

KARAKTERISASI PARAMETER FISIK BATUAN VULKANIK GUNUNG ARJUNO-WELIRANG, JAWA TIMUR

Yulia Nur Fajrina

Jurusan Teknik Geofisika, FTSP Institut Teknologi Sepuluh Nopember

e-mail: fajrina.yulia@gmail.com

Abstrak. Sebuah kawasan yang memiliki aktivitas vulkanik, mempunyai potensi sumber daya yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas bumi hingga cadangan hidrokarbon. Namun eksplorasi untuk lingkungan vulkanik masih menjadi tantangan terutama untuk metode seismik. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengkarakterisasi fisik dan analisa hubungan antara parameter densitas, kecepatan V_p , atenuasi, dan resistivitas pada batuan vulkanik studi kasus Gunung Arjuno-Welirang. Penelitian diawali dengan pengambilan sampel di lapangan dan pembuatan *coring* batuan sehingga didapatkan 45 *coring* batuan, dari 16 sampel batuan, yang mewakili 6 satuan batuan. Kemudian dilakukan pengukuran parameter resistivitas dengan metode konfigurasi *axial resistivity*, pengukuran densitas dengan prinsip Archimedes, dan pengukuran kecepatan V_p serta atenuasi dengan transmisi gelombang ultrasonik. Maka didapatkan hasil rentang parameter densitas batuan vulkanik Arjuno-Welirang berkisar antar 2400 – 2900 kg/m^3 , sedangkan rentang resistivitas bervariasi dari 30-185 $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$. Kemudian rentang nilai kecepatan V_p bervariasi dari 5100-6700 m/s , dengan koefisien atenuasinya memiliki rentang $0.05-0.23 \times 10^{-3} \text{dB/m}$, dimana nilai densitas akan berbanding lurus dengan kecepatan V_p , dan nilai resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan V_p . Berdasarkan perbedaan trend dan sebaran data pada *crossplot*, maka batuan vulkanik sampel dapat dikelompokkan 3 kategori produk batuan vulkanik, yakni produk kategori lava, piroklastik, dan lava vesikular. Berdasarkan analisa petrolog, batuan vulkanik Arjuno-Welirang memiliki tipe intermediate-mafik dengan nama batuan dominasi andesit-basaltik dan basalt. Diharapkan karakterisasi ini dapat menjadi referensi untuk memodelkan bawah permukaan dan membantu metode eksplorasi geofisika di lingkungan vulkanik.

Kata Kunci: atenuasi; batuan vulkanik; densitas; kecepatan V_p ; resistivitas

Abstract. An area where has volcanic activity, have the potential of natural resources that can be utilized as a source of geothermal energy as far as a hydrocarbon reserves. However, exploration for volcanic province is still a challenge for geophysicist, especially for seismic methods. The purpose of this study is to characterize the physical and analyze the relation between parameters of density, velocity V_p , attenuation, and resistivity in the volcanic rock for Mt. Arjuno-Welirang casr study. The study begins by field sampling and coring the rocks so it was gotten 45 coring rocks, from 16 rock samples, representing 6 lithologies, then measuring the parameters of resistivity with the configuration method axial resistivity, density measurements by Archimedes principle, and measurement Velocity V_p and attenuation by using the ultrasonic wave transmission. Then the results obtained that parameter ranges of Arjuno-Welirang density volcanic rocks are between 2400 - 2900 kg / m^3 , while the resistivity ranges varying from 30-185 $\text{k}\Omega\cdot\text{m}$, then the range of values velocity V_p are 5100-6700 m / s , the attenuation coefficient ranges $0.05-0.23 \times 10^{-3} \text{dB} / \text{m}$. The density parameter proportional to velocity V_p , and the resistivity values will be inversely proportional to the density-velocity V_p . Based on the differences in trends and distribution of data on crossplot, volcanic rock samples can be grouped by three categories of products of volcanic rock, the product of lava, pyroclastic and lava vesicular. Based on an analysis of volcanic rocks petrology Arjuno-Welirang has a type of intermediate-mafic rock with the name of domination basaltic andesite and basalt. This characterization is expected to be a reference for advancing subsurface modeling and geophysical exploration method in volcanic province.

