

APLIKASI METODE VLF (VERY LOW FREQUENCY) DAN METODE RESISTIVITAS UNTUK ESTIMASI SEBARAN LAVA BASALT BERSTRUKTUR BANTAL DI DAERAH WATUADEG KABUPATEN SLEMAN YOGYAKARTA

Adrian Rahmat Nur^{1*}, Febrian Dedi Sastrawan², Bayu Achil Sadjab³, Sismanto⁴

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Kendari, 93232, Indonesia

²Program Studi Fisika, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan, 76127, Indonesia

³Program Studi Fisika, Fakultas Ilmu Alam dan Teknologi Rekayasa, Universitas Halmahera, Halmahera Utara, 97762, Indonesia

⁴Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 55281, Indonesia

*e-mail: adrian.rahmat.n@uho.ac.id

ABSTRAK

Penelitian tentang estimasi sebaran lava basalt berstruktur bantal telah dilakukan di daerah Watuadeg Kecamatan Berbah Kabupaten Sleman D.I. Yogyakarta dengan menggunakan metode VLF (Very Low Frequency) dan metode resistivitas untuk mengetahui variasi nilai rapat arus ekuivalen dan resistivitas bawah permukaan, serta arah penyebaran lava bantal. Pengukuran metode VLF sebanyak 5 lintasan yang berarah Barat – Timur dan 3 lintasan berarah Utara – Selatan. Pengukuran metode resistivitas sebanyak 9 titik dengan setengah panjang bentangan ($AB/2$) adalah 200 meter dalam area pengukuran 2 km^2 . Hasil pengolahan data resistivitas menunjukkan nilai variasi resistivitas bawah permukaan adalah $10,9 \Omega\text{m} - 109 \Omega\text{m}$ yang diidentifikasi sebagai resistivitas soil, $32,3 \Omega\text{m} - 122 \Omega\text{m}$ diindikasikan sebagai resistivitas tuf, $286 \Omega\text{m} - 888 \Omega\text{m}$ diidentifikasi sebagai resistivitas lava bantal, $112 \Omega\text{m} - 167 \Omega\text{m}$ diidentifikasi sebagai resistivitas aglomerat dan $2,72 \Omega\text{m} - 36,2 \Omega\text{m}$ diindikasikan sebagai resistivitas lempung. Nilai rapat arus ekuivalen (RAE) di daerah Watuadeg bervariasi antara 60 % - 240 %. Berdasarkan hasil korelasi antar penampang RAE dengan penampang korelasi resistivitas diperkirakan bahwa sebaran lava basalt berstruktur bantal di daerah Watuadeg bersumber dari bukit yang terletak di sebelah Barat kali Opak dengan arah sebarannya menerus ke arah Selatan.

Kata Kunci: Lava Basalt Berstruktur Bantal; NA-MEMD; Resistivitas; Very Low Frequency

ABSTRACT

[Title: Application of Very Low Frequency Method and Resistivity Method for Estimation of Lava Pillow Distribution in Watuadeg Sleman Yogyakarta] Research on estimation of pillow lava distribution has been conducted in Watuadeg area, Berbah, Sleman, D.I. Yogyakarta using very low frequency and resistivity methods to determine variations of subsurface equivalent current density and resistivity values, and also pillow lava distribution direction. There are 5 lines VLF measurement with West - East direction and 3 lines with North - South direction. Resistivity measurement are 9 points with half-current electrode separation ($AB/2$) are 200 meters in 2 km^2 measuring area. Resistivity data processing results showed that the subsurface resistivity value variations were $10.9 \Omega\text{m} - 109 \Omega\text{m}$ identified as soil resistivity, $32.3 \Omega\text{m} - 122 \Omega\text{m}$ indicated as tuf resistivity, $286 \Omega\text{m} - 888 \Omega\text{m}$ identified as pillow lava, $112 \Omega\text{m} - 167 \Omega\text{m}$ identified as agglomerates resistivity and $2.72 \Omega\text{m} - 36.2 \Omega\text{m}$ indicated as clay resistivity. Equivalent current density (RAE) in Watuadeg area about 60% - 240%. Based on the cross-correlations result between equivalent current density section with resistivity section was estimated that the pillow lava distribution in Watuadeg area sourced from the hill which located on the West Opak river with distribution direction continuous South towards..

