhana^{1,2}, Johanes Hutabarat², Andi Agus Nur², Karit Lumban Gaol¹

¹Pusat Penelitian Geoteknologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

²Fakultas Teknik Geologi, Universitas Padjadjaran

ABSTRAK Penelitian geofisika dengan menggunakan metode magnetotellurik (MT) telah dilakukan untuk mengidentifikasi struktur bawah permukaan kawasan panas bumi Guci, Gunung Slamet. Tujuan penelitian untuk menganalisis struktur bawah permukaan berdasarkan distribusi nilai tahanan jenis ini dilakukan di kawasan yang terletak di Kecamatan Bojong, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah. Tahap pengolahan data dimulai dengan mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi, kemudian pembuatan grafik tahanan jenis semu terhadap frekuensi dan grafik fase terhadap frekuensi, *smoothing* grafik dan terakhir pemodelan inversi dengan hasil akhir berupa penampang tahanan jenis 2D. Hasil pengolahan data magnetotellurik (MT), menunjukkan ada tiga kelompok nilai tahanan jenis batuan. Nilai tahanan jenis tinggi ($>1000 \Omega.m$) berkaitan dengan batuan dasar sebagai sumber panas. Nilai tahanan jenis rendah ($<10 \Omega.m$) ditafsirkan sebagai batuan ubahan yang menjadi batuan penutup. Nilai tahanan jenis antara $10-225 \Omega.m$ berasosiasi dengan lapisan batuan yang bersifat

poros dan permeabel yang menyimpan fluida panas, dapat berperan sebagai reservoir panas bumi. Lapisan lain dengan nilai tahanan jenis antara $225-1000 \Omega.m$ kemungkinan sebagai batuan sedimen Tersier. Dari kajian penampang tahanan jenis MT, lokasi yang kemungkinan mempunyai prospek panas bumi, yaitu di daerah depresi Guci, dengan ketebalan reservoir $600-1000 m$ pada kedalaman $750-1600 m$ yang ditutupi oleh lapisan penutup berupa batuan ubahan.

Kata kunci: struktur bawah permukaan, magnetotellurik, tahanan jenis, panas bumi, Gunung Slamet.

ABSTRACT Magnetotelluric (MT) method has been applied to identify subsurface structures in Guci Geothermal Area, Mount Slamet. The objective of this research is to analyze the subsurface configuration based on the resistivity value beneath the Bojong district, Tegal regency, Central Java province. Stages of data processing started with transforming the data from the time domain to the frequency domain, and then graphing resistivity apparent to frequency and graph phase versus frequency, smoothing the graph and the last, inversion modeling with final result of 2D resistivity cross section. The results of data processing magnetotelluric (MT) revealed three groups of rock resistivity value. The high resistivity value ($> 1000 \Omega.m$) represented the basement as a heat source. Low resistivity value ($<10 \Omega.m$) is interpreted as altered rocks that became cap rock. The resistivity value between $10-225 \Omega.m$ associated with the porous and permeable rocks that store thermal fluids as the geothermal reservoir. The other layer with resistivity value $225-1000 \Omega.m$

Naskah masuk : 11 Februari 2016
Naskah direvisi : 04 Maret 2017
Naskah diterima : 06 Maret 2017

Dadan D. Wardhana
Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI
Kompleks LIPI Gd. 70, Jl Sangkuriang Bandung 40135
Email : dhanswardhana@yahoo.com

might be as Tertiary sediment. Base on MT resistivity cross section, the location that may have geothermal prospects, namely in the area of Guci depression, with a reservoir thickness of 600-1000m and at 750-1600m depth that covered by altered rocks as cap rocks.

Keywords: subsurface structure, magnetotelluric, resistivity, geothermal, Mount Slamet.

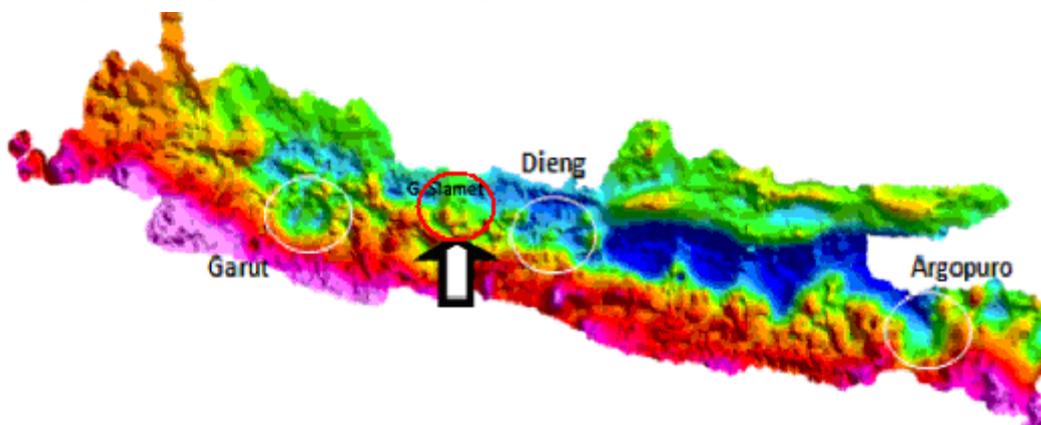
PENDAHULUAN

Indonesia dikenal sebagai negara yang memiliki potensi energi panas bumi terbesar di dunia, yaitu sekitar 40% potensi panas bumi dunia tetapi pemanfaatannya di Indonesia baru mencapai 4% (Kasbani, 2014). Pemanfaatan energi ini perlu mendapat perhatian agar Indonesia tidak mengalami krisis energi listrik. Untuk itu kegiatan eksplorasi dan eksploitasi sumber energi panas bumi ini perlu ditingkatkan, terutama untuk memenuhi kebutuhan energi nasional yang saat ini masih mengandalkan bahan bakar minyak (BBM) yang kemungkinan ke depan semakin menipis cadangannya.