Keywords: attenuation; volcanic rock; density, resistivity; velocity V_p

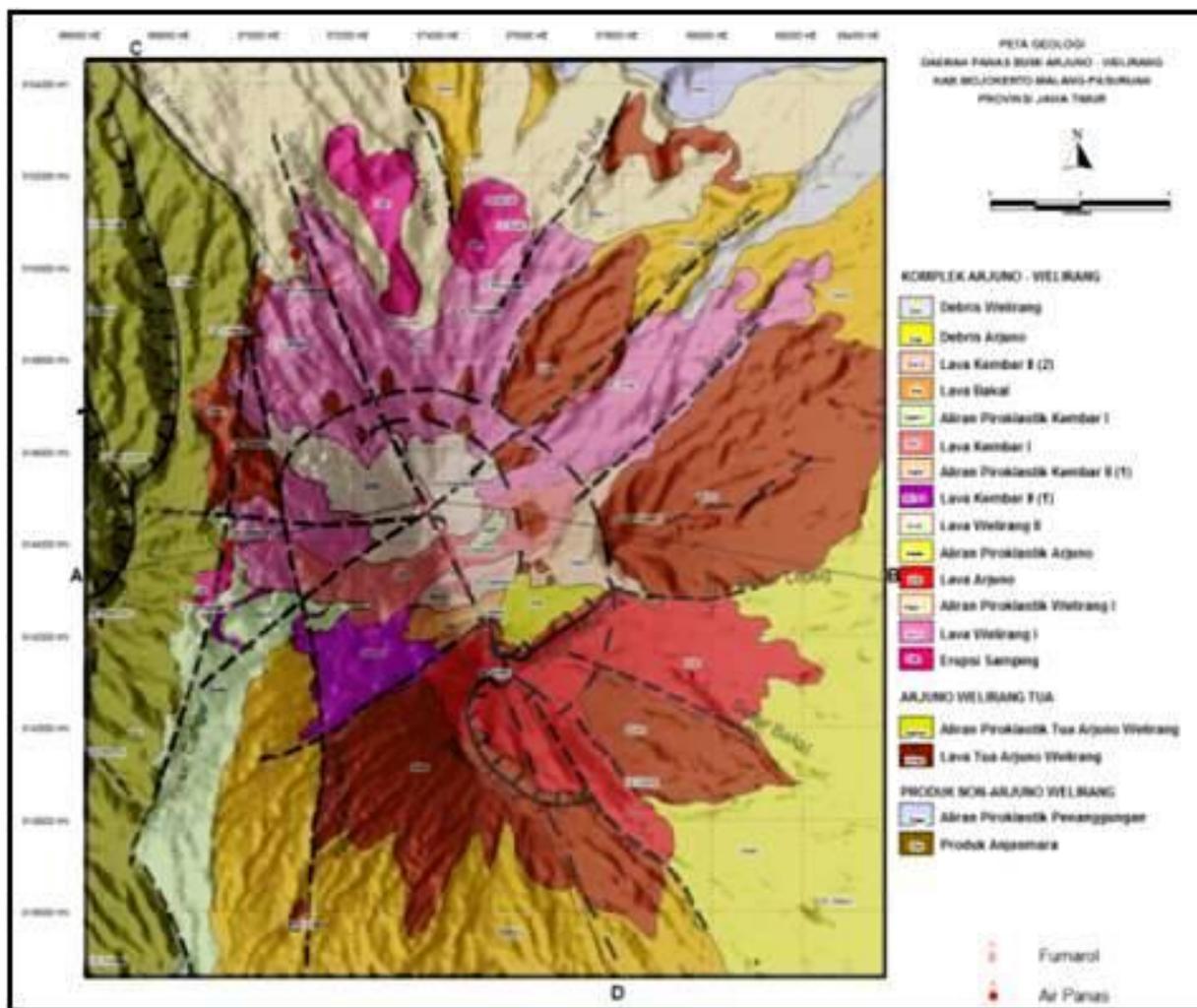
PENDAHULUAN

Letak Indonesia yang berada di kawasan Cincin Api Pasifik menyebabkan Indonesia memiliki banyak gunung api yang aktif dan potensi gempa bumi yang cukup tinggi. Cincin Api Pasifik adalah sebuah

