

## ESTIMASI KECEPATAN GELOMBANG KOMPRESIONAL BATUAN VULKANIK KOMPLEKS GUNUNGAPI ARJUNO WELIRANG MENGGUNAKAN VOIGT-REUSS BOUNDS

Karim Rahman Hartono, Widya Utama, dan Wien Lestari

Departemen Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Lingkungan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

e-mail: [karimrhartono@gmail.com](mailto:karimrhartono@gmail.com)

**Abstrak.** Kecepatan gelombang kompresional batuan dapat diketahui melalui pengukuran secara langsung atau melalui prediksi secara matematis menggunakan parameter lain. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh kecepatan gelombang kompresional teoritik  $V_{hitung}$  pada batuan vulkanik berdasarkan komposisi mineralogi, memperoleh nilai kecepatan gelombang kompresional hasil pengukuran  $V_{ukur}$  pada batuan vulkanik, serta membandingkan nilai  $V_{hitung}$  dengan  $V_{ukur}$ . Penelitian ini dilakukan terhadap 20 core batuan vulkanik kompleks gunungapi Arjuno-Welirang yang memiliki struktur masif dengan komposisi basaltik hingga andesitik. Seluruh core dikelompokkan berdasarkan kesamaan petrologi menjadi enam kelompok sampel. Sebuah sayatan tipis diekstrak dari setiap kelompok sampel untuk keperluan kalkulasi  $V_{hitung}$ .  $V_{hitung}$  diperoleh menggunakan pendekatan Voigt-Reuss Bounds dengan parameter input modulus elastik ( $K; \mu$ ), densitas, dan persentase mineral konstituen. Komposisi mineral pada sampel diidentifikasi melalui analisis sayatan tipis menggunakan mikroskop polarisasi dan perangkat lunak pengolahan citra Jmicrovision.  $V_{ukur}$  diperoleh dengan uji kecepatan pulsa ultrasonik. Rentang nilai  $V_{hitung}$  yang diperoleh adalah  $6082.37 - 6417.21 \text{ ms}^{-1}$ . Rentang nilai  $V_{ukur}$  yang diperoleh adalah  $3708.14 - 4950.45 \text{ ms}^{-1}$ . Nilai  $V_{hitung}$  dan  $V_{ukur}$  yang tidak proporsional disebabkan oleh diterapkannya berbagai asumsi yang muncul pada proses identifikasi mineral kedalam kalkulasi  $V_{hitung}$ . Asumsi-asumsi tersebut menyebabkan nilai  $V_{hitung}$  yang diperoleh tidak mendekati kondisi ideal sebagaimana pada  $V_{ukur}$ .

**Kata Kunci:** batuan vulkanik; kecepatan gelombang kompresional; sayatan tipis; voigt-reuss bounds

**Abstract.** Compressional wave velocity in rocks can be obtained by direct measurement or by mathematical prediction using input parameters. This research aims to obtain theoretical compressional wave velocity  $V_{hitung}$  of volcanic rocks based on mineralogical composition, to obtain the measured compressional wave velocity  $V_{ukur}$  of volcanic rocks, and to compare both measured and calculated velocities. This research uses 20 volcanic rock cores from Arjuno-Welirang complex which are grouped based on petrological similarity into six sample groups. These cores have massive structure and basaltic-andesitic composition. A thin section is extracted from every sample group for the calculation of  $V_{hitung}$ .  $V_{hitung}$  is calculated by using Voigt-Reuss Bounds with input parameters of elastic moduli ( $K; \mu$ ), density, and percentage of constituent minerals. Mineralogical composition of the samples is identified using thin section analysis.  $V_h$  is measured by using ultrasonic pulse velocity test. The obtained values of  $V_{hitung}$  are spread between  $6082.37 - 6417.21 \text{ ms}^{-1}$  while  $V_{ukur}$ 's range is between  $3708.14 - 4950.45 \text{ ms}^{-1}$ . Unproportionality between  $V_{hitung}$  and  $V_{ukur}$  is thought to be the result of utilization of assumptions in the calculation of  $V_{hitung}$ . These assumptions appear in the stage of mineral identification. This makes the obtained  $V_{hitung}$  do not meet the ideal condition of  $V_{ukur}$ .