Secara singkat sistem panas bumi antara lain dikontrol oleh keberadaan sumber panas (*heat source*), batuan sarang (*reservoir*) dan batuan penutup (*cap rocks*), serta hadirnya air meteorik (*meteoric water*) dan permeabilitas batuan primer maupun sekunder (rekahan, patahan). Kajian karakteristik sistem panas bumi suatu daerah sangat berperan dalam perencanaan pembangunan lapangan panas bumi. Dengan memahami karakteristik dari komponen-komponen penyusun panas bumi maka dapat

ditentukan area prospek dan sistem pemanfaatannya.

Dalam rangka inventarisasi daerah prospek panas bumi maka dilakukan penelitian di lereng barat laut Gunung Slamet, yaitu kawasan air panas Guci yang masuk dalam wilayah Kecamatan Bojong, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah. Kegiatan penelitian sistem panas bumi ini meliputi kajian geologi permukaan dan bawah permukaan. Pemilihan lokasi didasari oleh adanya anomali rendah gayaberat (Gambar 1) dan struktur regional pada daerah sekitar Gunung Slamet, Jawa Tengah (Ismayanto *et al.*, 2007). Pada peta anomali gayaberat (Gambar 1), Komplek Gunung Slamet memperlihatkan anomali gayaberat rendah berbentuk seperti bekas kaldera (lingkaran merah). Bila dibandingkan dengan daerah Garut, Dieng dan Argopuro (lingkaran putih) yang telah terbukti potensi panas buminya, Gunung Slamet cenderung memiliki pola yang hampir sama. Kehadiran beberapa manifestasi panas bumi di permukaan seperti alterasi hidrotermal ditemukan di puncak Gunung Mingkrik, Guci, Igir Cowet, Igir Manis, dan Igir Kuning. Kemunculan mata airpanas dan kolam lumpur panas di Desa Guci dan Sigedong. Berdasarkan foto udara, terdapat bentuk-bentuk bekas kawah (*circular feature*) yang mengindikasikan adanya sumber panas (*heat sources*) (Situmorang, 2008). Gambaran lapisan batuan bawah permukaan seperti batuan reservoir, struktur geologi, dan batuan penutup menggunakan metoda geofisika magnetotellurik. Metode magnetotellurik sering digunakan dalam eksplorasi panas bumi



Gambar 1. Peta anomali regional gayaberat P. Jawa (Ismayanto, 2007).

mengingat metoda ini memiliki kelebihan antara lain penetrasinya lebih dalam (>5 km) dan lebih sensitif terhadap lapisan konduktif yang berada di bawah formasi resistif di lingkungan vulkanik dibandingkan dengan seismik (Ushijima *et al.*, 2005). Seperti telah dibahas oleh Anderson *et al.* (2000) dan Sumintadireja *et al.* (2010) bahwa daerah prospek ditunjukkan oleh tahanan jenis rendah yang biasanya menggambarkan temperatur tinggi dari reservoir panas bumi. Tahanan jenis rendah ini berhubungan dengan batuan yang bersifat konduktif akibat adanya alterasi hidrotermal (*Clay Cap*) dan umumnya sebagai indikator daerah prospek panas bumi.

Keberadaan depresi Guci yang mempunyai kaitan erat dengan sistem panas bumi Gunung Slamet sudah diidentifikasi secara regional. Sejumlah penelitian telah dilakukan yang meliputi penelitian geologi, geokimia, maupun geofisika. Surmayadi (2014) dan Nurrohman *et al.* (2015) telah melakukan penelitian geokimia di daerah Guci dan Baturaden. Kedua daerah ini termasuk dalam satu sistem hidrotermal, yang memiliki sumber yang sama yaitu berkaitan dengan aktivitas gunungapi Slamet muda dan berbeda dengan di daerah Kalipedes yang berkaitan dengan sistem hidrotermal tua. Situmorang (2008) telah melakukan pemetaan geologi Gunung Slamet, dan menyebutkan bahwa zona depresi Guci sebagai graben yang

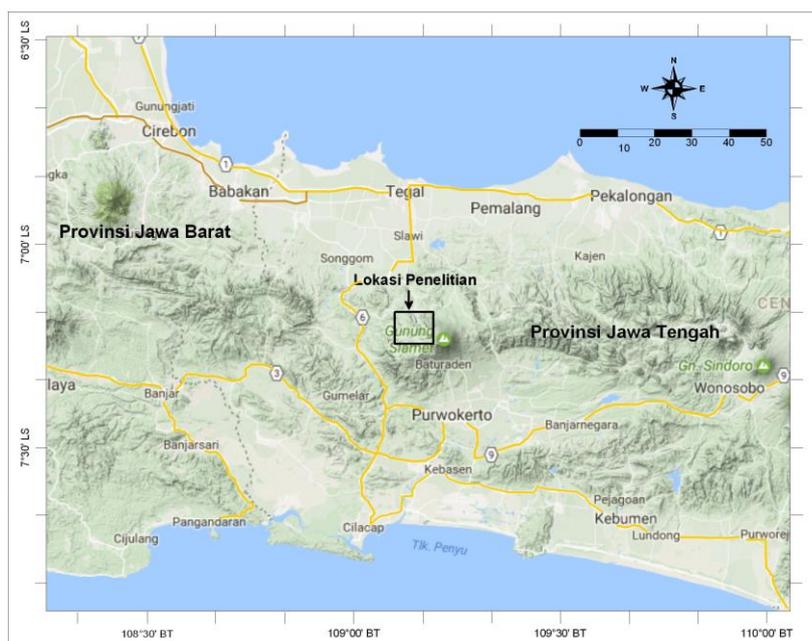
terbentuk akibat aktivitas Gunungapi Slamet. Di daerah tersebut banyak muncul manifestasi seperti mata air panas, batuan ubahan dan bentukan kaldera. Dari peta anomali gaya berat tampak kelurusan – kelurusan yang berarah timurlaut – baratdaya yang ditafsirkan sebagai patahan dan merupakan kontrol dari keluarnya sumber mata air panas Buaran – Tonjong dan Paguyangan (Reswara dan Sehad, 2014).

