

Penentuan Struktur Internal Gunungapi Semeru Berdasarkan Citra Atenuasi Seismik

Hena Dian Ayu ^{1)*}, Adi Susilo ²⁾, Sukir Maryanto ²⁾, Muhamad Hendrasto ³⁾

¹⁾ Program Studi Magister Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

²⁾ Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

³⁾ Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Bandung

Diterima 30 Agustus 2013, direvisi 27 September 2013

ABSTRAK

Karakteristik medium dapat digambarkan oleh parameter fisis seperti kecepatan dan atenuasi seismik. Amplitudo, jarak antara stasiun seismik dengan sumber gempa, frekuensi dan koefisien atenuasi diperlukan untuk menentukan nilai *Q-factor* atau atenuasi dalam usaha pencitraan struktur internal. Analisa data dilakukan terhadap data rekaman gelombang seismik di sekitar Gunungapi Semeru yang direkam pada tahun 2009 yang terdiri dari 54 seismogram gempa yaitu 27 gempa vulkanik tipe A dan 27 gempa letusan. Dari analisa tersebut didapatkan nilai *Q-factor* berdasarkan gempa vulkanik tipe A adalah berkisar antara 4 sampai 392 atau secara rata-rata 78,87 sedangkan berdasarkan gempa letusan berkisar antara 4 sampai 288 dan jika dirata-rata nilainya adalah 51,39. Sedangkan hasil citra atenuasi terlihat bahwa atenuasi di daerah kawah dan zona yang berkelurusan di bawah kawah aktif Jongring Seloko memiliki nilai atenuasi yang tinggi atau nilai *Q-factor* yang rendah. Dan zona tersebut selanjutnya diinterpretasikan sebagai zona keberadaan materi panas yang kemungkinan berasosiasi dengan dapur magma yang berada pada kedalaman 1-1,8 km dari puncak Gunungapi Semeru. Zona lemah ini berarah ke Barat-Timur-Tenggara dan Selatan. Sedangkan Struktur internal Gunungapi Semeru didominasi oleh batuan pasir, batuan sedimen, dan batuan dengan rongga berisi gas walaupun di beberapa struktur lapisan yang dalam memiliki struktur internal berupa batuan metamorf dan batuan beku.

Kata kunci : Gunungapi Semeru, atenuasi, *Q-factor* dan struktur internal.

ABSTRACT

Characteristic of medium could be defined by physical parameters such as seismic velocity and attenuation. Amplitude, hypocentral distance, frequency and attenuation coefficient is required to determine the *Q-factor* value or attenuation in effort on imaging the internal structure. In this study, we used volcanic earthquakes data of Semeru Volcano recorded 2009 that consist 54 seismogram (24 A-type volcanic earthquakes and 24 explosion volcanic earthquakes). The *Q-factor* value of A-type volcanic earthquakes is 4 - 392 or about 78,87 and the *Q-factor* value of explosion volcanic earthquakes is 4 - 288 or about 51,39. In term of the image quality, it can be seen that the attenuation on Jongring Seloko active caldera and under Jongring Seloko have low attenuation value or high *Q-factor* value that was called the zone beneath. The zone beneath is interpreted to associated with hot material that may indicate the magma chamber that concentrated in the depth interval of 1-1,8 km from the top of Semeru Volcano. The zone beneath have structural trends on West-East-Southeastern-South sector out the volcano. The internal structure of Semeru Volcano is predominance of sedimentary rocks, sandstone and rocks with gas in pore space. Although in some deep layer have internal structure as metamorphic rocks and igneous rock.

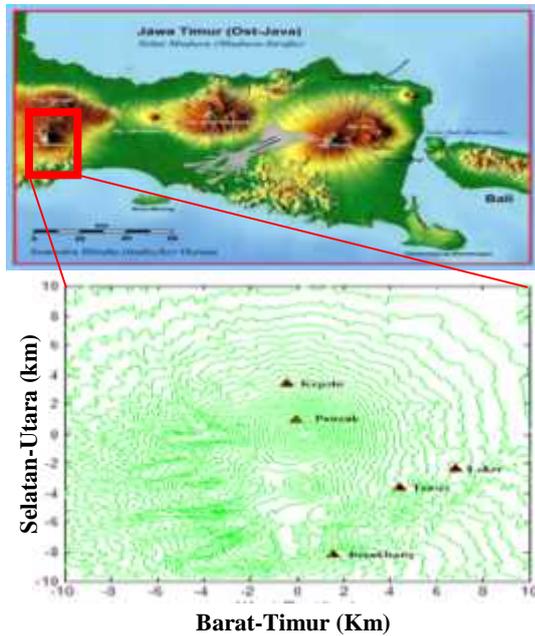
Keywords: Semeru volcano, attenuation, *Q-factor* and internal structure.