kawasan aktif dari segi tektonik dan vulkanik yang gunung aktif dibagi menjadi empat busur gunung api, yakni Busur Gunung Api Sunda, Busur Gunung Api Banda, Busur Gunung Api Halmahera, dan Busur Gunung Api Sulawesi Utara-Kepulauan Sangihe (Sutikno, 2002). Sebuah kawasan yang memiliki aktivitas vulkanik, mempunyai potensi sumber daya alam yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi panas bumi hingga cadangan hidrokarbon. Sampai saat ini karakterisasi fisik yang berhasil dilakukan oleh metode geofisika untuk lingkungan vulkanik hanya metode *gravity*,

mengelilingi Samudra Pasifik. Di Indonesia, sebaran geolistrik, magnetik dan elektromagnetik. Sedangkan metode sesimik yang memanfaatkan kecepatan gelombang belum mendapatkan hasil eksplorasi yang baik. Tujuan dari penelitian ini ialah untuk mengkarakterisasi fisik dan analisa hubungan antara parameter densitas, kecepatan Vp, atenuasi, dan resistivitas pada batuan vulkanik studi kasus Gunung Arjuno-Welirang, serta menganalisa petrologi batuan vulkanik.

Geologi Regional



Gambar 1. Komponen Satuan Batuan dan Struktur Geologi Komplek Gunung Arjuno-Welirang.

Gunung Arjuno – Welirang secara administrasi terdapat di 3 wilayah kabupaten, Kabupaten Malang, Mojokerto, dan Pasuruan dengan letak geografis puncak terdapat pada $7^{\circ} 40' - 7^{\circ} 53' \text{ LS } 112^{\circ} 31' 7'' - 112^{\circ} 42' 52''$ dan memiliki ketinggian masing-masing, G. Arjuno 3339m dpl., dan G. Welirang 3156m dpl. Kedua gunung api ini merupakan tipe gunung api strato tipe A. Batuan penyusun kompleks gunung tersebut ialah andesit-basaltik.

G. Arjuno-Welirang dihasilkan oleh tiga buah erupsi pusat (Gambar 1) dari G. Arjuno Tua, G. Arjuno Muda dan G. Welirang berupa aliran lava, aliran piroklastik, jatuhan piroklastik dan lahar yang sebarannya ke arah Utara dan Barat (Berita Berkala Vulkanologi, 1992).

Karakter Fisik Batuan

➤ Densitas Batuan Vulkanik

Untuk mengetahui densitas *bulk* ada beberapa faktor yang mempengaruhi nilainya di antaranya komposisi mineral (densitas mineral dan fraksi volume); porositas (pori dan *fracture*) dan porositas fluida pori batuan (Schoen, 2011). Untuk mendapatkan nilai densitas *bulk* batuan digunakan persamaan di bawah ini:

$$\rho = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot V_i \quad (1)$$

dimana:

ρ_i = densitas mineral-mineral, densitas fluida

V_i = fraksi volume

Densitas batuan beku sangat dipengaruhi oleh kandungan pH mineralnya (felsik - mafik). Rentang nilai densitas antar batuan beku cenderung kecil jika dibandingkan batuan sedimen (pengaruh *volume fracture*), namun nilainya lebih tinggi dibanding batuan sedimen.