LOKASI PENELITIAN

Penelitian MT difokuskan di sekitar area manifestasi panas bumi Gunung Slamet tepatnya di daerah Guci, yang secara administratif berada di wilayah Kecamatan Bojong, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah. Daerah penelitian, secara geografi terletak pada koordinat 07° 08' 00"LS - 07° 19' 30" LS dan 109° 05' 00" BT - 109° 14' 00" BT (Gambar 2), berada pada ketinggian antara 1.000 - 3.436 m (G. Slamet) di atas permukaan laut. Daerah Guci terkenal sebagai daerah wisata air panas, berjarak ± 30 km ke arah timur dari simpang tiga Yomani yaitu simpang tiga jalur Tegal-Purwokerto menuju Guci.

Geologi Daerah Penelitian

Daerah penelitian termasuk dalam peta geologi lembar Purwokerto dan Tegal terbitan Pusat Survei Geologi (Djuri *et al.*, 1996), merupakan salah satu daerah yang berasosiasi dengan



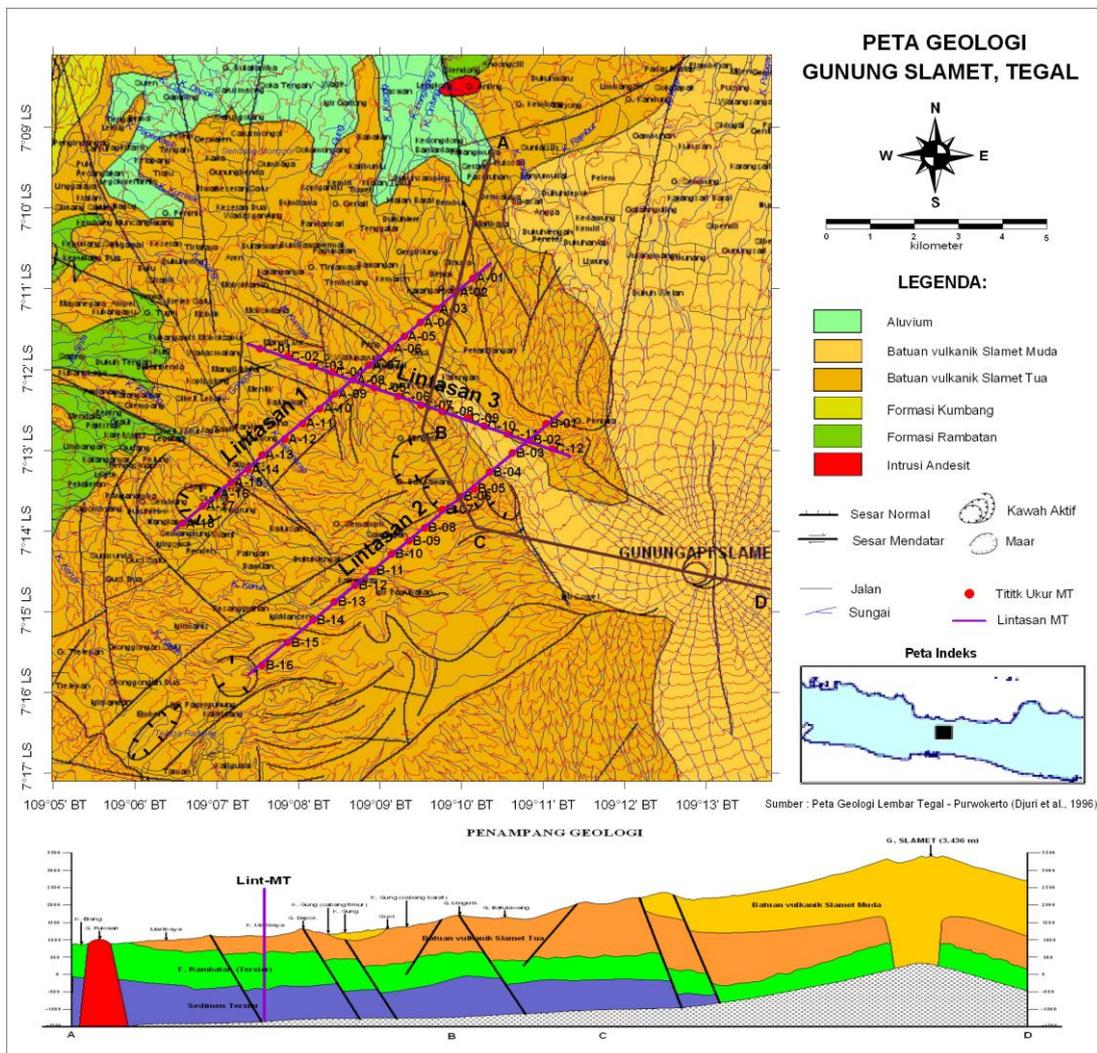
Gambar 2. Lokasi penelitian (peta dasar dari google map).

kegiatan yang terjadi di Gunung Slamet. Secara umum, struktur yang berkembang di daerah ini berkaitan erat dengan kegiatan tektonik regional. Struktur geologi tersebut mempunyai pola yang hampir sama dengan struktur sesar regional, yaitu berarah Baratlaut – Tenggara. Litologi di daerah penelitian hampir 80 % ditempati hasil endapan primer seperti aliran lava, jatuhnya piroklastik dan aliran piroklastik, 15 % ditempati endapan sekunder berupa guguran vulkanik, aliran lahar dan aluvial berumur Kuartar (Plistosen dan Holosen), serta 5 % oleh batuan sedimen Tersier dan intrusi andesit porfiri (Djuri et al., 1996).

Lava hasil erupsi Gunung Slamet tua cukup luas penyebarannya. Batuan terobosan bersusun andesit porfir terdapat di dua lokasi yaitu Gunung

Cendan dan Gunung Janer (Djuri et al., 1996). Singkapan batuan ini terlihat membentuk suatu bentuk topografi tersendiri yang agak tinggi terpisah dan memanjang. Batuan ini menrobos lapisan sedimen Tersier Formasi Rambatan, berumur Kuartar.