*Corresponding author :

E-mail: henadian@gmail.com

PENDAHULUAN

Gunung Semeru adalah gunung berapi tertinggi di Pulau Jawa dengan puncaknya Mahameru, 3,676 meter dari permukaan laut (mdpl). Gunungapi Semeru bertipe strato dengan tipe letusan vulkanian-strombolian. Posisinya berada diantara wilayah administrasi Kabupaten Malang dan Lumajang, dengan posisi geografis antara 8°06' LS dan 112°55' BT, sebagaimana tampak pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta dan Posisi Stasiun Seismik Gunung Semeru

Metode untuk melakukan pemantauan kegiatan gunungapi yang masih menjadi andalan sampai saat ini adalah metode seismik. Pada metode ini terdapat berbagai macam metode analisa, salah satunya yaitu analisa terhadap fenomena atenuasi atau harga faktor kualitas (*Q-factor*) dari medium gunungapi yang menggambarkan kemampuan suatu medium dalam meredam gelombang seismik di dalam tubuh gunungapi [1]. *Q-factor* seismik adalah parameter gelombang yang sangat penting selain kecepatan penjaralan gelombang dalam usaha memahami sifat material bumi yang dilalui [2]. Analisa terhadap *Q-factor* lebih efektif untuk pemantauan gunungapi karena harga *Q-factor* lebih sensitif terhadap

kehadiran gas maupun temperatur sehingga akan didapatkan informasi yang lebih mengenai kondisi bawah permukaan gunungapi dalam rangka mengenali karakteristik gunungapi [3]. Pencitraan dari *Q-factor* dapat digunakan untuk menentukan lokasi dan *extension of magma bodies* pada daerah vulkanik dan detail kontribusi fluida pada daerah patahan maupun berdasarkan pada tingginya porositas efektifnya [4, 5]. Selain itu sebenarnya nilai *Q-factor* juga dapat digunakan sebagai indikator adanya hidrokarbon dan panas bumi [6, 7].

Pencitraan atenuasi dilakukan berdasarkan analisa terhadap data rekaman seismik dari empat stasiun seismik yaitu Stasiun Kepolo, Stasiun Leker, Stasiun Tretes dan Stasiun Besukbang, dengan menggunakan seismometer tipe L-4C dan seismograf tipe PS-3. Posisi stasiun seismik Gunungapi Semeru tampak pada Gambar 1. Data rekaman gempa vulkanik periode tahun 2009 yang dianalisa ada 54 buah data gempa yaitu 27 buah data gempa vulkanik tipe A dan 27 buah data gempa letusan.

METODE PENELITIAN

Penentuan sumber gempa. Lokasi sumber gempa yang berada di permukaan disebut dengan episenter, sedangkan lokasi yang tegak lurus dengan episenter ke arah dalam bumi disebut hiposenter. Salah satu metode untuk menentukan hiposenter adalah dengan analisis beda waktu tiba sinyal seismik yang datang pada beberapa stasiun [8].

$$(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2 = (t_i - t_0)^2 Vp^2$$

$$(t_i - t_0)Vp = (S - P)_i k \tag{1}$$

Dimana $i = 1, 2, 3, \text{ dan } 4$ (stasiun ke- i), X, Y, Z adalah koordinat sumber gempa yang tidak diketahui, $(X, Y, Z)_i$ merupakan koordinat stasiun seismograf, k adalah koefisien jarak yang tidak diketahui, t_i adalah waktu tiba gelombang P , sedangkan t_0 adalah waktu saat terjadinya gempa yang tidak diketahui. *Hipocentral distance* yaitu jarak (hiposenter) S ke (stasiun seismometer) H , dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini

$$SH^2 = (X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2 \tag{2}$$

Nilai SH digunakan sebagai dasar untuk mengetahui nilai koefisien atenuasi yang

menyatakan hubungan antara *hipocentral distance* dengan amplitudo.