Keywords: Pillow Lava; NA-MEMD; Resistivity; Very Low Frequency

PENDAHULUAN

Daerah Berbah merupakan wilayah perbatasan bentang alam antara Pegunungan Selatan di bagian Timur dengan dataran Yogyakarta di sebelah Barat yang juga dialiri oleh Kali Opak yang mengalir ke arah Selatan. Di tepi Barat Kali Opak terdapat singkapan lava basalt berstruktur bantal yang ditindih langsung oleh batuan klastika gunung api bagian Formasi Semilir.

Salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengetahui penyebaran aliran lava basalt adalah metode elektromagnetik Very Low Frequency (VLF). Pada prinsipnya metode ini mengukur medan primer sumber dan medan sekunder yang ditimbulkan oleh batuan konduktif di bawah permukaan. Perbedaan resistivitas batuan dapat diketahui dengan melakukan pengukuran medan total

(primer dan sekunder). Hasil pengukurannya memberikan informasi perubahan resistivitas secara lateral di sepanjang lintasan.

Untuk mendukung hasil penelitian, maka metode *Very Low Frequency* (VLF) dipadukan dengan metode resistivitas yang digunakan untuk mengetahui lapisan bawah permukaan secara vertikal. Penggunaan kedua metode tersebut diharapkan mampu memberikan informasi tentang penyebaran lava basalt berstruktur bantal yang tersingkap di tepi Barat Kali Opak daerah Watuadeg Berbah.

Daerah penelitian terdiri atas bukit-bukit terisolir (*isolated hills*) di antara dataran endapan aluvium Gunung api Merapi. Peneliti terdahulu menyebutnya sebagai bukit-bukit *inlier* karena tersusun atas batuan tua yang dikelilingi oleh endapan muda dan berpendapat bahwa bukit-bukit terisolir tersebut disebabkan oleh kegiatan tektonika berupa pensesaran (Astuti dkk., 2009). Hartono dan Bronto (2009) menyatakan bahwa bukit-bukit terisolir yang tersusun oleh lava dan atau breksi piroklastika/aglomerat tersebut adalah gunung api purba monogenesis atau mengarah ke komposit dengan sesar mempengaruhi migrasi magma menuju ke permukaan bumi.

Litologi penyusun daerah penelitian adalah lava bantal dengan sumber erupsi pada bukit yang berada di sebelah Barat Sungai Opak di Dusun Sumber Kulon. Lokasi penelitian juga tersusun oleh breksi polimik, tuf dan breksi pumis berstruktur laminasi, silangsiur (*antidune*) hingga berlapis, kemudian laminasi lempung hitam endapan lakustrin berselingan dengan laminasi abu gunungapi berwarna cerah. Secara tidak selaras terendapkan perselingan lahar dan endapan sungai dengan struktur berlapis-laminasi, hingga silangsiur dari batuan hasil aktivitas Gunung Merapi seperti tampak pada Gambar 1.