**Keywords:** compressional wave velocity; thin section; voigt-reuss bounds; volcanic rock

### PENDAHULUAN

Estimasi nilai parameter fisik polikristal berdasarkan parameter fisik individu konstituen telah menjadi topik studi yang menarik. Pendekatan ini umumnya hanya berlaku apabila parameter bulk dari konstituen dapat mendominasi parameter fisik keseluruhan polikristal dan apabila

efek-efek antar batas butir dapat diabaikan. Beberapa parameter fisik batuan yang dapat diestimasi meliputi konduktivitas termal, ekspansi termal, diamagnetisme, elastisitas dan kecepatan gelombang seismik. Pendekatan ini dapat dijadikan acuan nilai parameter fisik teoritik pada batuan berdasarkan mineraloginya. Batuan vulkanik adalah

salah satu objek polikristal yang mana estimasi parameter fisik ini dapat diterapkan. Hal ini disebabkan oleh proses pembentukan batuan itu sendiri yang melibatkan kristalisasi mineral dari pendinginan magma. (Mainprice dan Humbert, 1994)

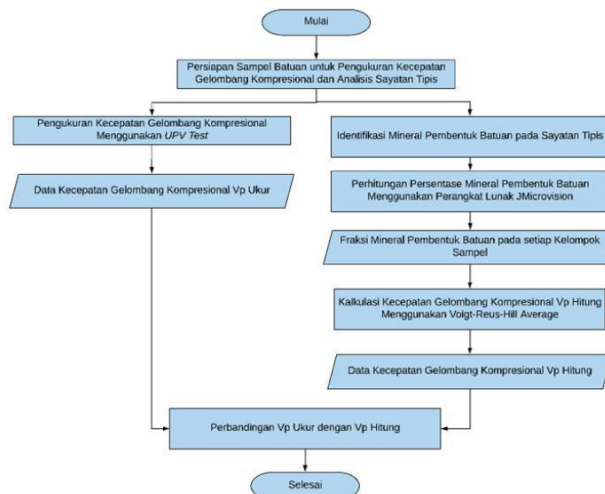
Arjuno-Welirang adalah kompleks gunungapi yang terletak di barisan gunungapi kuartar yang terletak di Pulau Jawa. Batuan yang menyusun kompleks ini dihasilkan oleh tiga buah erupsi pusat dari G. Arjuno Tua, G. Arjuno Muda, dan G. Welirang berupa aliran lava, aliran piroklastik, jatuhnya piroklastik dan lahar (ESDM, 2014). Lava yang dihasilkan oleh G. Arjuno terdiri atas basalt olivin dan andesit piroksen. Pada G. Welirang, lava yang terbentuk atas andesit augit *hypersthene*. Komposisi batuan kompleks gunungapi Arjuno-Welirang yang bersifat basaltik hingga andesitik inilah yang dijadikan sebagai objek penelitian.

Penelitian ini bermaksud untuk membandingkan kecepatan gelombang kompresional batuan vulkanik hasil perhitungan dengan hasil pengukuran. Kecepatan hitung dari batuan sampel diprediksi menggunakan pendekatan Voigt-Reuss *Bounds* berdasarkan persentase dan modulus elastik mineral konstituen. Informasi modulus elastik mineral individu didapatkan dari literatur. Komposisi mineral diketahui melalui analisis sayatan tipis. Metode pengukuran kecepatan gelombang kompresional yang digunakan adalah uji kecepatan pulsa ultrasonik. Hasil penelitian ini diharapkan dapat dijadikan referensi dalam kajian kecepatan gelombang elastik terutama yang berkaitan dengan pengukuran kecepatan gelombang elastik pada batuan vulkanik.

**METODOLOGI**

Metode yang digunakan dalam penelitian ini didasarkan atas referensi dari Christensen (1965). Penelitian dilakukan dengan membandingkan kecepatan gelombang kompresional teoritik  $V_{hitung}$  dengan kecepatan gelombang kompresional hasil pengukuran  $V_{ukur}$  pada sampel batuan vulkanik.  $V_{hitung}$  diperoleh dari modulus elastik mineral individu berdasarkan referensi oleh Schoen (2011) yang kemudian dibobotkan berdasarkan persentasenya pada setiap sampel menggunakan

Voigt-Reuss *Bounds*. Komposisi mineral tiap sampel dihitung menggunakan pendekatan semi-kuantitatif pada fotomikrograf dengan perangkat lunak pengolahan citra Jmicrovision (Aziz, 2013).



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Pengukuran  $V_{ukur}$  dilakukan menggunakan uji kecepatan pulsa ultrasonik (Birch, 1960). Sampel batuan adalah batuan vulkanik basaltik-andesitik dari kompleks gunungapi Arjuno-Welirang yang digunakan sebelumnya pada penelitian “Karakterisasi Fisis Hubungan Densitas, Resistivitas, Kecepatan ( $V_p$ ), Dan Atenuasi Pada Batuan Vulkanik (Studi Kasus Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur)” (Fajrina, 2016). Tahap-tahap ini ditampilkan sebagai diagram alir pada Gambar 1.