Atenuasi dan Q-factor. Gelombang yang merambat pada suatu medium akan mengalami suatu pelemahan (atenuasi) sinyal yang disebabkan oleh adanya penyerapan energi oleh medium. Hal ini disebabkan oleh *geometrical spreading, scattering* dan atenuasi [9]. Atenuasi yang terjadi dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x} \tag{3}$$

Koefisien atenuasi ditunjukkan dengan nilai α yang menunjukkan hubungan antara peluruhan amplitudo dengan *hipocentral distance* [10].

$$\alpha = -\frac{1}{A(x)} \frac{dA(x)}{dx} = -\frac{d}{dx} \ln(A)x \tag{4}$$

Pada peluruhan sinyal seismik secara temporal, dengan amplitudo mula-mula $A = A_0$, A akan berkurang sebesar $\frac{\pi}{Q}$ pada waktu 1 putaran (1T). Untuk n periode ($nT = t = \frac{2n\pi}{\omega}$), maka amplitudo dalam fungsi waktu adalah:

$$A(t) = A_0 \left(1 - \frac{\pi}{Q}\right)^n \tag{5}$$

Dengan mengganti $\pi = \frac{\omega t}{2n}$, maka peluruhan temporal akan menjadi:

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{\omega t}{2Q}\right) \tag{6}$$

Sedangkan peluruhan spasial akan menjadi:

$$A(t) = A_0 \exp\left(-\frac{\omega x}{2vQ}\right) \tag{7}$$

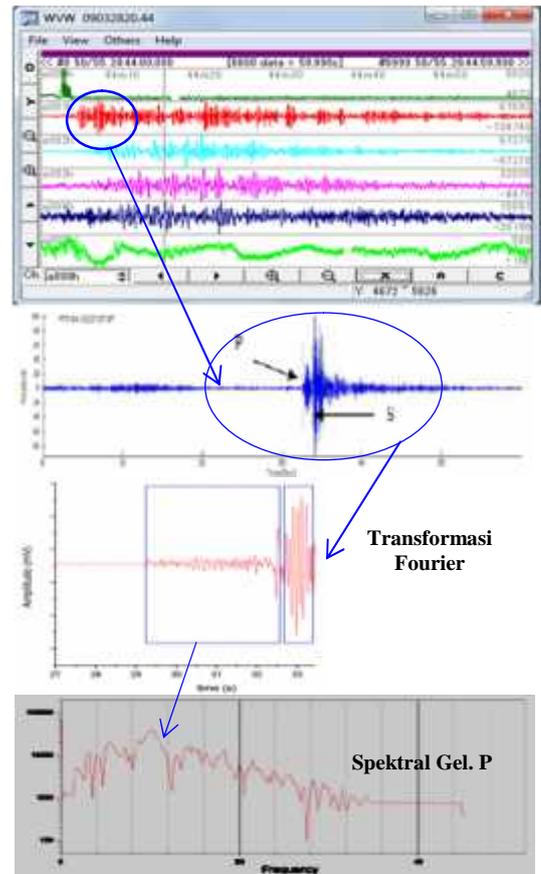
Karena amplitudo adalah fungsi dari waktu dan jarak, sehingga besarnya koefisien atenuasi adalah:

$$\alpha = \frac{\omega}{2Q} \text{ dan } \alpha = \frac{\omega}{2vQ} \tag{8}$$

$$Q = \frac{f\pi}{bv} \tag{9}$$

Nilai frekuensi yang dimaksud pada persamaan (9) adalah nilai frekuensi dominan yang didapatkan dari analisis spektral gelombang P berdasarkan transformasi *fourier* yang telah dilakukan terhadap data rekaman seismik. Nilai koefisien atenuasi (b) pada persamaan (9) diperoleh dari grafik eksponensial yang menyatakan hubungan antara amplitudo dengan *hipocentral distance*, sebagaimana telah dijelaskan pada persamaan (2). Penelitian ini menggunakan kecepatan gelombang P , yang bernilai 2,76 m/s pada lapisan I sedangkan pada lapisan ke 2 yaitu 3,3 m/s. Hal ini disebabkan karena atenuasi dari

gelombang P akan terlihat lebih jelas dibandingkan atenuasi dari gelombang S . Gelombang P , lebih mudah diekstraksi *wavelet*nya dibandingkan gelombang S [11]. Gelombang P juga dapat menunjukkan bagaimana perubahan volume dan materi yang dilewati suatu pusat gempa [12]. Cepat rambat gelombang P sangat berhubungan erat dengan sifat fisik batuan [13].