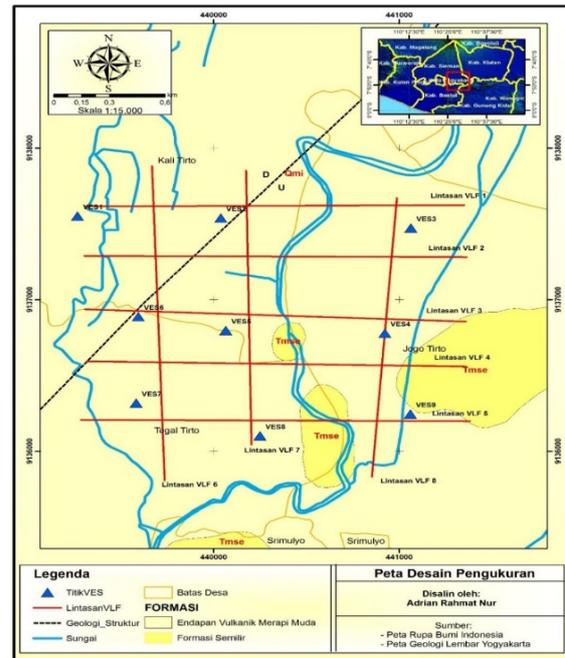


Gambar 1. Singkapan lava basalt berstruktur bantal di tepi Barat Kali Opak

METODE

Area Penelitian

Penelitian dilakukan dalam luasan area 2 x 2 km² yang berlokasi di Dusun Watuadeg Desa Jogotirto, Dusun Sumber Kidul Desa Kalitirto dan Dusun Candirejo Desa Tegaltirto Kecamatan Berbah Sleman Yogyakarta seperti yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian dan titik pengukuran

Perangkat Penelitian

Alat yang digunakan dalam akuisisi data untuk metode VLF yaitu perangkat T-VLF BRGM, Accu, GPS, meteran, dan kompas geologi sedangkan untuk metode resistivitas yaitu Oyo resistivimeter, Accu, elektroda, kabel, palu dan GPS dan meteran. Software yang digunakan dalam pengolahan data diantaranya *Matlab 2013b*, *KH Filter 1.1a*, *IP2Win 2.3b*, *Arcgis 10*, *Ms Excel 2013* dan *Ms Word 2013*.

Akuisisi Data Lapangan

Pengukuran metode VLF dilakukan pada 8 lintasan dengan panjang lintasan 2.000 meter dengan spasi antar titik pengukuran 10 meter sedangkan akuisisi metode resistivitas sebanyak 9 titik dengan panjang bentangan adalah 400 meter.

Metode VLF

Metode VLF merupakan metode elektromagnetik yang bekerja dengan memanfaatkan sumber gelombang elektromagnetik yang berfrekuensi sangat rendah yaitu 15 – 30 dan berdaya besar yaitu 100 – 1000 KW dan panjang gelombang 10 – 20 km dari pemancar radio yang berada di beberapa negara yang awalnya digunakan untuk komunikasi kapal selam bawah laut.

Prinsip kerja VLF adalah gelombang primer yang dipancarkan oleh transmitter akan menginduksi batuan konduktif yang dilaluinya sehingga akan menimbulkan arus induksi (*Eddy Current*) yang selanjutnya disebut sebagai medan sekunder. Semakin besar arus *Eddy* maka semakin besar rapat muatannya. Medan elektromagnetik yang merambat pada konduktivitas batuan σ , permitivitas ϵ dan permitivitas μ berlaku persamaan Maxwell dalam domain frekuensi yang ditulis

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega\epsilon)\mathbf{E} \quad (\text{Hukum Ampere}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -(i\omega\mu\mu_0)\mathbf{H} \quad (\text{Hukum Faraday}) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon\mathbf{E}) = \rho \quad (\text{Hukum Gauss}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (4)$$

dengan \mathbf{E} dan \mathbf{H} masing-masing merupakan vektor medan listrik dan medan magnet fungsi waktu t dengan frekuensi sudut ω dan ρ adalah rapat muatan (Telford, 1990).

Rapat Arus Ekuivalen (RAE)

Rapat arus ekuivalen terdiri dari arus yang menginduksi konduktor dan arus yang terkonsentrasi dalam konduktor dari daerah sekelilingnya yang kurang konduktif (Karous & Hjelt, 1983). Melalui persamaan Biot-Savart, dapat diketahui pengaruh rapat arus sebagai fungsi jarak horisontal dan vertikal $I(\xi, \zeta)$ terhadap komponen medan magnet vertikal Hz. yang diberikan oleh persamaan,

$$\mathbf{H}_z(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} d\xi \int_{-\infty}^{\infty} I(\xi, \zeta) \cdot (x - \xi) \cdot \frac{d\zeta}{[(x-\xi)^2 + \zeta^2]} \quad (5)$$

Filter NA-MEMD

Filter *Noise Assited – Multivariate Empirical Mode Decomposition* (NA-MEMD) merupakan pengembangan *multivariate* (multivariabel) dari *Empirical Mode Decomposition* (EMD) (Rehman dan Mandic, 2010). Filter ini digunakan untuk menganalisis data yang sifatnya nonlinier dan nonstasioner dengan menguraikan data ke dalam satu set mode osilasi yang disebut *intrinsic mode function* (IMF).