➤ Kecepatan Vp Batuan Vulkanik

Velocity Vp ialah kecepatan gelombang kompresional yang mampu ditempuh suatu batuan. Kecepatan Vp memiliki hubungan persamaan yang berbanding lurus dengan densitas. Menurut Mavko, 2009 persamaan umum densitas-kecepatan batuan beku yang sering digunakan di antaranya

menggunakan persamaan Christensen & mooney (1995) dan Godfrey (1997):

$$\rho_{Christensen} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 0.541 + 0.36V_p \quad (2)$$

$$\rho_{Godfrey} \left(\frac{g}{cm^3} \right) = 2.4372 + 0.076V_p \quad (3)$$

dimana:

ρ = Densitas

V_p = Kecepatan Vp

➤ Atenuasi Gelombang Seismik Batuan Vulkanik

Atenuasi ialah gabungan antara pelepasan energi dan penyerapan frekuensi medium. Pengaruh atenuasi pada gelombang seismik yakni dengan penurunan amplitudo dan melebarnya sinyal (panjang gelombang). Koefisien atenuasi batuan beku lebih kecil dibanding batuan lainnya (*high attenuation*). Koefisien atenuasi dan faktor dispersi, dirumuskan dengan :

$$\alpha = \frac{1}{x_2 - x_1} \cdot 20 \cdot \log \left(\frac{A(x_1)}{A(x_2)} \right) \quad (4)$$

dimana:

α = koefisien atenuasi (dalam dB m^{-1})

$A(x_1)$ = amplitudo pada jarak x_1

$A(x_2)$ = amplitudo pada jarak x_2

x_1, x_2 = jarak (m)

➤ Resistivitas Batuan Vulkanik

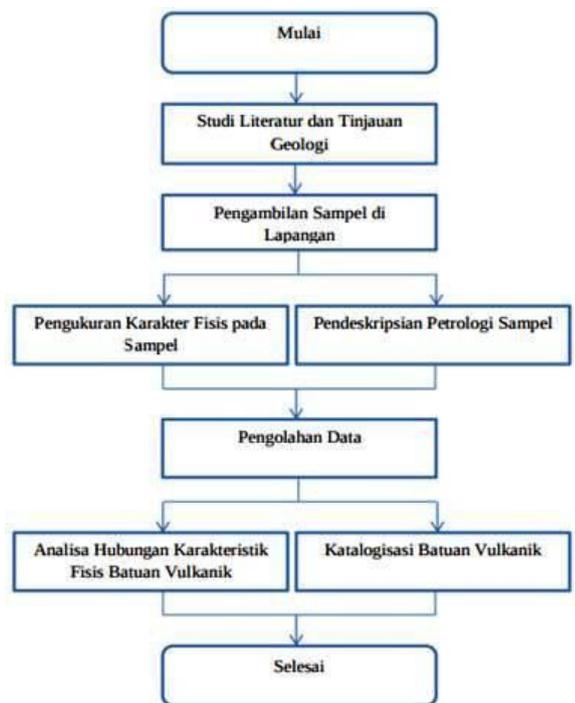
Aliran arus listrik di dalam batuan dipengaruhi oleh banyaknya elektron bebas. Faktor yang mempengaruhi nilai resistivitas batuan : kandungan air, tekstur batuan, jenis batuan, porositas dan permeabilitas, mineral lempung, salinitas (Schoen, 2011).

METODOLOGI

Tahapan Penelitian

Tahapan metodologi pada penelitian ini dimulai dengan studi literatur dan tinjauan geologi untuk mempelajari karakter fisik batuan vulkanik, parameteranya, serta kondisi geologi lapangan penelitian. Kemudian dilakukan pengambilan sampel di lapangan berupa blok batuan dan *hand sampling*, serta proses *coring*. Dari *coring* yang

didapat, dilakukan berbagai pengukuran parameter fisik batuan dan pendeskripsian petrologi, serta dianalisa hubungan antara parameter fisik dan pengaruh petrologi batuan terhadap parameter fisik (Gambar 2).



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

Data Penelitian

Penelitian diawali dengan pengambilan sampel di lapangan (Gambar 3) dan pembuatan *coring* batuan (Gambar 4) sehingga didapatkan 45 *coring* batuan, dari 16 sampel batuan, yang mewakili 6 satuan batuan. Enam satuan batuan tersebut, yakni Lava Anjasmara (Qla), Lava Tua Arjuno Welirang (Qltaw), Aliran Piroklastik Tua Arjuno Welirang (Qaptaw), Lava Erupsi Samping (Qes) Lava Welirang



Gambar 3. Singkapan Batuan Vulkanik Permukaan di Lapangan.