Struktur geologi di kawasan Gunung Slamet, umumnya berupa sesar normal yang banyak dijumpai pada kelompok Slamet Tua. Struktur geologi di kawasan Gunung Slamet memiliki arah utama baratdaya - timurlaut dan baratlaut - tenggara, sedikit berarah utara - selatan dan barat - timur (Permana et al., 2014). Jejak-jejak sesar di lapangan dijumpai berupa breksiasi, gores garis sesar, zona hancuran, kelurusan bukit dan



Gambar 3. Peta Geologi Gunung Slamet hasil penyederhanaan dari Peta Geologi Lembar Purwokerto dan Tegal (Djuri et al., 1996).

lembah, gawir yang lurus dan terjal serta kontak tajam antara satuan batuan.

Menurut Situmorang (2008), struktur geologi yang ada di kawasan Gunung Slamet adalah sesar normal, sesar geser normal dan struktur depresi.

Formasi batuan yang terdapat di daerah Gunung Slamet dan sekitarnya berdasarkan pembagian stratigrafi oleh Djuri *et al.* (1996) adalah Formasi Pemali, Formasi Halang, Formasi Kumbang, Formasi Tapak, Formasi Kalibiuk, Formasi Glagah, Formasi Linggopodo, dan Endapan Vulkanik G. Slamet dan Aluvial. Urutan stratigrafi menurut Djuri *et al.* (1996) yang dikorelasikan dengan hasil penyelidikan terdahulu adalah sebagai berikut: satuan batuan vulkanik tua, vulkanik muda, endapan lahar permukaan berumur Kuartar serta batuan sedimen Tersier. Formasi Rambatan merupakan formasi tertua berumur Tersier yang ditutupi oleh endapan tipis batuan vulkanik erupsi Gunung Slamet tua maupun Slamet muda (Gambar 3). Formasi Rambatan terdiri dari serpih, napal dan batu pasir gampingan.

METODE

Metode Magnetotellurik (MT)

Metoda Magnetotellurik (MT) adalah metoda pendugaan (*sounding*) elektromagnetik (EM) untuk mengetahui struktur tahanan jenis bawah permukaan dengan cara melakukan pengukuran pasif komponen medan listrik (E) dan medan magnet (H) alam yang berubah terhadap waktu. Medan EM mempunyai kawasan frekuensi dengan rentang band frekuensi panjang yang mampu untuk investigasi dari kedalaman beberapa puluh meter hingga ribuan meter di bawah muka bumi. Makin rendah frekuensi yang dipilih makin dalam jangkauan penetrasi. Medan EM tersebut ditimbulkan oleh berbagai proses fisik yang cukup kompleks dengan spektrum frekuensi yang sangat lebar 10^{-5} Hz- 10^4 Hz (Simpson dan Bahr, 2005)

Informasi mengenai tahanan jenis yang terkandung dalam data MT dapat diperoleh dari penyelesaian persamaan Maxwell menggunakan model-model yang relatif sederhana. Sifat-sifat perambatan gelombang EM didasarkan pada persamaan Maxwell sebagai berikut:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4)$$

dengan \vec{E} (V/m) adalah medan listrik \vec{H} (A/m) adalah medan magnetik, \vec{B} (Weber/m² atau T) adalah induksi magnetik, \vec{D} (C/m²) adalah perpindahan muatan listrik dan q (C/m³) adalah rapat muatan listrik. \vec{J} adalah rapat arus dan $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ (A/m²) adalah perpindahan arus terhadap waktu.

Amplitudo gelombang EM mengalami atenuasi secara eksponensial terhadap kedalaman ketika melewati lapisan konduktif. Untuk dapat memperkirakan kedalaman penetrasi atau kedalaman investigasi gelombang EM dapat digunakan besaran *skin depth*. *Skin depth* didefinisikan sebagai kedalaman pada suatu medium homogen dimana amplitude gelombang EM telah tereduksi menjadi 1/e dari amplitudonya di permukaan bumi (Grandis, 2013). Nilai *skin depth* dipengaruhi oleh tahanan jenis batuan dan frekuensi yang digunakan dan dirumuskan sebagai berikut:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (5)$$

Dengan ρ adalah tahanan jenis medium homogen, μ_0 adalah permeabilitas magnetik pada ruang hampa udara ($4\pi \times 10^{-7}$) dan ω adalah frekuensi sudut.

Akuisisi Data

Data yang digunakan pada penelitian merupakan data primer yang diperoleh di lapangan. Data magnetotellurik yang terukur merupakan data dalam domain waktu (*time series*). Lokasi survei magnetotellurik berada di Kawasan Guci, Kecamatan Bojong, Kabupaten Tegal, Provinsi Jawa Tengah. Pengukuran data MT menggunakan alat MTU-5A produk dari Phoenix Geophysics, Kanada. Pengukuran dilakukan pada sore hingga pagi hari selama ± 12 jam, dengan harapan pada waktu tersebut gangguan selama

pengukuran yang dapat mengurangi kualitas data akan lebih kecil. Jumlah titik ukur MT pada lintasan berarah timurlaut-baratdaya adalah 18 titik. Titik awal (A-01) mulai dari Pekandangan di timurlaut melewati depresi Guci, Kalipedes sampai di depresi Batusari (A-18) di sebelah baratdaya.

Pengolahan Data

Pengolahan data magnetotellurik pada penelitian ini menggunakan tiga perangkat lunak yaitu SSMT 2000, MT EDITOR dan WinGLink. Proses dimulai dengan mengubah data mentah yang berasal dari MT unit yang memiliki format domain waktu ke domain frekuensi menggunakan perangkat lunak SSMT 2000. Setelah itu data dengan domain frekuensi diplot menjadi kurva tahanan jenis semu dan fase terhadap frekuensi yang dilakukan pada perangkat lunak MT EDITOR. Pada tahap ini grafik juga akan diperhalus untuk menghasilkan sebuah kurva tahanan jenis semu dengan cara menghilangkan setiap cuplikan data *cross powers* yang mengandung *noise*. Selanjutnya pembuatan model 2D secara inversi menggunakan perangkat lunak WinGLink yang menghasilkan penampang Model tahanan jenis 2-dimensi.