Prinsip umum dalam metode EMD adalah perhitungan rata-rata lokal dari sinyal yang digunakan. Sinyal yang masih mengandung *noise* tersebut selanjutnya diinterpolasi untuk memperoleh sinyal yang telah terbebas dari *noise* berdasarkan persamaan,

$$Y(t) = y(t) + p(t)xR \quad (6)$$

Metode Resistivitas

Metode resistivitas adalah salah satu metode dalam geofisika yang mempelajari sifat aliran listrik di dalam bumi. Pendeteksian di atas permukaan meliputi pengukuran medan potensial, dan arus yang terjadi baik secara alamiah maupun akibat penginjeksian arus ke dalam bumi. Prinsip kerja metode geolistrik dilakukan dengan cara menginjeksikan arus listrik ke

permukaan tanah melalui sepasang elektroda dan mengukur beda potensial dengan sepasang elektroda yang lain.

Konsep dasar dari pengukuran resistivitas adalah bila arus listrik I diinjeksikan ke dalam suatu medium dan diukur beda potensialnya ΔV (tegangan), maka nilai resistivitas medium ρ dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} K \quad (7)$$

dengan K adalah faktor geometri yaitu besaran koreksi letak kedua elektroda potensial terhadap letak elektroda arus. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi *Schlumberger* yang bertujuan mempelajari variasi resistivitas lapisan bawah permukaan secara vertikal.

Konfigurasi Schlumberger

Konfigurasi Schlumberger biasanya digunakan untuk menyelidiki variasi resistivitas ke arah vertikal (*sounding*). Menurut Bisri (2009), kelebihan dari konfigurasi ini adalah kemampuan untuk mendeteksi adanya nonhomogenitas lapisan batuan pada bawah permukaan, yaitu dengan membandingkan nilai resistivitas semu ketika terjadi perubahan jarak elektroda MN/2 berdasarkan pada konfigurasi Schlumberger diperoleh nilai faktor geometri sebesar,

$$K = \frac{\pi(a^2 - b^2)}{2b} \quad (8)$$

Teknik Pengolahan Data

Metode VLF

Data VLF yang terukur di lapangan berupa data *tilt*, *ellipt*, medan horizontal dan medan vertikal masih dipengaruhi oleh *noise* sehingga perlu dilakukan beberapa filter sebelum dilakukan tahap interpretasi untuk meminimalisir pengaruh *noise* tersebut. Filter yang digunakan diantaranya filter NA-MEMD, filter Fraser dan filter Karous Hjelt. Filter NA-MEMD digunakan untuk *smoothing* data agar kurva *tilt* dan *ellipt* yang dihasilkan lebih *smooth* sehingga memudahkan dalam tahap interpretasi. Filter Fraser digunakan untuk menentukan posisi target yang diinginkan. sedangkan untuk mengetahui estimasi kedalaman target maka dilakukan pengolahan dengan menggunakan filter Karous Hjelt. Hasil pengolahan data VLF selanjutnya diinterpretasi secara kualitatif untuk mengetahui kondisi bawah permukaan di daerah penelitian.

Metode Resistivitas

Parameter yang diperoleh pada saat pengukuran metode resistivitas berupa kuat arus dan beda potensial. Penambahan faktor geometri akan memberikan nilai resistivitas semu yang selanjutnya dilakukan proses *shifting*. Proses *shifting* dilakukan untuk mendistribusikan perbedaan nilai resistivitas

akibat perubahan jarak elektroda potensial. Data yang telah *dishifting* selanjutnya diolah dengan menggunakan software *IP2Win* untuk mengetahui jenis litologi di daerah penelitian berdasarkan anomali resistivitas batuan bawah permukaan. Hasil pengolahan data resistivitas kemudian dipadukan dengan hasil pengolahan data metode VLF untuk memperoleh informasi kondisi bawah permukaan tentang sebaran lava basalt Watuadeg.