Gambar 2. Seismogram gempa tipe A (gambar atas), tahapan analisa seismogram hingga diperoleh spektral dari gelombang P .

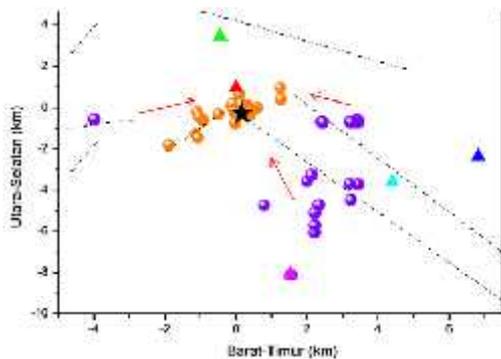
Tabel 1. Q -factor berbagai jenis batuan (Sheriff dan Geldart, 1995)

Jenis Batuan	Q(λ /dB)
Batuan Sedimen	20-200
Batu Pasir	70-130
Shale	20-70
Limestone	50-200
Chalk	135
Dolomite	190
Batuan dengan rongga berisi gas	5-50
Batuan Metamorf	200-400
Batuan Beku	75-300

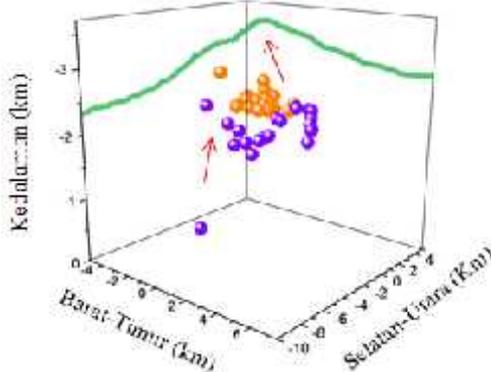
Pencitraan atenuasi. Nilai *Q-factor* yang menunjukkan atenuasi yang terjadi pada medium dan posisi hiposenter dicitrakan dengan bantuan *software* Origin 8, dengan kontur warna menunjukkan jenis batuan sebagaimana tampak pada Tabel 1 [14].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sebaran episenter dan hiposenter. Hasil sebaran episenter gempa vulkanik tipe A dan gempa letusan tampak pada Gambar 3 sedangkan Gambar 4 menunjukkan bagaimana pola sebaran hiposenter. Pada Gambar 3 tampak bahwa episenter gempa menyebar mendekati kawah aktif Jonggring Seloko yang berada di sebelah stasiun Puncak Sebaran episenter tampak dominan berada di sebelah Tenggara hal ini sesuai dengan peta geologi Gunungapi Semeru [15] dan kelurusan struktur atau sesar Semeru memiliki arah Barat-Tenggara dan Timur-Barat [10,16].



Gambar 3. Sebaran Episenter



Gambar 4. Sebaran Hiposenter

- Keterangan :**
- Gempa Vulkanik tipe A
 - Gempa Letusan
 - ★ Jonggring Seloka
 - Sesar
 - ▲ Stasiun Seismik

Pada Gambar 4 tampak bahwa gempa letusan hampir semuanya berpusat di kawah aktif Jonggring Seloko sehingga letusannya merupakan letusan pusat yang berarti letusannya keluar ke pusat kawah. Selain itu episenternya juga hampir terletak pada garis sesar/retakan maka letusannya juga merupakan letusan celah yang berarti letusannya muncul pada sepanjang sesar/retakan hingga beberapa kilometer. Aktivitas letusan gunung semeru berada pada jarak horisontal (episenter), lebih kurang 4 km arah Timur-Tenggara dan Selatan dari kawah dan pada jarak vertikal (hiposenter) sekitar 2 km di bawah puncak [16]. Dalam penelitian ini didapatkan nilai episenter berkisar dari 26 m sampai 1,8 km sedangkan untuk hiposenter nilainya memang rata-rata kurang dari 2 km. Gambar sebaran episenter dan hiposenter dibutuhkan sebagai data pembanding dari pencitraan struktur internal berdasarkan nilai *Q-factor*.