Secara umum, permasalahan inversi dapat dituliskan dalam bentuk persamaan hubungan antara data dan parameter model yang dinyatakan oleh:

$$d = F(m) + e \quad (6)$$

dengan **d** adalah vektor data, **m** adalah vector model, **e** adalah vektor error dan **F** adalah fungsi *forward modelling*. Pemecahan masalah menggunakan algoritma *nonlinear conjugate gradient* (NLCG) dilakukan dengan mencari solusi model yang meminimumkan fungsi objektif Ψ , yang didefinisikan sebagai berikut (Rodi dan Mackie, 2001):

$$\psi(m) = (d - F(m))^T V^{-1} (d - F(m)) + \varepsilon^2 m^T W_m m \quad (7)$$

dimana ε adalah bilangan positif sebagai bobot relatif antara kedua faktor yang diminimumkan, dan **W** adalah faktor *smoothness* yang merupakan fungsi kontinyu model yang dapat dinyatakan oleh turunan pertama atau turunan keduanya. Penerapan metode NLCG untuk meminimumkan persamaan (7) adalah

$$m_{n+1} = m_n - [J_n^T J_n + H_n^T (F(m) - d) + \varepsilon W_m]^{-1} J_n^T (F(m) - d) \quad (8)$$

Pada model 2D magnetotellurik, tahanan jenis bervariasi baik dalam arah horisontal maupun arah vertikal atau kedalaman. Medium bawah permukaan dibagi menjadi blok-blok atau grid dengan ukuran bervariasi dan tahanan jenis masing-masing blok menggambarkan variasi tahanan jenis secara 2 dimensi. Dekomposisi persamaan yang dihasilkan dengan memperlihatkan geometri model 2D menghasilkan persamaan medan EM yang diidentifikasi sebagai polarisasi *transverse electric* (TE) dan *transverse magnetic* (TM). Pada polarisasi TE medan listrik E_x dan medan magnet H_y masing-masing sejajar dan tegak lurus dengan arah struktur. Persamaan yang berlaku adalah (Grandis, 2013):

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} = i\omega\mu_0\sigma E_x \quad (9)$$

$$H_y = -\frac{1}{i\omega\mu_0} \frac{\partial E_x}{\partial z} \quad (10)$$

Pada polarisasi (TM) medan magnet H_x dan medan listrik E_y masing-masing sejajar dan tegak lurus dengan arah struktur. Persamaan yang berlaku adalah (Grandis, 2013):

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) = i\omega\mu_0\sigma H_x \quad (11)$$

$$E_y = \rho \frac{\partial H_x}{\partial z} \quad (12)$$

Persamaan medan EM untuk masing-masing polarisasi khususnya untuk persamaan (9) untuk medan listrik E_x dan persamaan (11) untuk medan magnet H_x didekati dengan persamaan beda-hingga (*finite difference*) yang dapat dinyatakan sebagai sistem persamaan linier (Rodi dan Mackie, 2001). Pada polarisasi TE, terlebih dahulu dilakukan perhitungan medan listrik E_x pada grid dan hasilnya digunakan untuk memperkirakan H_y melalui pendekatan diferensiasi secara numerik dari persamaan (10). Hal yang sama juga dilakukan untuk polarisasi TM menggunakan persamaan (11) dan (12) dengan pendekatan beda-hingga.

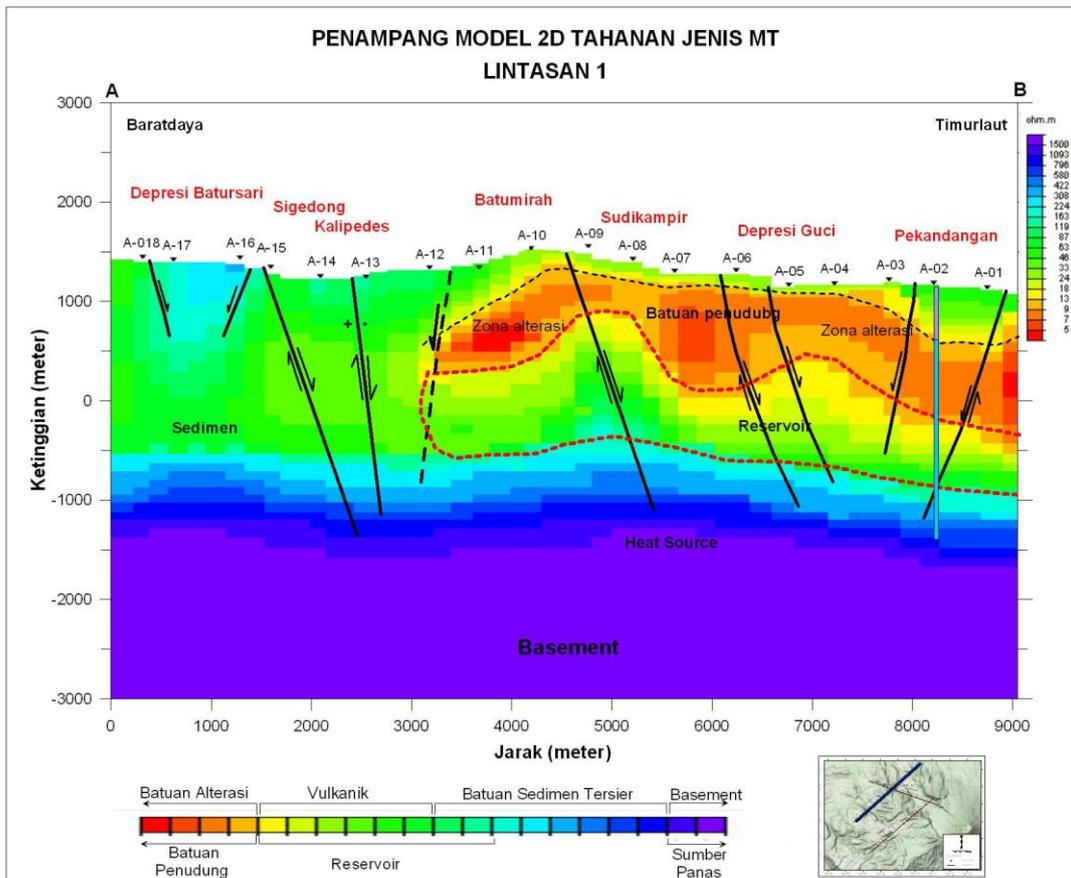
HASIL DAN PEMBAHASAN

Nilai tahanan-jenis batuan di daerah panas bumi dikontrol erat oleh dua faktor utama yaitu jenis batuan dan kondisi suhu batuan. Makin keras dan kompak batuan maka makin tinggi nilai tahanan-jenis batuan atau makin resistif batuan. Pada kondisi batuan kering dan panas nilai tahanan jenis batuan juga tinggi (Sumintadireja *et al.*, 2010).