Teknik Analisis Data

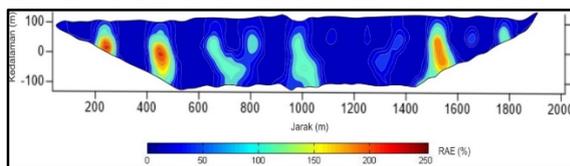
Hasil olahan data *Very Low Frequency* (VLF) dikorelasikan dengan hasil olahan data metode resistivitas kemudian dilakukan pemodelan 1-D dan 2-D dengan menggunakan software *Matlab 2013b*. Pemodelan bertujuan untuk memvisualisasikan kondisi bawah permukaan berdasarkan nilai resistivitas batuan, seperti ketebalan lapisan batuan, jenis batuan dan kontak antar batuan serta memberikan informasi sebaran batuan secara lateral dan vertikal sehingga dapat diketahui penyebaran lava basalt baik secara lateral maupun vertikal di daerah Watuadeg.

Korelasi data *Very Low Frequency* (VLF) dan data resistivitas selanjutnya dilakukan pemodelan 1-D dan 2-D dengan menggunakan software *Matlab 2013b*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

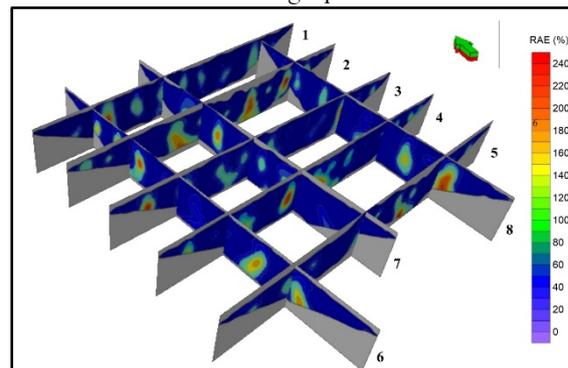
Analisis Data VLF

Hasil analisis data metode *Very Low Frequency* menunjukkan bahwa terdapat beberapa anomali dengan klosur-klosur yang kecil memanjang berupa daerah konduktif ditandai dengan nilai Rapat Arus Ekuivalen (RAE) yang tinggi berkisar antara 120-240%. Daerah-daerah konduktif terletak pada jarak sekitar 260 meter dari titik awal pengukuran dengan estimasi kedalaman sekitar 50 meter dari permukaan tanah. Daerah konduktif lainnya berada pada jarak sekitar 500 meter pada kedalaman sekitar 30 meter, pada jarak sekitar 800 meter dengan estimasi kedalaman 60 meter, dan pada jarak sekitar 1.100 meter pada kedalaman sekitar 50 meter serta pada jarak 1.550 meter dari titik awal pengukuran dengan estimasi kedalaman sekitar 80 meter dan 40 meter.



Gambar 3. Penampang Rapat Arus Ekuivalen (RAE) lintasan 3

Anomali dangkal pada jarak 260 meter, 500 meter dan 1.700 meter diperkirakan sebagai *noise* yang ditimbulkan oleh benda-benda konduktif berupa *power line* di sekitar pemukiman warga. Zona konduktif pada jarak 800 meter diperkirakan lempung yang mengandung air. Sedangkan daerah konduktif pada jarak 1.100 meter dari titik awal pengukuran diperkirakan sebagai sumber *ekstrusi* lava basalt Watuadeg yang tersingkap tepi Barat kali Opak. Hal ini diperkuat oleh informasi geologi yang menyatakan bahwa sumber intrusi lava basalt Watuadeg diperkirakan berada di Bukit Sumber Kulon yang berada di sebelah Barat singkapan lava basalt.