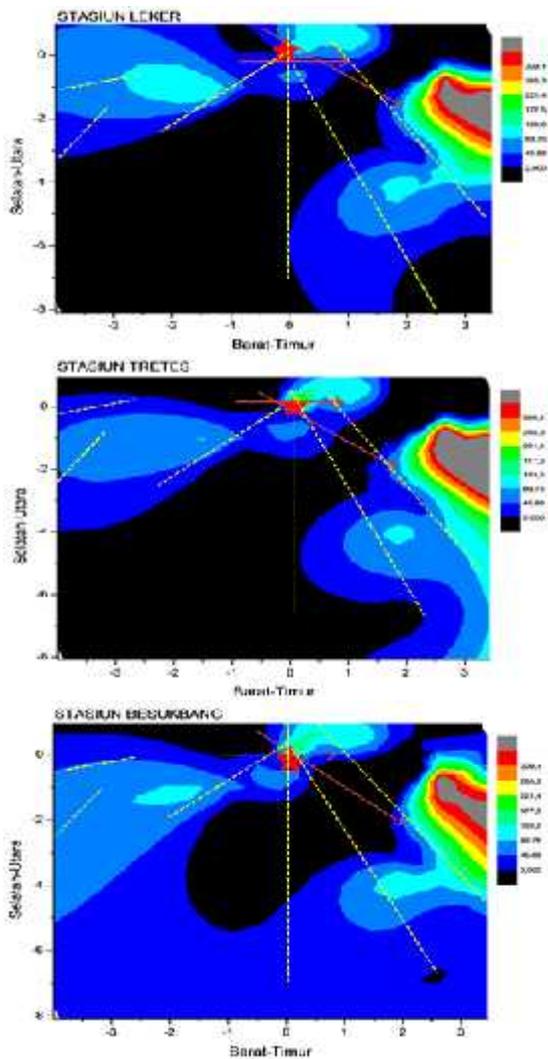
Nilai *Q-factor*. Dalam menentukan nilai *Q-factor* perlu diketahui berapa parameter yaitu amplitudo, frekuensi, hiposenter, *hiposenter distance* dan nilai dari koefisien atenuasi. Dengan membuat grafik hubungan antara amplitudo dan *hiposenter distance* maka dapat diperoleh nilai koefisien atenuasi yang menunjukkan bagaimana peluruhan amplitudo terjadi secara eksponensial yang disebabkan karena pengaruh medium. Secara rata-rata nilai *Q-factor* berdasarkan gempa vulkanik tipe A dari Stasiun Leker adalah 72,065, Stasiun Tretes 87,27 dan 77,265 untuk Stasiun Besukbang. Nilai *Q-factor* ini tidak jauh berbeda dengan nilai *Q-factor* Gunungapi Guntur yang sama-sama gunungapi tipe A, bertipe *Andesitic strato volcano* yaitu 84,52 dan bertipe letusan eksplosif [11]. Nilai rata-rata *Q-factor* berdasarkan gempa letusan pada Stasiun Leker adalah 48,309, Stasiun Tretes 52,523 dan 53,335 untuk Stasiun Besukbang, nilai ini lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai *Q-factor* berdasarkan gempa vulkanik tipe A. Hal ini kemungkinan disebabkan karena gempa vulkanik tipe A yang hiposenternya berada jauh di bawah permukaan kawah sehingga batuanya akan lebih kompak jika dibandingkan gempa letusan yang hiposenternya berada di permukaan dan mediumnya tidak kompak karena daerah

permukaan gunungapi biasanya stratigrafinya berupa kipas aluvial yang berupa batuan sedimen hasil endapan aluvium.

Citra atenuasi Gunungapi Semeru. Citra yang dimaksud pada penelitian ini adalah gambar penampang 2D dari atenuasi sinyal seismik yang ditunjukkan dari nilai *Q-factor*nya. Struktur internal gunungapi Semeru hanya tampak pada daerah yang ada sebaran hiposenter ataupun episenter, sedangkan daerah yang tidak memiliki sebaran hiposenter ataupun episenter tidak tampak struktur internalnya. Hal ini juga terjadi pada beberapa