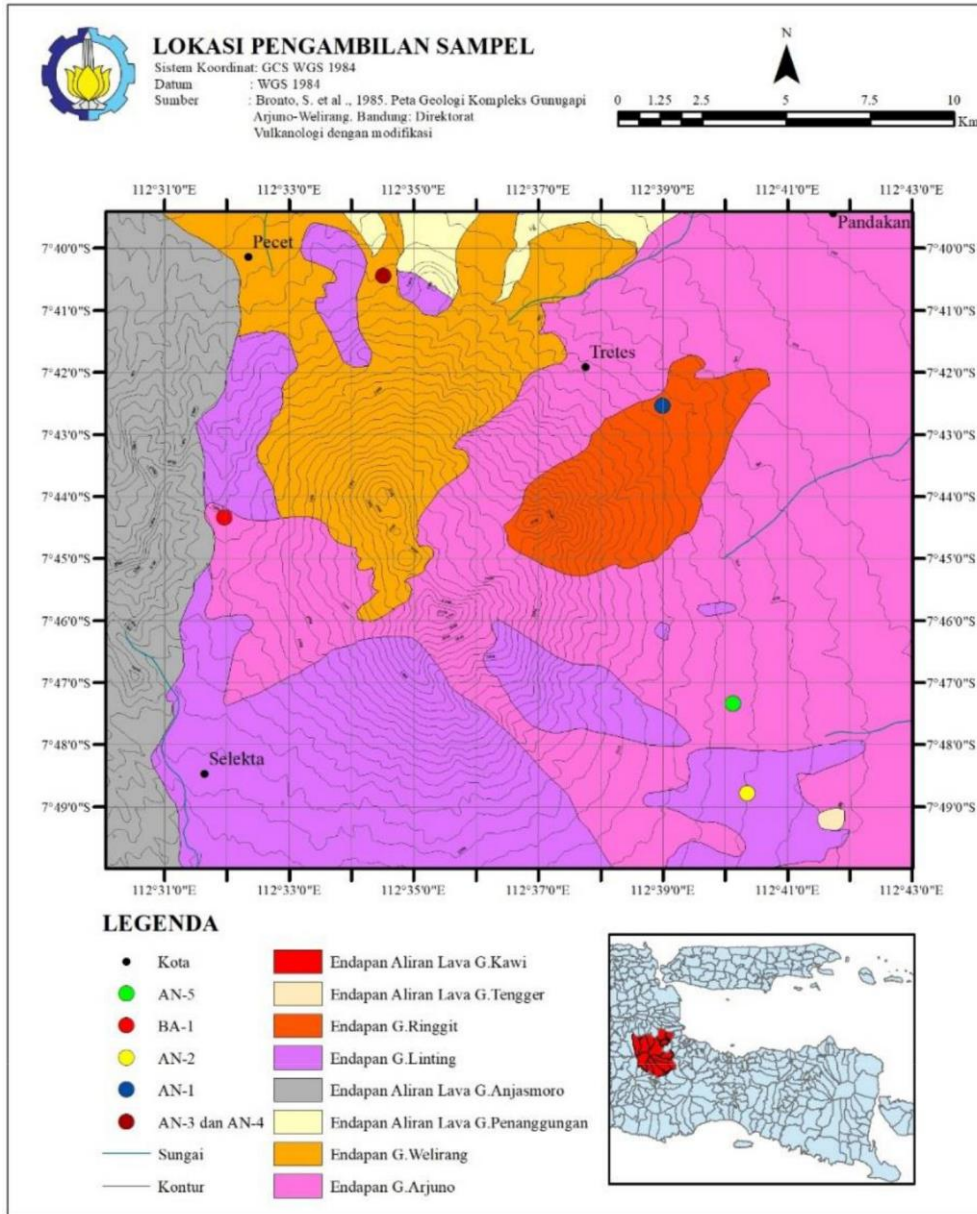
Gambar 2. Sampel core penelitian

Dua puluh sampel batuan vulkanik Kompleks Gunungapi Arjuno-Welirang yang berbentuk *core* digunakan untuk memperoleh  $V_{ukur}$ . Seluruh sampel memiliki komposisi basaltik hingga andesitik. Mengacu pada peta geologi Direktorat Vulkanologi (Bronto dkk, 1985), sebelumnya sampel-sampel ini

diambil dalam bentuk bongkah pada lima titik berbeda yang terletak pada wilayah satuan batuan:

- 1) Endapan G.Arjuno (Aliran Lava 2) – Kode core : AL
- 2) Endapan G.Arjuno (Aliran Lava 4) - Kode core :  
QLA