Untuk melihat konfigurasi tahanan jenis bawah permukaan dibuat lintasan MT berarah timurlaut-baratdaya terdiri dari 18 titik MT membentang sepanjang kurang lebih 9 kilometer (Gambar 4). Lintasan dimulai sekitar satu kilometer dari depresi Guci (titik A-01) yaitu dari daerah Pakandangan melalui Guci, Dukuhtengah, Kalipedes/ Sigedong dan berakhir di baratdaya di daerah depresi Batusari/ Anggrang. Depresi Guci berada kurang lebih antara titik A-03 hingga A-06 dengan pusat berada antara titik A-04 dan A-05. Penampang tahanan jenis batuan hasil pemodelan MT 2-dimensi memperlihatkan

bahwa secara umum nilai tahanan jenis di daerah panas bumi Gunung Slamet bervariasi antara 5 $\Omega.m$ (warna merah) hingga 1500 $\Omega.m$ (warna ungu). Batuan dasar dicirikan dengan nilai tahanan jenis lebih besar dari 1000 $\Omega.m$ (warna biru-ungu) dengan kedalaman mulai dari 2500 meter di bawah permukaan. Lapisan di atasnya didominasi dengan batuan bernilai antara 10 hingga 1000 $\Omega.m$ (warna kuning ke biru). Pada beberapa tempat di bawah titik ukur MT terlihat keberadaan nilai tahanan jenis lebih rendah dari 10 $\Omega.m$ (warna merah-jingga).

Pada penampang tahanan jenis MT hasil pemodelan 2-dimensi (Gambar 4), dilengkapi dengan struktur geologi berdasarkan hasil penafsiran foto udara Situmorang (2008). Morfologi batuan dasar dengan nilai tahanan jenis lebih besar dari 1000 $\Omega.m$ (warna biru) tampak miring ke arah timurlaut mengikuti topografi permukaan dengan kedalaman antara 2000 hingga 2500 meter di bawah permukaan tanah. Di bawah depresi Batusari dan Sudikampir, batuan dasar membentuk tonjolan.



Gambar 4. Penampang tahanan jenis 2-dimensi.

Tonjolan batuan dasar tersebut mengindikasikan telah terjadinya terobosan hidrotermal menuju permukaan.

Kelompok nilai tahanan-jenis lebih kecil dari 10 Ω .m terlihat muncul dengan variasi intensitas (warna merah-jingga) seperti membentuk lapisan konduktif di bagian tengah hingga timurlaut lintasan (garis hitam putus-putus). Lapisan konduktif ini bisa jadi merupakan batuan ubahan (*altered rocks*) karena adanya proses hidrotermal yang masuk ke dalam batuan tersebut atau hanya karena adanya zona rekahan (*fractures*) dalam batuan yang dikontrol oleh struktur karena adanya kegiatan gunungapi. Lapisan konduktif ini tampak jelas berada di bawah titik MT mulai dari titik A-01 sampai A-12, dengan kedalaman bervariasi. Dari arah timurlaut (Pekandangan), lapisan konduktif ini berada pada kedalaman 500 meter dan mendangkal ke arah Guci. Dalam depresi Guci lapisan konduktif berada dekat permukaan dan menerus sampai Batumirah. Dari data lapangan pada zona depresi Guci ditemukan batuan ubahan dan mata air panas. Lapisan konduktif ini berakhir ketika memasuki Kalipedes di Desa Sigedong dan tidak muncul di bagian baratdaya. Adanya sesar geser mengangan di sekitar titik A-12 dan A-13 nampaknya merupakan pembatasnya. Di daerah ini terdapat mata air panas Sigedong/ Kalipedes yang kemunculannya dikontrol oleh sesar tersebut.