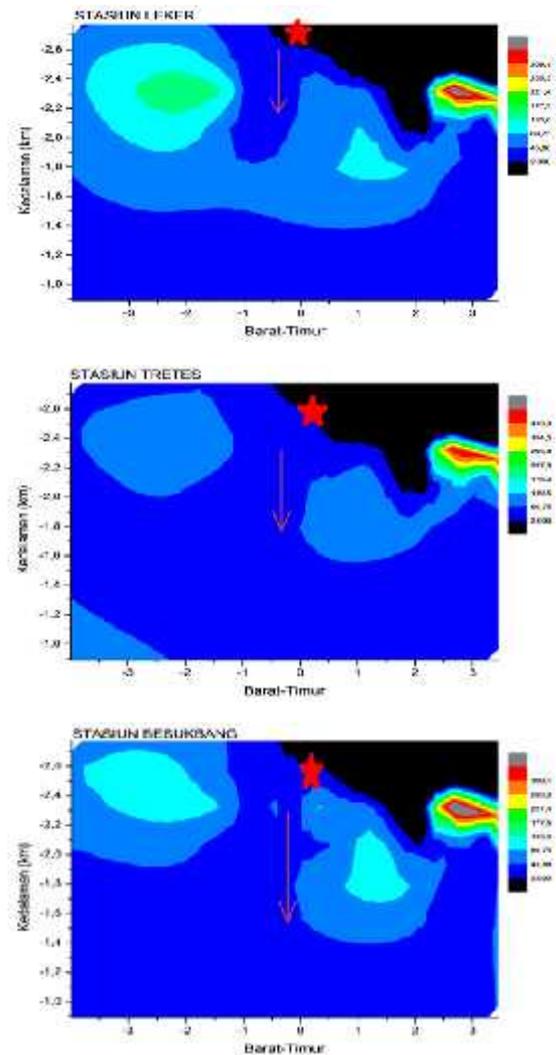
penelitian terdahulu untuk citra bawah permukaan, bahwa daerah yang mampu dicitrakan memang hanya daerah di sekitar hiposenter atau episenter [12, 1, 17].

Dari hasil citra struktur internal Gunungapi Semeru tersebut tampak bahwa semakin mendekati kawah Jonggring Seloka maka warna konturnya adalah biru, yang berarti bahwa nilai *Q-factor*nya kecil atau atenuasinya besar dan struktur internalnya adalah batuan dengan rongga berisi gas, batuan pasir ataupun batuan sedimen yang merupakan zona lemah. Semakin konturnya berwarna merah maka batuan adalah batuan beku maupun batuan



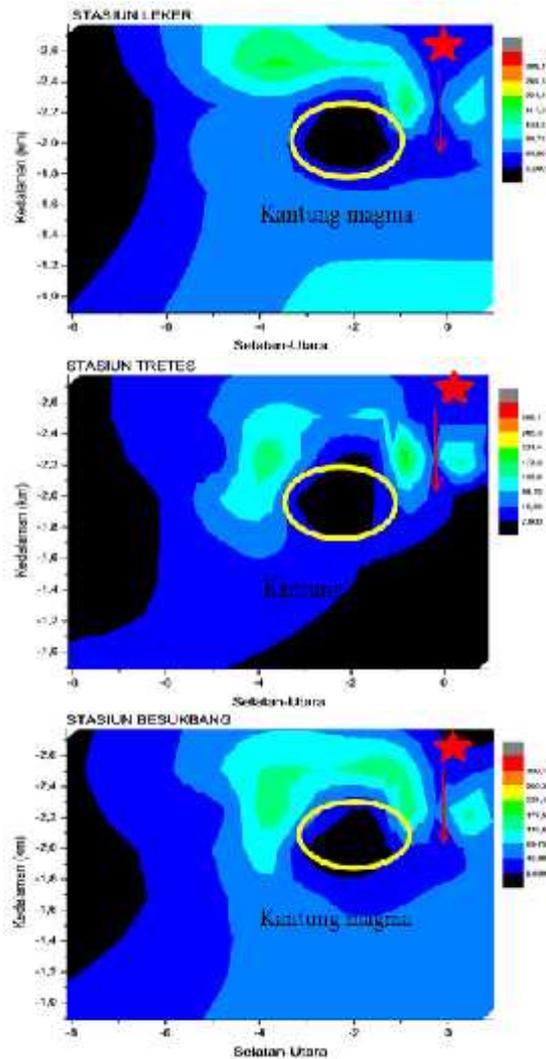
Keterangan : ★ Gempa Vulkanik tipe A

Gambar 5. Struktur internal Gunungapi Semeru dengan penampang Selatan-Utara dan Barat-Timur pada masing-masing stasiun seismometer.