(Qlw I), Aliran Piroklastik Welirang (Qapw).



Gambar 4. Kumpulan *Coring* Sampel.

Metode Penelitian

Pengukuran densitas sampel *coring* batuan dilakukan dengan menggunakan prinsip Archimedes. Untuk melakukan pengukuran densitas dilakukan dengan mengambil data variabel ukur massa kering (Mk), berat kering (Wk), berat basah atau berat batuan saat batuan tersaturasi air dan dibuat dalam keadaan melayang (Wsat).

Pengukuran data resistivitas dilakukan dengan menggunakan alat ukur resistivity meter yang terhubung dengan elektroda pada batuan. Elektroda dibuat dari lempengan tembaga yang menyentuh langsung ke batuan, dimampatkan, dan dihubungkan ke resistivity meter (Abousrafa, 2013) (Gambar 5a). Variabel yang terukur pada resistivity meter ini berupa arus injeksi yang mengalir masuk ke batuan (Ampere) dan beda potensial di kedua ujung batuan (Volt).

Pengukuran parameter Vp dan atenuasi menggunakan perangkat *signal generator, transducer, receiver*, dan osiloskop (Gambar 5b). Kemudian variabel yang diukur pada pengambilan data kecepatan Vp ialah waktu tempuh gelombang longitudinal dan dimensi panjang batuan. Pengukuran atenuasi dapat dilakukan dengan mengukur *peak to peak amplitude* pada suatu batuan dengan dimensi panjang x dan membandingkannya dengan variasi dimensi panjang yang berbeda, namun jenis batuan yang sama.



(a)



(b)

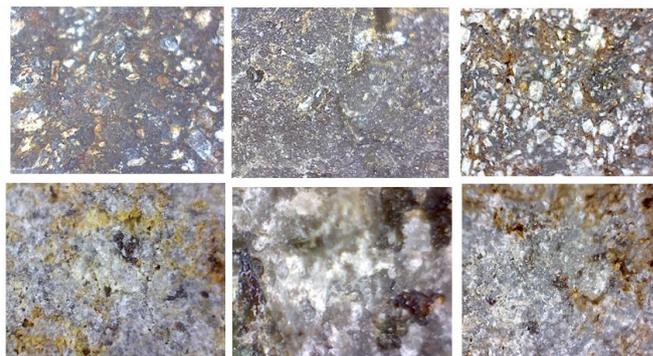
Gambar 5. (a) Metode Pengukuran Resistivitas; (b) Pengukuran Kecepatan Vp dan Atenuasi pada Batuan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Petrologi Batuan Vulkanik

Berdasarkan analisa petrologi batuan vulkanik Arjuno-Welirang memiliki tipe intermediate-mafik dengan nama batuan dominasi andesit-basaltik dan basalt. Disebut tipe intermediate hingga mafik, dikarenakan komposisi mineralnya sebagian besar sama seperti, kuarsa, plagioklas, piroksen, olivin dan amfibol. Yang membedakan antar satuan batuan satu dengan satuan batuan lainnya hanya struktur dan persentase komposisi dominan mineral (Gambar 6).

Kemudian berdasarkan diagram reaksi Bowen, dapat diketahui bahwa satuan batuan yang lebih mafik pada Q1a, dan Q1aw memiliki lingkungan magma dengan temperature yang tinggi pada saat pembentukan kristalnya. Seperti mineral olivine dan piroksen yang terbentuk pada lingkungan yang bertemperatur tinggi dibandingkan dengan mineral plagioklas yang terkristalisasi pada lingkungan bertemperatur rendah. Sedangkan untuk satuan batuan lainnya memiliki derajat kristalisasi dengan temperature menengah karena memiliki kristal-kristal yang intermediate.