- 3) Endapan G.Welirang - Kode core : QAPWI
- 4) Endapan G.Linting - Kode core : LJP
- 5) Endapan G.Ringgit - Kode core : LTAW



Gambar 3. Lokasi pengambilan sampel batuan penelitian

Seluruh core kemudian dikelompokkan berdasarkan kesamaan petrologi menjadi enam kelompok sampel. Setiap kelompok sampel diberikan kode berdasarkan nama batuan (BA = basalt, AN = andesit). Sampel core yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk keperluan kalkulasi  $V_{hitung}$ , sebuah sayatan tipis akan dibuat dari setiap kelompok sampel. Total sayatan tipis yang dibuat adalah sebanyak 6 buah dengan dimensi 2 cm x 2 cm x 0.03 mm.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah dilakukan deskripsi petrologi pada seluruh kelompok sampel sebagai pendahuluan analisis sayatan tipis. Tabel 1 menunjukkan deskripsi petrologi singkat yang mencakup warna masadasar, struktur, tekstur makroskopis, mineral tampak, dan nama batuan. Deskripsi petrologi diterapkan atas referensi.

Analisis sayatan tipis dilakukan dengan menggunakan mikroskop polarisasi. Peta geologi Kompleks Gunungapi Arjuno-Welirang dan

informasi petrologi di Tabel 1 dipakai sebagai acuan identifikasi mineral. Mineral pembentuk batuan yang teridentifikasi pada seluruh kelompok sampel ditampilkan pada Tabel 2.

Dari keenam kelompok sampel, hanya plagioklas pada BA-1 yang dapat diidentifikasi jenisnya. Untuk kelompok sampel lainnya, jenis plagioklas sulit untuk diketahui akibat kurangnya jumlah fenokris yang menampilkan properti optik kembaran pada sayatan tipis yang digunakan.

Maka, metode Michel-Levy – yang membutuhkan minimal 15 butir plagioklas dengan kembaran tidak dapat diterapkan sepenuhnya dalam mendiferensiasi plagioklas. Mineral piroksen pada seluruh kelompok sampel didominasi oleh klinopiroksen (augit) dan sedikit sekali ortopiroksen. Mineral opak tidak dapat diidentifikasi karena teknik mikroskopi refleksi tidak diterapkan.

Tabel 1. Deskripsi petrologi singkat *core* batuan sampel

No	Kode Core	Kelompok .Sampel	Deskripsi Petrologi
1	QLA	BA-1	Warna masadasar abu-abu kehitaman, Struktur massif, Tekstur porifiritik halus, Fenokris tampak plagioklas, Tipe batuan alisan lava, Nama batuan basalt
2	QLA3		
3	LTAW3 (PJG)	AN-1	Warna masadasar abu-abu kehitaman, struktur massif, tekstur afanitik ke porifiritik halus, fenokris tampak plagioklas, tipe batuan aliran lava, nama batuan andesit
4	LTAW3		
5	LTAW5		
6	LJP2 A	AN-2	Warna masadasar abu-abu tua, struktur massif, tekstur porifiritik halus, mineral tampak plagioklas dan piroksen berukuran <2 mm, tipe batuan aliran lava, nama batuan andesit
7	LJP2 A (PJG)		
8	LJP2 B		
9	LJP2 C		
10	LJP2 D		
11	QAPWI E	AN-3	Warna masadasar abu-abu tua, struktur massif, tesktur porifiritik halus, fenokris tampak plagioklas dengan ukuran butir <3 mm, tipe batuan aliran lava, nama batuan andesit
12	QAPWI D		
13	QAPW B (PDK)	AN-4	Warna masadasar abu-abu, struktur massif, tekstur porifiritik halus, fenokris plagioklas dengan ukuran butir <3 mm dan sedikit piroksen, tipe batuan aliran lava, nama batuan andesit
14	QAPWI B (PJG)		
15	QAPWI B		
16	AL2 B	AN-5	Warna masadasar abu-abu muda, struktur massif, tekstur porifiritik halus, fenokris tampak plagioklas dengan ukuran butir <2 mm, dan sedikit pirosen, tipe batuan aliran lava, nama batuan andesit
17	AL2 C		
18	AL2 A		
19	AL2 C (PJG)		
20	AL2 A (PJG)		

Tabel 2. Mineral pembentuk batuan pada setiap kelompok sampel

No	Kelompok sampel	Mineral pembentuk batuan			
1	BA-1	Plagioklas-Andesin	4	AN-3	Piroksen
		Piroksen			Olivin
		K-Feldspar			Oksida besi
		Mineral Opak			Mineral opak
		Oksida besi			Mineral opak
2	AN-1	Mineral lempung	5	AN-4	mineral lempung
		Piroksen			Plagioklas
		Olivin			Piroksen
		Mineral opak			Olivin
3	AN-2	Mineral lempung	6	AN-5	Mineral opak
		Plagioklas			Plagioklas