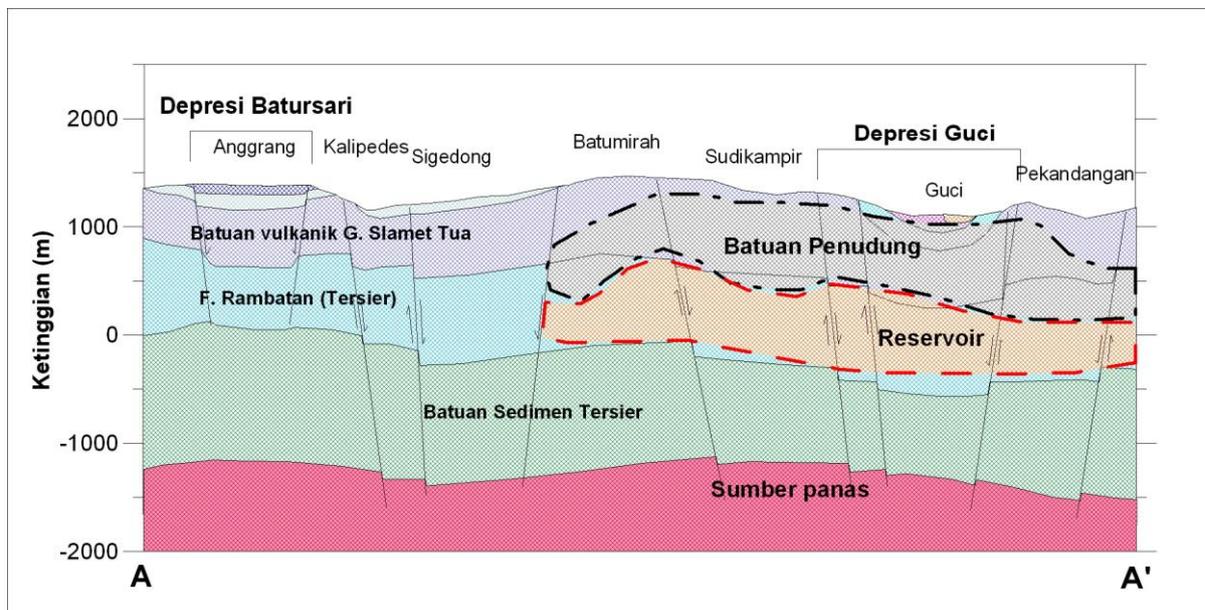
Kelompok nilai tahanan jenis antara 10 sampai 225 Ω .m (warna kuning-hijau) yang hadir dibawah zona konduktif (tahanan jenis <10 Ω .m) diidentifikasi sebagai lapisan batuan yang kemungkinan berperan sebagai reservoir panas bumi. Batuan yang bersifat poros dan permeabel yang menyimpan panas cenderung memiliki tahanan jenis yang cukup tinggi (resistif). Pada Lintasan, lapisan ini berada pada kedalaman 1600 meter di ujung timurlaut lalu ke arah baratdaya mendangkal menjadi 700 meter di bawah titik A-08 dan sekitar 1000 meter di bawah titik A-12. Diduga sebaigian batuan vulkanik Gunung Slamet yang bersifat poros dan permeabel dan batuan sedimen Tersier yaitu batupasir gampingan dari Formasi Rambatan berperan sebagai batuan reservoir panas bumi Gunung Slamet.

Pada lintasan ini ada beberapa hal yang menjadi catatan. Pertama, di daerah Sudikampir dan

Batumirah (A-07 sampai A-12) di permukaan tidak ditemukan batuan ubahan dan kemunculan mata air panas tetapi di bawah permukaan menunjukkan adanya nilai tahanan jenis rendah (lapisan konduktif). Kemungkinan disebabkan adanya lava tebal sebagai lapisan impermeabel yang menutupinya sehingga tidak muncul mata air panas di permukaan. Kedua, di bawah depresi Baturisari/ Anggrang (A-16 hingga A18) tidak terlihat adanya nilai tahanan jenis rendah (lapisan konduktif) padahal di utaranya muncul mata air panas Kalipedes maupun batuan ubahan. Hal ini kemungkinan karena adanya perbedaan litologi batuan antara bagian baratdaya dan timurlaut yang mempengaruhi intensitas alterasinya dan keduanya dibatasi sesar geser Sigedong sebagai pengontrolnya. Ketiga, top lapisan sedimen Tersier berdasarkan penampang geologi (Gambar 5) pada Lintasan MT memotong lapisan konduktif. Ini menunjukkan bahwa alterasi hidrotermal terjadi juga pada batuan sedimen dari Formasi Rambatan yang terdiri dari serpih dan napal.

Manifestasi panas bumi seperti keluarnya mata air panas dan terdapatnya batuan ubahan di daerah Guci merupakan salah satu data pendukung keberadaan sumber panas di daerah tersebut. Sehingga diharapkan aliran air panas bersifat "up-flow" bukan "out-flow". Namun, hasil geokimia oleh Surmayadi (2014) dan Nurohman et al. (2015) menunjukkan bahwa air panas di daerah Guci dan Kalipedes merupakan tipe air bikarbonat yang terbentuk pada zona *out flow* dari sistem panas bumi Gunung Slamet. Suhu air pada mata air panas berkisar 35°C–51°C dan pH = 6,8–7,9 atau relatif netral. Air panas yang muncul di permukaan berasal dari zona *out flow* reservoir panas bumi dan mengalami proses pencampuran dengan batuan dan air meteorit selama perjalanannya ke permukaan, dengan pergerakan dominan arah lateral. Dengan kata lain bahwa reservoir dan sumber panas berada cukup jauh dari lokasi penelitian.

Menurut Situmorang (2008), ketebalan batuan vulkanik Gunung Slamet untuk daerah ini tidak lebih dari 1000 meter seperti pada penampang geologi (Gambar 5). Di daerah Guci ketebalan batuan vulkanik Gunung Slamet sekitar 600 meter bahkan untuk daerah Sigedong hanya 350 meter. Penampang tahanan jenis MT (Gambar 4) menunjukkan reservoir panas bumi yang ditandai



Gambar 5. Penampang geologi Lintasan MT.

dengan nilai tahanan jenis antara 10 sampai 225 Ω .m, rata-rata berada pada kedalaman lebih dari 800 meter. Oleh karena itu, kemungkinan besar yang menjadi reservoir panas bumi selain dari batuan vulkanik Gunung Slamet adalah batupasir gampingan dari Formasi Rambatan yang berumur Tersier. Karena reservoir mengandung karbonatan, maka hasil analisis kimia oleh Surmayadi (2014) dan Nurrohman *et al.* (2014) pada mata air panas untuk daerah Guci yang menunjukkan kandungan HCO_3 tinggi (tipe air bikarbonat) belum tentu menunjukkan tipe aliran *out flow*, bisa jadi merupakan *up flow*. Kemungkinan bahwa reservoir maupun sumber panas berada dekat di lokasi penelitian dan bukan berasal dari tempat lain. Meningkatnya kandungan bikarbonat kemungkinan karena reaksi dengan batupasir gampingan pada reservoir dan bukan karena proses pencampuran selaman perjalanan ke permukaan. Fakta lainnya adalah dari model MT, tahanan jenis tinggi yang berasosiasi dengan batuan dasar sebagai sumber panas juga memperlihatkan adanya tonjolan, dengan kedalaman lebih dangkal dari lokasi lainnya. Ini menunjukkan sumber panas berada dekat dengan permukaan. Atas dasar hal tersebut, diperkirakan bahwa aliran fluida panas pada sistem panas bumi Gunung Slamet di kawasan Guci merupakan *up*

flow. Namun pendapat ini perlu kajian yang lebih mendalam terutama dengan melakukan pemetaan geologi dan geokimia yang lebih rinci.