Gambar 6. Hand Sampling Section pada 6 Satuan Batuan dengan Pembesaran 100x.

B. Analisa Hubungan Parameter Fisik Batuan Vulkanik

Berdasarkan perbedaan trend dan sebaran data pada *crossplot*, maka batuan vulkanik sampel dapat dikelompokkan 3 kategori produk batuan vulkanik, yakni produk kategori lava, piroklastik, dan lava vesikular.

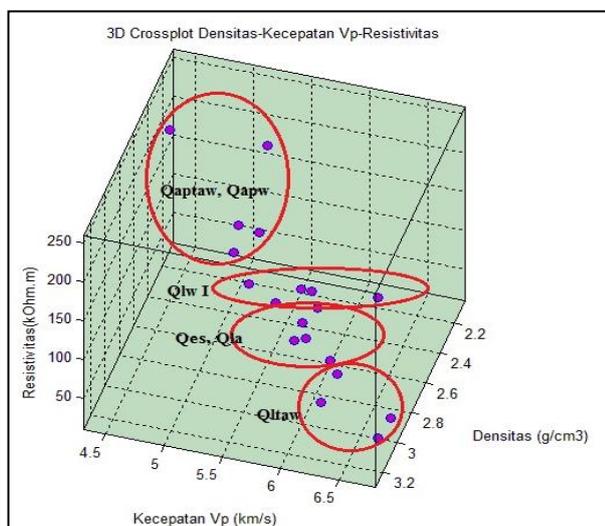
Berdasarkan hasil penelitian rentang parameter densitas batuan vulkanik Arjuno-Welirang berkisar antar 2400 – 2900 kg/m³, sedangkan rentang resistivitas bervariasi dari 30-185 kOhm.m, kemudian rentang nilai kecepatan Vp bervariasi dari 5100-6700 m/s, dengan koefisien atenuasinya memiliki rentang 0.05–0.23x10⁻³dB/m. Dimana persamaan hubungan antar parameternya di jelaskan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hubungan Parameter Fisik Batuan Vulkanik Kondisi Dry Rock.

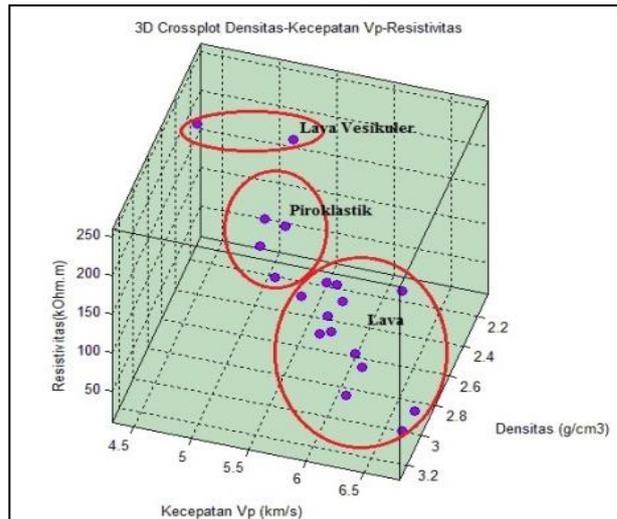
Hubungan Parameter	Persamaan	Keterangan
Densitas – Kecepatan Vp	$V_p = 2.7778\rho - 1.5$	Berbanding lurus
Resistivitas – Kecepatan Vp	$V_p = 13328\rho^{-0.075}$	Berbanding terbalik
Densitas – Resistivitas	$\rho_{resist} = 191.94x^3 - 1370.9x^2 + 3070.2x - 1988.1$ (x= densitas)	Berbanding terbalik
Densitas – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$	Berbanding terbalik
Kecepatan Vp – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.0266V_p^2 - 0.3093V_p + 1.0184$	Berbanding terbalik
Resistivitas – Koefisien Atenuasi	$\alpha = 0.2747\rho^2 - 1.475\rho + 2.0928$	Berbanding lurus