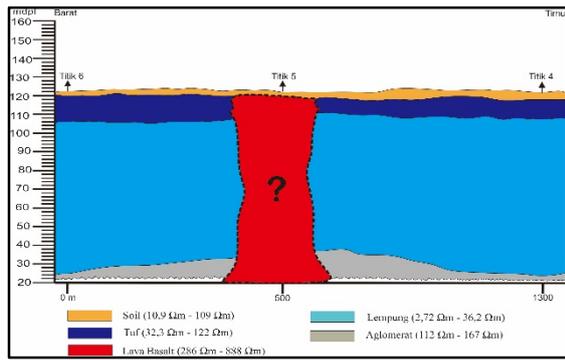


Gambar 4. Korelasi penampang kontur anomali rapat arus ekuivalen 8 lintasan

Gambar 4 merupakan korelasi penampang kontur rapat arus ekuivalen dari semua lintasan yaitu sebanyak 8 lintasan pengukuran metode VLF yang digunakan untuk mengetahui sebaran lava basalt di daerah penelitian. Zona-zona konduktif yang disebabkan oleh kandungan mineral konduktif akan memberikan respon berupa anomali nilai rapat arus ekuivalen yang lebih tinggi dibandingkan dengan batuan sekitarnya yang tidak mengandung mineral-mineral konduktif. Berdasarkan hasil pengolahan data VLF dan informasi geologi di lapangan maka diperkirakan sebaran lava basalt berstruktur bantal berada pada lintasan 3 pada jarak 1.100 meter yang menyebar hingga pada lintasan 7 pada jarak 900 meter. Sumber *ekstrusi* lava basalt diperkirakan berada di sekitar perpotongan antara lintasan 3 dengan lintasan 7 tepatnya di bukit kecil yang terletak sekitar 30 meter dari Barat kali Opak dengan arah penyebarannya berarah Selatan dan Barat Daya.

Analisis Data Resistivitas

Litologi bawah permukaan dapat diperkirakan berdasarkan perbedaan nilai resistivitas tiap lapisan batuan yang terukur di lapangan.

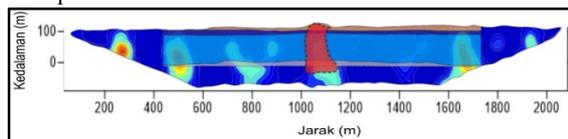


Gambar 5. Penampang korelasi resistivitas titik 4, 5, dan 6

Penampang korelasi resistivitas (Gambar 5) menunjukkan lapisan teratas berupa *soil* yang diwakili dengan warna kuning dengan nilai resistivitas berkisar antara 10,9 – 109 Ωm. Lapisan kedua berupa *tuf* dengan resistivitas 32,3 – 122 Ωm. Litologi berbeda dapat dilihat pada titik pengukuran 5 yang ditunjukkan dengan warna merah. Litologi dengan nilai resistivitas tinggi yaitu sekitar 286 – 888 Ωm diindikasikan sebagai lava basalt seperti yang tersingkap di tepi Barat kali Opak yang berjarak sekitar 50 meter dari titik pengukuran 5. Warna biru muda diindikasikan sebagai lempung dengan resistivitas sekitar 2,72 – 36,2 Ωm dan resistivitas berkisar 112 – 167 Ωm diindikasikan sebagai aglomerat yang ditampilkan dengan warna abu-abu.

Korelasi data VLF dan data Resistivitas

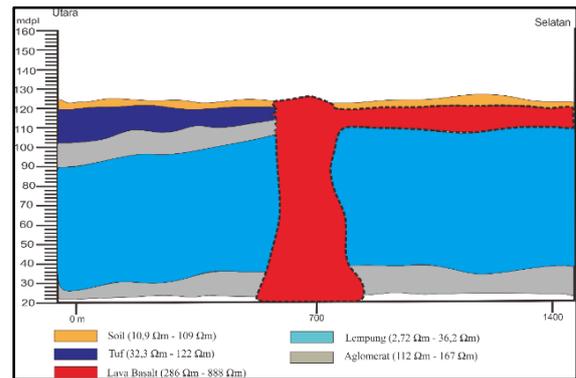
Hasil analisis metode *Very Low Frequency* selanjutnya dikorelasikan dengan hasil analisis metode resistivitas untuk memudahkan dalam tahap interpretasi.



Gambar 6. Overlay penampang rapat arus ekuivalen dan penampang korelasi resistivitas

Gambar 6 menunjukkan hasil *overlay* antara penampang VLF lintasan 3 dengan penampang korelasi resistivitas titik 4, 5, 6 yang berada pada lokasi yang sama untuk mengetahui sumber *ekstrusi* lava basalt.