Piroksen  
K-Feldspar  
Mineral opak

Fotomikrograf sayatan tipis dengan perbesaran 40x pada kondisi cahaya terpolarisasi-bidang dan terpolarisasi-silang diambil untuk perhitungan persentase mineral setiap kelompok sampel. Informasi mineralogi dari analisis sayatan tipis dijadikan referensi untuk membedakan satu jenis mineral dengan mineral yang lainnya. Contoh tampilan antarmuka perangkat lunak Jmicrovision saat perhitungan persentase mineral dapat dilihat pada gambar 4. Gambar 5 menunjukkan persentase mineral hasil perhitungan. Pendekatan semi-kuantitatif diterapkan dalam Perhitungan persentase akibat keterbatasan kualitas resolusi fotomikrograf. Salah satu implementasinya adalah dalam memperkirakan persentase mineral halus yang membentuk masadasar. Karena keterbatasan ini mempersulit diferensiasi antara mineral-mineral tersebut, perkiraan persentase masadasar dilakukan paling terakhir setelah seluruh mineral fenokris dan mineral opak telah diketahui persentasenya. Sampai titik ini, persentase yang tersisa dapat dipastikan sebagai masadasar. Perbandingan jumlah antara mineral-mineral halus masadasar diperkirakan secara kualitatif dari pengamatan mikroskop dengan perbesaran yang lebih tinggi. Kemudian, nilai perbandingan kualitatif ini diterapkan pada persentase masadasar yang telah diketahui untuk menghitung persentase mineral-mineral halus yang membentuknya.

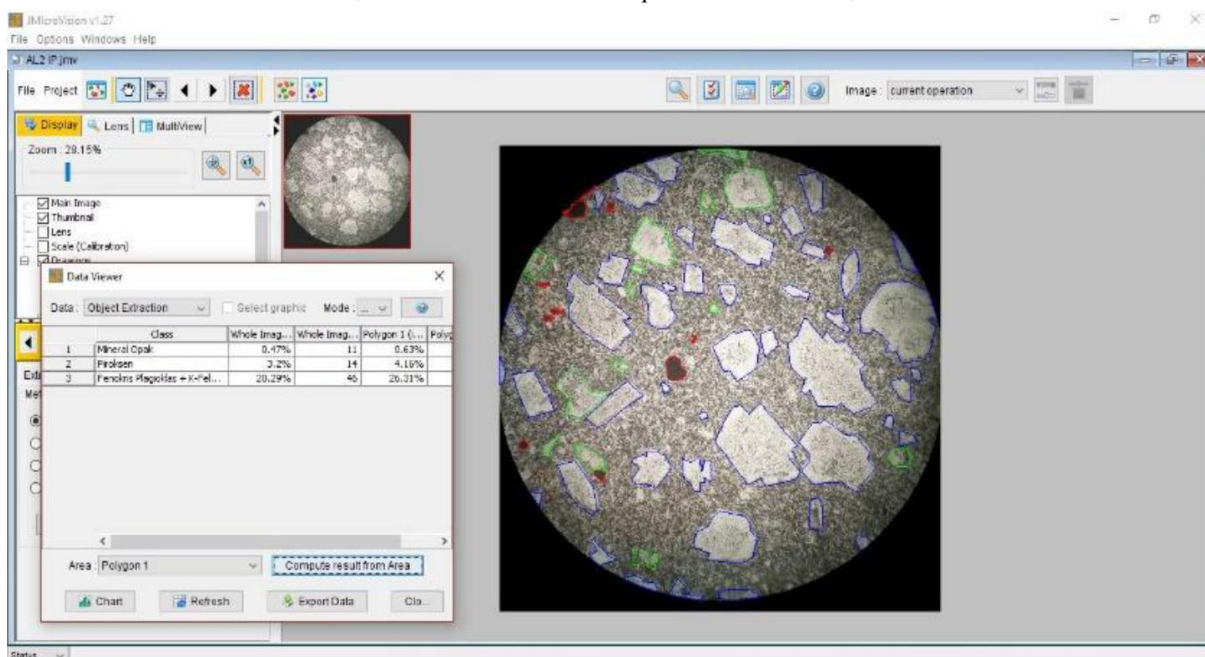
Kecepatan gelombang kompresional  $V_{hitung}$  dikalkulasi menggunakan pendekatan Voigt-Reuss Bounds. Nilai  $V_{hitung}$  yang ditampilkan adalah rerata Voigt-Reuss-Hill ( $V_{RH}$ ). Berdasarkan Christensen (2012), rerata  $V_{RH}$  dapat digunakan sebagai representasi dari batas atas kecepatan Voigt  $V_V$  dan batas bawah kecepatan Reuss  $V_R$  yang diperoleh sebelumnya sebagai fungsi modulus elastik ( $K$ ;  $\mu$ ), densitas, dan persentase mineral konstituen. Pendekatan ini digunakan karena persamaan batas Voigt dan Reuss diturunkan dengan asumsi seluruh mineral konstituen dalam keadaan isotropik dan tersebar seragam pada tubuh batuan. Asumsi ini cocok dengan kondisi mineral pada batuan vulkanik yang memiliki orientasi dan persebaran yang acak. (Kopylova dkk, 2004). Dasar-dasar matematis dari persamaan Voigt-Reuss Bounds yang digunakan pada