Untuk Gambar 7 analisa 3D *crossplot* parameter berdasarkan satuan batuan menunjukkan densitas-kecepatan Vp meningkat dari QlwI, Qes, Qla, Qltaw dengan rentang densitas 2.7 – 2.9 g/ cm³ dan rentang kecepatan Vp 5.7 – 6.7 km/s. Kemudian resistivitasnya menyebar dari 50-120 kOhm.m. Kemudian untuk satuan batuan Qaptaw dan Qapw, nilai densitas dan Vp memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan dengan nilai satuan batuan lava, yakni memiliki rentang 2.4 – 2.5 g/ cm³ untuk densitas dan 5.0 – 5.5 km/s untuk kecepatan Vp.

Selanjutnya untuk Gambar 8, 3D *Crossplot* dianalisa berdasarkan 3 kategori produk batuan vulkanik, produk lava, lava vesikuler, dan piroklastik. Untuk kategori produk vulkanik lava ditunjukkan dengan naiknya *trend* densitas seiring dengan naiknya kecepatan Vp, kemudian resistivitasnya menyebar dari 50-120 kOhm.m. *Trendline* kategori lava ini diinterpretasikan bahwa lava yang diindikasikan lebih mafik dan rapat porositasnya, sehingga menghasilkan nilai densitas dan kecepatan Vp yang tinggi. Kemudian untuk kategori piroklastik dan lava vesikuler, densitas dan kecepatan Vp cenderung lebih kecil dari kategori batuan lava, namun memiliki resistivitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lava.

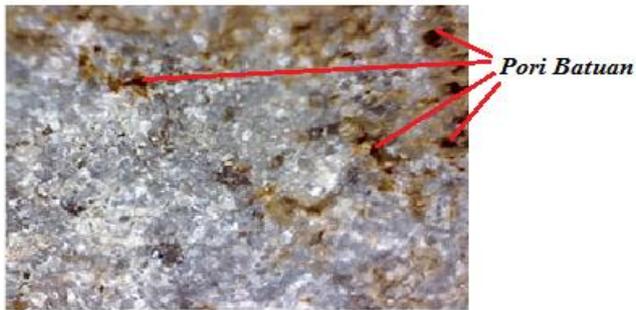


Gambar 7. 3D *Crossplot* Densitas (gram/cm³) -Kecepatan Vp (km/s) –Resistivitas (kOhm.m) Batuan Vulkanik Berdasarkan Satuan Batuan.



Gambar 8. 3D *Crossplot* Densitas (gram/cm³) -Kecepatan Vp (km/s) –Resistivitas (kOhm.m) Batuan Vulkanik Berdasarkan 3 Kategori Produk Batuan Vulkanik.

Sehingga dapat digaris bawahi bahwa pada batuan vulkanik dengan kondisi *dry rocks* jenis semua kategori, lava, lava vesikuler, maupun piroklastik, kecepatan Vp akan berbanding lurus dengan densitas, atau dapat didefinisikan kecepatan Vp akan naik seiring dengan naiknya densitas. Sedangkan resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan Vp, atau dapat didefinisikan resistivitas akan semakin naik nilainya, apabila nilai densitas-kecepatan Vp semakin turun nilainya (Tabel 1). Berbeda dengan persamaan Archie dimana resistivitas diukur pada batuan yang tersaturasi, pada kondisi *dry rock* atau pada saat batuan kering, resistivitas batuan yang memiliki pori seperti pada kasus piroklastik (Gambar 9) dan lava vesikuler, lebih akan memiliki nilai resistivitas yang tinggi akibat perantara antar kontak mineralnya tidak serapat dengan kontak mineral pada batuan vulkanik produk lava, sehingga batuan ini tidak konduktif dibandingkan kategori lava yang memiliki sedikit pori. Namun apabila batuan ini terisi fluida, maka batuan berporositas (piroklastik, lava vesikuler) ini akan jauh lebih konduktif dibandingkan kategori produk lava, karena fluida menjadi konduktor yang sangat baik pada tiap pori batuan ini.