Keterangan : ★ Gempa Vulkanik tipe A

Gambar 6. Struktur internal Gunungapi Semeru dengan penampang Kedalaman dan Barat-Timur pada masing-masing stasiun seismometer



Keterangan : ★ Gempa Vulkanik tipe A

Gambar 7. Struktur internal Gunungapi Semeru dengan penampang Kedalaman dan Selatan-Utara pada masing-masing stasiun seismometer

metamorf. Tepat di daerah hiposenter atau episenter yang padat tampak warnanya konturnya juga biru. Hal ini juga berarti memang di daerah tersebut ada aktivitas seismik dan temperatur yang lebih tinggi dari daerah sekitarnya sehingga di daerah tersebut diperkirakan ada pergerakan fluida panas. Struktur internal berdasarkan nilai Q -factor juga dipengaruhi fluida, porositas dan patahan sebagaimana telah dijelaskan di atas. Citra atenuasi yang menunjukkan struktur internal Gunungapi Semeru dari beberapa stasiun seismik yaitu Stasiun Kepolo, Stasiun Leker, Stasiun Tretes dan Stasiun Besukbang tampak pada Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7.

Pada Gambar 5 tampak bahwa batuan beku

dan metamorf berada pada sekitar 2,69 km dari kawah aktif Jonggring Seloko. Arah zona lemahnya adalah sesuai dengan arah letusan celah yaitu Timur-Tenggara-Selatan dan juga sesuai dengan arah letusan sampingnya yaitu Barat Laut dan Tenggara [16].

Pada Gambar 6, tampak bahwa daerah yang berkelurusan di bawah kawah merupakan daerah zona lemah, dan batuan beku maupun metamorf berada pada kedalaman sekitar 3 km dari kawah sedangkan zona lemah yang mengindikasikan keberadaan kantung magma berada sampai pada kedalaman sekitar 1 km.

Pada Gambar 7, tampak daerah yang berkelurusan di bawah kawah aktif Jonggring Seloko adalah daerah zona lemah dan kedalaman kantung magma sampai sekitar 1,8 km dengan diameter 1,3 km. Hal ini sesuai dengan penelitian bahwa kedalaman kantung magma sekitar 1,8 sampai 2 km [17].

Struktur internal Gunungapi Semeru.

Struktur internal Gunungapi Semeru menurut nilai Q -factor gempa vulkanik tipe A adalah batuan dengan rongga berisi gas, batuan sedimen, batuan pasir, batuan beku dan ada beberapa yang merupakan batuan metamorf. Hal ini sesuai dengan morfologi Gunungapi Semeru yang merupakan gunung yang dibentuk oleh Gunungapi kuartar tua yang berasal dari pengunungan tua yang bercirikan batuan tidak mengandung fosil, batuan yang berlapis dan padat serta terdiri dari kerikil, dan pasir. Batuan metamorf membuktikan bahwa ada intrusi magma ke dalam batuan padat dan terbentuk terutama pada kontak antara magma dan batuan yang bersuhu tinggi ataupun diakibatkan adanya pengaruh gas-gas dalam magma terhadap batuan. Daerah yang memiliki struktur batuan rongga berisi gas, batuan sedimen dan batuan pasir berada pada *event* yang memiliki hiposenter yang lebih dangkal dan episenternya berada pada bentangan sebelah tenggara. Hal ini sangat memungkinkan karena berdasarkan penelitian terdahulu bahwa kelurusan struktur atau sesar Semeru memiliki arah Barat laut-Tenggara, Utara-Selatan dan Timur-Barat [19, 16]. Berdasarkan pada peta geologi batuan beku pada Gunungapi Semeru diidentifikasi sebagai batuan basalt dan andesit sebagaimana yang terdapat pada peta geologi. Sedangkan batuan sedimen

diidentifikasi sebagai breksi vulkanik, breksi lahar dan tuf. Lava andesit dan basalt Gunungapi Semeru berwarna abu-abu kompak berongga dan bertekstur porfiritik [20].

Struktur internal Gunungapi Semeru berdasarkan nilai Q -factor gempa letusan tampak didominasi oleh batuan dengan rongga berisi gas, batuan sedimen dan batuan pasir. Batuan dengan rongga berisi gas kemungkinan adalah aliran piroklastik dan endapan lahar. Karena magma yang keluar sebagai hasil erupsi gunungapi terbentuk dari silikat-silikat yang mengandung gas-gas yang bisa larut dan kadang-kadang menjadi mineral-mineral yang mengkristal dalam bentuk seperti cairan yang dapat larut dan mengapung. Ketika magma itu mencapai permukaan, tekanannya menjadi berkurang sehingga memungkinkan larutan gas itu menjadi busa putih, mendorong magma melewati gunungapi ketika gas-gas tersebut dilepaskan. Karena gempa yang dianalisa pada penelitian ini adalah saat Gunungapi Semeru sedang meletus (status siaga) maka batuan berongga berisi gas bisa diartikan sebagai medium yang berada di sekitar pipa magma yang berdasarkan sebaran hiposenter letusan berada pada kedalaman kurang dari 2 km dan sebagian besar berada di bawah kawah aktif Jonggring Seloko yang bisa diinterpretasikan sebagai letak pipa magma.