penelitian ini didasarkan pada penelitian oleh Watt (2010).

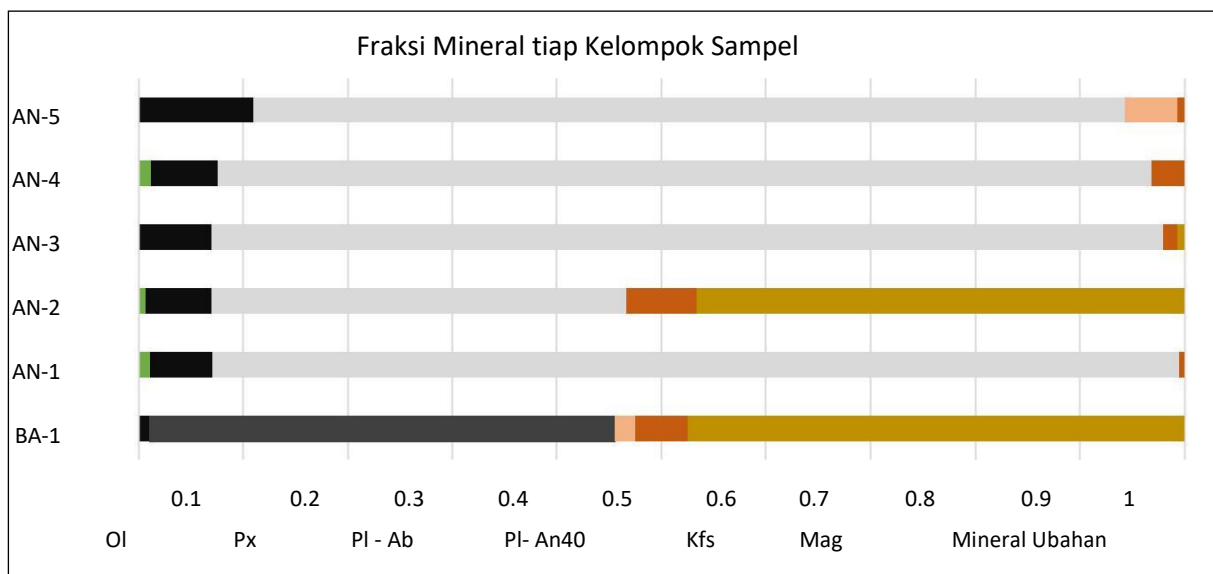
Tabel 3. Modulus elastik kristal mineral individu

Nama mineral	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	K (Gpa)	$\mu$ (Gpa)	Ref
<b>Olivin</b>	3320	130	80	S
<b>Piroksen - Augit</b>	3260	94.1	57	S
<b>Plagioklas - Albit</b>	2630	55	29.5	S
<b>Plagioklas - Andesin</b>	2683	75.8	38.4	MB
<b>K-Feldspar</b>	2620	46.8	27.3	S
<b>Hematit</b>	5180	97.65	91.9	K
<b>Magnetit</b>	5180	160.3	91.9	K
<b>Illite</b>	2702	62.21	25.7	K

Keterangan : pada kolom referensi , S = (Schoen, 2011); MB = Michael Brown ; K = Kataha.



Gambar 3 Tampilan antarmuka dari perangkat lunak Jmicrovision pada perhitungan AN-5



Gambar 4. Fraksi mineral tiap kelompok sampel

Persentase mineral pada Gambar 5 dan modulus elastik mineral individu pada Tabel 3 digunakan sebagai input perhitungan  $V_{hitung}$ . Terdapat asumsi-asumsi yang diterapkan dalam kalkulasi  $V_{hitung}$  akibat keterbatasan dari informasi yang diperoleh pada analisis sayatan tipis, yaitu:

1. Seluruh persentase piroksen diasumsikan seluruhnya sebagai augit karena sebagian besar piroksen yang tampak pada sayatan tipis memiliki warna interferensi orde II tengah.
2. Mineral opak diasumsikan seluruhnya sebagai magnetit
3. Selain kelompok sampel BA-1, plagioklas diasumsikan dengan jenis albit karena jenis plagioklas ini umum ditemukan pada andesit.