Gambar 9. Lubang-lubang Gas Pori Batuan pada Satuan Batuan Piroklastik Qapw yang Terisi Tuff Halus Kecoklatan.

PENUTUP

Simpulan

Dari penelitian yang sudah dilakukan dapat diambil kesimpulan bahwa :

1. Rentang parameter batuan vulkanik *dry rocks* memiliki nilai densitas, kecepatan Vp, faktor atenuasi, dan resistivitas yang tinggi dibandingkan dengan batuan kelompok lain seperti batuan sedimen.
2. Dari hasil pengukuran dan analisa pada batuan vulkanik *dry rocks*, nilai densitas akan berbanding lurus dengan kecepatan Vp, dan nilai resistivitas akan berbanding terbalik dengan densitas-kecepatan Vp.
3. Dari 6 satuan batuan yang diambil yang telah dianalisa hubungan setiap parameternya, berdasarkan perbedaan trend dan sebaran data pada *crossplot*, maka batuan vulkanik sampel dapat dikelompokkan 3 kategori produk batuan vulkanik, yakni produk kategori lava, piroklastik, dan lava vesikular.
4. Tipe batuan vulkanik Gunung Arjuno-Welirang merupakan tipe intermediate hingga mafik, dengan dominasi batuan andesit-basaltik dan basalt.
5. Karena hasil parameter fisik (densitas, Vp, atenuasi, dan resistivitas) batuan vulkanik sangat dipengaruhi oleh faktor mineral, tekstur dan struktur batuanya, maka deskripsi petrologi dapat membantu proses interpretasi hasil pengukuran dan analisa setiap parameter.

Saran

Saran dari penelitian ini adalah :

1. Pada penelitian ini dari 1 satuan batuan telah diambil 3-5 sampel, dengan pengambilan data sampel yang lebih banyak 10-15 sampel batuan per satuan batuan dapat menunjang akurasi data. Karena penelitian ini fokus pada 6 satuan batuan yang dominan dari 15 satuan batuan lainnya, maka pengambilan sampel pada 9 satuan batuan lainnya perlu dilakukan untuk melengkapi data fisika batuan keseluruhan Komplek Gunung Arjuno-Welirang.
2. Karena pengukuran penelitian ini dilakukan pada kondisi *dry rocks* dengan batasan batuan permukaan, untuk penelitian lanjutan dapat disarankan untuk penambahan faktor variabel pengkondisian sampel seperti temperatur, tekanan, dan *fracture*.
3. *Database* yang terkumpul pada laporan penelitian tugas akhir ini dapat digunakan sebagai referensi parameter input *forward modeling* pada perencanaan desain akuisisi dan *processing* serta parameter evaluasi interpretasi pada inversi *modeling* berbagai metode geofisika, terutama metode seismik, *gravity*, *resistivity*, dan elektromagnetik untuk kondisi lingkungan vulkanik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abousrafa, E.M., Somerville, J.M., Hamilton, S.A. Holden, P.W., 2013. *A Laboratory Measurement Technique for Axial and Radial Resistivity at Ambient or Reservoir Stress State Conditions*. Institute of Petroleum Engineering, Heriot-Watt University, Edinburgh E, UK.
- Berita Berkala Vulkanologi*, 1992. Edisi Khusus, G. Arjuno-Welirang.
- Christensen, N.I. dan Mooney, W.D., 1995. *Seismic Velocity Structure and Composition of The Continental Crust: A Global View*. J. Geophys. Res., 100, 9761–9788.
- Mavko, G., Mukerji T., Dvorkin J., 2009. *The Rock Physics Handbook : Tools for Seismic Analysis of Porous Media*. Cambridge University Press, New York.

Schoen, J. H., 2011. *Handbook of Petroleum Exploration and Production*. Volume 8 : Physical Properties of Rocks, Oxford UK, Elsevier.

Sutikno, Bronto., 2002. *Volkanologi*. Staf Pengajar pada Jurusan Teknik Geologi Sekolah Tinggi Teknologi Nasional Yogyakarta.