Dari kajian terhadap hasil penelitian MT yang dikombinasikan dengan hasil kajian data sekunder berupa hasil analisis geokimia dan geologi meunjukkan bahwa daerah depresi Guci merupakan daerah potensial sebagai suatu sistem panas bumi Gunung Slamet. Di daerah Guci banyak ditemukan mata air panas dan batuan ubahan sebagai penanda adanya sumber panas di bawahnya. Hasil MT meunjukkan adanya kondisi ideal sistem panas bumi di mana adanya lapisan penudung yang dicirikan munculnya lapisan konduktif yang menutupi lapisan dengan tahanan jenis sedang-cukup tinggi sebagai reservoir panas bumi dan di bawahnya ada tonjolan batuan dasar yang dicirikan dengan tahanan jenis tinggi sebagai sumber panas. Diperkiraan kedalaman top lapisan reservoir berdasarkan penampang tahanan jenis adalah antara 750 sampai 1600 meter, dengan perkiraan ketebalan 600 sampai 1000 meter.

KESIMPULAN

Dari penampang tahanan jenis MT, sebaran nilai tahanan jenis $<10 \Omega$ m yang menyebar dari Pekandangan di timurlaut menuju Kalipedes,

mulai dari titik A-01 sampai titik A-12, diduga sebagai lapisan batuan penudung (*caprock*), sebagian besar berasosiasi dengan batuan Gunungapi Slamet dan batuan serpih dan napal dari Formasi Rambatan yang berumur Tersier. Sebaran anomali tahanan jenis antara 10-225 Ωm yang mulai muncul di kedalaman 750 m hingga 1600 m di bawah permukaan diduga merupakan reservoir, yang kemungkinan berasosiasi dengan batuan vulkanik Gunung Slamet. Lapisan ini boleh jadi merupakan lapisan batu pasir gampingan dari Formasi Rambatan yang lulus air dan berpori. Perkiraan ketebalan reservoir adalah antara 600 sampai 1000 meter. Sebaran tahanan jenis dengan nilai lebih dari 1000 Ωm yang berada di kedalaman mulai 2500 m di bawah permukaan tanah diduga merupakan lapisan batuan dasar sebagai sumber panas. Batuan dasar ini membentuk tonjolan di bawah Sudikampir dekat depresi Guci yang menunjukkan adanya sumber panas yang dekat ke permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa daerah depresi Guci merupakan area potensial sistem panas bumi Gunung Slamet.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada Kepala Pusat Geoteknologi LIPI. Kepada Kelompok Penelitian Gempabumi dan Geodinamika terima kasih atas kerjasamanya terutama dalam diskusi-diskusi yang memperkaya tulisan ini. Tak lupa kami sampaikan penghargaan dan terimakasih kepada seluruh teknisi Lab. Geofisika yang telah menyiapkan peralatan dan fasilitas dalam pengambilan dan pengolahan data.

DAFTAR PUSTAKA

Anderson E., Crosby, D., Ussher, G., 2000. Bulls-eye! Simple resistivity imaging to reliably locate the geothermal reservoir: Proceedings world geothermal congress. Kyushu-Tohoku. Japan., 909–914.

Djuri, M., Samodra, H., Amin, T.C., dan Gafoer, S., 1996. Peta Geologi Lembar Purwokerto dan Tegal, Jawa. Skala 1:100.000. Pusat Survei Geologi. Bandung.

Grandis, H., 2013. Metoda Magnetotelurik (MT). Institut Teknologi Bandung, Bandung.

Ismayanto, A.F., Fatah., T.A., Setiawan, I., dan Sudarsono, 2007. Interpretasi Struktur Jawa Dari Relief Shaded Gravity. Bandung, Seminar Geoteknologi.

Kasbani, 2014. Statistik Energi Terbarukan. Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan, dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM), Jakarta.

Nurohman, H., Bakti, H., and Indarto, S., 2015. Geochemistry of Hot Water And Interpretation of Permeable zone Aster-GDEM And Radon Concentration in Mount Slamet, Central Java, Indonesia, Proceedings, 4th ITB Geothermal Workshop 2015, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia, March 16-20.

Permana, H., Sudarsono, dan Indarto, S. 2014. Studi Morfostratigrafi dan Morfostruktur: Studi Kasus Prospek Lapangan Panasbumi Guci, Tegal, Jawa Tengah: Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI tahun 2014, 419-430.

Reswara, A., dan Sehad, S., 2014. Pendugaan Lapisan Reservoir Panasbumi Di Kawasan Gunungapi Slamet Dengan Memanfaatkan Data Anomali Medan Gravitasi Citra Satelit. Berkala Fisika, 17(2), 45–54.

Rodi, W., dan Mackie, R. L., 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion. Geophysics, 66(1), 174-187.

Simpson, F., dan Bahr, K., 2005. *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press, USA.

Situmorang, T., 2008. Laporan Pekerjaan: Interpretasi Foto Udara dan Landsat, WKP Panasbumi Guci, Jawa Tengah (non-publikasi).

Surmayadi, M., 2014. Geokimia Panas Bumi Gunung Slamet, Jawa Tengah. Prosiding Seminar Nasional Fakultas Teknik Geologi, Bandung 24 Mei 2014.

Sumintadireja, P., Suhanto, E., and Kasbani, 2010. Jaboi Geothermal Field Boundary, Nangroe Aceh Darussalam, based on

Geology and Geophysics Exploration
Data. *Jurnal Geoplika*, 5(1), 011–015.

Ushijima, K., Mustopa, E.J., Jotaki, H., and
Mizunaga, H., 2005. Magnetotelluric
Soundings in the Takigami Geothermal
Area, Japan. *Proceedings World
Geothermal Congress 2005, Antalia,
Turkey.*