Mineral ubahan diasumsikan seluruhnya sebagai *illite*. Karena mineral ubahan yang dapat diidentifikasi hanya serisit dan sedikit sekali klorit. Serisit adalah mineral grup muskovit yang memiliki karakteristik yang serupa dengan *illite*.

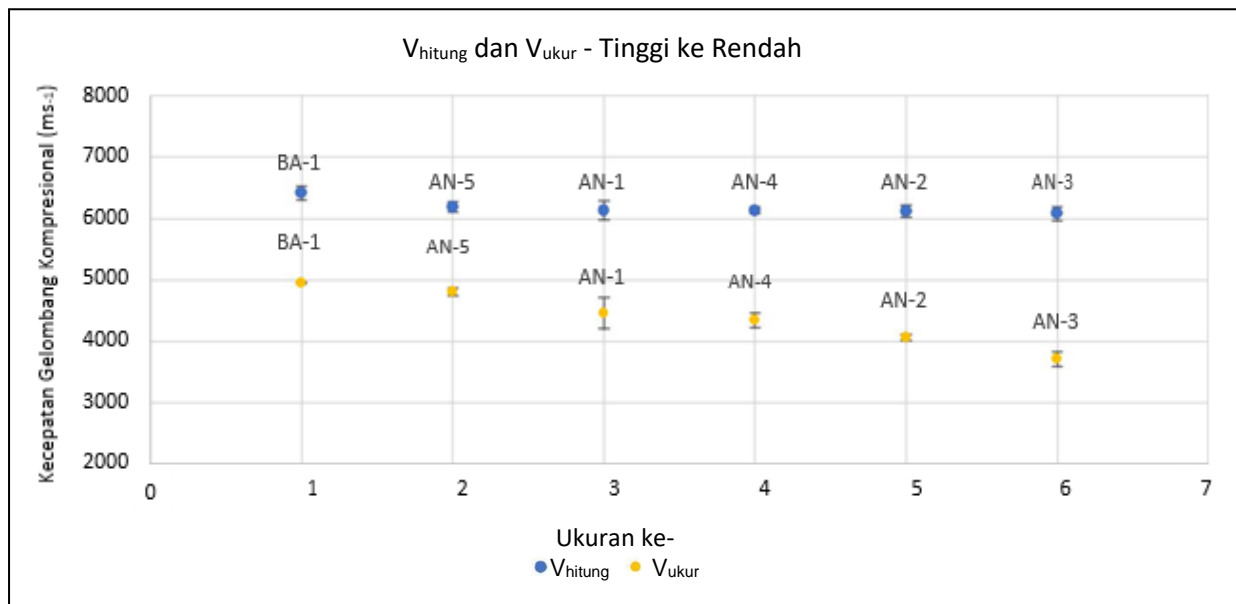
Kecepatan gelombang kompresional Voigt  $V_v$ , Reuss  $V_R$ , dan rerata Voigt-Reuss-Hill  $V_{hitung}$  yang didapatkan ditampilkan pada Tabel 4 dan dibandingkan dengan  $V_{ukur}$  pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6, nilai  $V_{hitung}$  tidak proporsional terhadap nilai  $V_{ukur}$ . Hal ini dibuktikan dengan posisi dataset  $V_{ukur}$  yang berada dibawah dataset  $V_{hitung}$ .  $V_{hitung}$  lebih besar dari  $V_{ukur}$  dengan selisih yang terpaut  $1300 \text{ ms}^{-1}$  sampai dengan  $2374 \text{ ms}^{-1}$ . Gambar tersebut juga mengurutkan kelompok

sampel berdasarkan nilai  $V_{ukur}$  dan  $V_{hitung}$  dari tinggi ke rendah. Pada  $V_{hitung}$  menunjukkan urutan BA-1, AN-5, AN-1, AN-2, AN-4, AN-3. Di sisi lain,  $V_{ukur}$  menunjukkan urutan BA-1, AN-5, AN-1, AN-4, AN-2, AN-3. Pada kedua urutan ini, terdapat kecenderungan adanya kesamaan kecuali pada posisi AN-2 dan AN-4 yang urutannya saling berkebalikan satu sama lain.