Berdasarkan hasil *overlay* tersebut yang diperkuat oleh data geologi daerah penelitian maka dapat dibuat suatu model konseptual sebaran dan sumber *ekstrusi* lava basalt di daerah Watuadeg seperti yang ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Model konseptual sebaran dan sumber ekstrusi lava basalt di daerah Watuadeg

Model konseptual tersebut menunjukkan bahwa *ekstrusi* lava basalt berstruktur bantal bersumber dari bukit yang terletak di sebelah Barat kali Opak dengan arah sebarannya menerus ke arah Selatan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Dari hasil pengolahan dan analisis data dapat diambil beberapa kesimpulan, pertama variasi nilai resistivitas bawah permukaan di daerah Watuadeg terdiri dari 10,9-109 Ωm yang diidentifikasi sebagai resistivitas *soil*, 32,3-310 Ωm diindikasikan sebagai resistivitas *tuf*, 286-888 Ωm diidentifikasi sebagai resistivitas lava basalt, 2,72-36,2 Ωm diindikasikan sebagai resistivitas lempung dan resistivitas 112-167 Ωm diindikasikan sebagai resistivitas aglomerat. Adapun nilai Rapat Arus Ekuivalen (RAE) di daerah Watuadeg bervariasi antara 60-240%. Kedua, sebaran lava basalt berstruktur bantal di daerah Watuadeg bersumber dari bukit yang terletak di sebelah Barat kali Opak dengan arah sebarannya menerus ke arah Selatan.

Untuk memperoleh hasil yang lebih detail tentang penyebaran lava basalt maka disarankan untuk penelitian selanjutnya agar menambahkan titik pengukuran resistivitas dengan jarak antar titik pengukuran yang lebih rapat agar model konseptual yang dihasilkan lebih valid dan informatif. Selain itu, perlu dilakukan pengukuran dengan perpaduan metode geofisika lainnya untuk memperoleh gambaran bawah permukaan yang lebih rinci dan informatif.

DAFTAR PUSTAKA

Astuti, B.S., Rahardjo, W., Listyani, R.A., dan Husein, S.. 2009. Morfogenesis Bukit - bukit inlier antara Watuadeg hingga Pengklik, Daerah Berbah, Sleman Yogyakarta, *Prosiding Workshop Geologi Pegunungan Selatan 2007*, Badan Geologi, Pusat Survei Geologi, Bandung.

- Bisri, Mohammad, 1991, Aliran Air Tanah Malang, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Bronto, S., Misdiyanta, P., dan Hartono, H.G., 1994. Penyelidikan awal lava bantal Watuadeg, Bayat dan Karangsembung, Jawa Tengah. *Prosiding Seminar Geologi dan Geoteknik Pulau Jawa, sejak akhir Mesozoik hingga Kuartar*, Jur. Teknik Geologi, FT-UGM, Februari, Yogyakarta, 123-30.
- Hartono, G., dan Bronto, S., 2009, Lapangan Gunung Api Tersier Daerah Berbah Sleman - Imogiri Bantul, Yogyakarta, *Proceedings International Conference on Earth Science and Technology*, 1, UGM, Yogyakarta
- Huang, N.E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M.C., Shih, H.H., Zheng, Q., Yen, N.C., Tung, C.C., and Liu, H. H., 1998. The Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for Non Linear and Non-stationary Time Series Analysis. *Proceeding. R.Soc.A: Math.Phys.Eng.Sci.* 454, 903–995.
- Karous, M. and Hjelt, S.E., 1983. Linear Filtering of Dip-Angle Measurements, *Geophysical Prospecting* 31, 782-794.
- Rehman, N., and Mandic, D.P., 2010, Multivariate Empirical Mode Decomposition. *Proc. R. Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 446,1291–1302.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E., 1990, *Applied Geophysics*, 2nd edition, Cambridge University Press, UK.
- Van Bemmelen, R.W., 1949, *The Geology of Indonesia*. Govt. Printing Office, Nijhoff, The Hague, Nederland.
- Winarti dan Hartono, G.H., 2015. Identifikasi Batuan Gunung Api Purba di Pegunungan Selatan Yogyakarta Bagian Barat Berdasarkan Pengukuran Geolistrik. *Eksplorium*. Volume 36 No. 1, Mei 2015: 57–70, ISSN 0854 – 1418.