Ketidakcocokan antara  $V_{hitung}$  dan  $V_{ukur}$  diinterpretasikan sebagai akibat dari asumsi-asumsi yang digunakan pada estimasi  $V_{hitung}$  menggunakan Voigt-Reuss *Bounds*. Asumsi yang muncul pada tahap identifikasi mineral pembentuk batuan ini membuat kondisi batuan pada kalkulasi  $V_{hitung}$  semakin jauh dengan kondisi batuan ideal  $V_{ukur}$ .

Tabel 4.  $V_v$ ,  $V_r$ ,  $V_{hitung}$  setiap kelompok sampel

Nama mineral	$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	K (Gpa)	$\mu$ (Gpa)	Ref
Olivin	3320	130	80	S
Piroksen - Augit	3260	94.1	57	S
Plagioklas - Albit	2630	55	29.5	S
Plagioklas - Andesin	2683	75.8	38.4	MB
K-Feldspar	2620	46.8	27.3	S
Hematit	5180	97.65	91.9	K
Magnetit	5180	160.3	91.9	K
Illite	2702	62.21	25.7	K



Gambar 5. Kelompok sampel diurutkan berdasarkan nilai  $V_{ukur}$  dan  $V_{hitung}$  yang paling tinggi. *Error bar* pada dataset  $V_{hitung}$  menunjukkan  $V_v$  dan  $V_r$ , pada dataset  $V_{ukur}$  menunjukkan deviasi standar.

## PENUTUP

### Simpulan dan Saran

Kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini antara lain nilai  $V_{hitung}$  dan  $V_{ukur}$  yang tidak proporsional disebabkan oleh diterapkannya berbagai asumsi yang muncul pada proses identifikasi mineral kedalam kalkulasi  $V_{hitung}$ . Asumsi-asumsi tersebut menyebabkan nilai  $V_{hitung}$  yang diperoleh tidak mendekati kondisi ideal sebagaimana pada  $V_{ukur}$ .

Untuk mendapatkan nilai  $V_{hitung}$  dengan pendekatan Voigt-Reuss *Bounds* yang lebih akurat, jenis dari tiap-tiap mineral pembentuk batuan harus diketahui. Hal ini dapat dilakukan dengan

memanfaatkan lebih dari satu sayatan tipis pada setiap kelompok sampel, menerapkan analisis sayatan tipis lanjutan (contoh: Mikroskopi Refleksi), serta penggunaan mikroskop yang lebih mutakhir khususnya dalam pengambilan fotomikrograf.

## DAFTAR PUSTAKA

Abd. Aziz, I., (2013). Comparing Point Counting & Image Analysis in Sandstone North Carnarvon Basin, Australia, in: IPCBEE. Presented at the 2013 2nd International Conference on Geological and Environmental Sciences, IACSIT Press,

- Singapore, pp. 20–24. <https://doi.org/10.7763/IPCBE.2013.V52.5>
- Birch, F., (1960). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 1. - Birch - 1960 - Journal of Geophysical Research - Wiley Online Library. Journal of Geophysical Research 65, 1083–1102.
- Christensen, N.I., (2012). Shear wave velocities in metamorphic rocks at pressures to 10 kilobars. Journal of Geophysical Research 71, 3549–3556. <https://doi.org/10.1029/JZ071i014p03549>
- Christensen, N.I., (1965). Compressional wave velocities in metamorphic rocks at pressures to 10 kilobars. Journal of Geophysical Research 70, 6147–6164. <https://doi.org/10.1029/JZ070i024p06147>
- ESDM, (2014). G. Arjuno-welirang - Geologi [WWW.Document]. URL <http://www.vsi.esdm.go.id/index.php/gunungapi/data-dasar-gunungapi/544-g-arjuno-welirang?start=2> (accessed 6.19.18).
- Fajrina, Y.N. (2016), "Karakterisasi Parameter Fisik Batuan Vulkanik Gunung Arjuno-Welirang, Jawa Timur", Jurnal Geosaintek, Vol.2, No.2, hal. 91–98. <http://doi.org/10.12962/j25023659.v2i2.1922>
- Kopylova, M.G., Lo, J., Christensen, N.I., (2004). Petrological Constraints on Seismic Properties of the Slave Upper Mantle (Northern Canada). Elsevier.
- Mainprice, D., Humbert, M., (1994). Methods of Calculating Petrophysical Properties from Lattice Preferred Orientation Data. Kluwer Academic Publishers, Surveys in Geophysics 15.
- S. Bronto, A. Zaennudin, R.D. Erfan, (1985). Peta Geologi Gunungapi Arjuno - Welirang, Jawa Timur.
- Schoen, J.H., (2011). Handbook of Petroleum Exploration and Production Volume 8 : Physical Properties of Rocks. Elsevier B.V., Oxford.
-