Dan hal ini berkesesuaian dengan penelitian yang menyatakan nilai Q -factor yang rendah atau atenuasinya tinggi maka temperaturnya akan tinggi juga sehingga bisa dianggap sebagai zona lemah yang merupakan letak kantung atau pipa magma [21, 22]. Nilai Q -factor yang tinggi atau atenuasi yang rendah juga menunjukkan bahwa densitas dari struktur bawah permukaannya pun akan tinggi juga dan ini telah terbukti bahwa hasil interpretasi batuan pada daerah dengan nilai Q -factor tinggi atau kurang teratenuasi memang berupa batuan beku ataupun batuan metamorf. Sedangkan jika dihubungkan dengan porositas daerah ini memang terbukti struktur internalnya memiliki porositas yang rendah.

KESIMPULAN

Dari pengolahan beberapa gempa vulkanik tipe A dan gempa letusan pada penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan yaitu:

1. Nilai Q -factor dari Gunungapi Semeru dengan menggunakan kecepatan gelombang primer berdasarkan gempa vulkanik tipe A adalah berkisar antara 4 sampai 392 atau secara rata-rata 78,87 sedangkan berdasarkan gempa letusan berkisar antara 4 sampai 288 dan jika dirata-rata nilainya adalah 51,39. Perbedaan nilai ini dikarenakan hiposenter gempa vulkanik tipe A yang lebih dalam dibandingkan hiposenter gempa letusan sehingga jenis batuanya lebih beragam karena semakin beragam jenis batuan maka nilai Q -factor akan lebih tinggi.
2. Struktur internal Gunungapi Semeru didominasi oleh batuan pasir, batuan sedimen, dan batuan dengan rongga berisi gas. Letak zona lemah yang mengindikasikan keberadaan magma mengarah ke Timur-Tenggara-Selatan dengan kedalaman kantung magma sekitar 1-1,8 km dan diameter panjang sekitar 1,3 km dan diameter pendek 0,52 Km.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada pihak Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi atas ijin yang telah diberikan dan seluruh staf Pusat Pemantauan Gunungapi Semeru atas bantuan yang diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Suantika, G., S. Widiyantoro, A. Priyono, B. Priadi, and Surono. (2002), Three dimensional P-and S-wave velocity structures of Mt. Guntur, West-Java, Indonesia, from seismic tomography, *International Journal of Tomography & Statistic*, Vol. 16, No. W11, 1-11.
- [2] Ernawati, Eva. (2011), *Identifikasi Medium Penyusun Bawah Permukaan Gunung Sinabung Berdasarkan Nilai Q factor*, Tugas Akhir, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.
- [3] Tokzos, M.N and D.H. Johnston, (1981), *Seismic Wave Attenuation*, Society of Exploration Geophysicists, Oklahoma.
- [4] Zucca J.J., L.J. Hutchings and P.W. Kasameyer (1994), Seismic velocity and

- attenuation structure of the Geysers geothermal field, California, *Geothermics* **23**, 111-126.
- [5] Sanders C.O., C. Ponko, L.D. Nixon and E.A. Schwartz (1995), Seismological evidence for magmatic and hydrothermal structure in Long Valley caldera from local earthquake attenuation and velocity tomography, *Journal of Geophysical Research*, **100**, 8311–8326.
- [6] Wu H. and M. Lees (1996), Attenuation structure of Coso geothermal area, California, from wave pulse widths, *Bulletin of the Seismological Society of America* **86**, 1574–1590.
- [7] Zollo A. and De Lorenzo S. (2001), Source parameters and three dimensional attenuation structure from the inversion of micro earthquake pulse width data: Method and synthetic tests, *Journal of Geophysical Research* **106**, 16,287–16,306.
- [8] Siswawidjojo, S. (1981), *Seismologi Gunungapi, Metoda pengamatan, Analisa Gempa dan Hubungannya dengan Tingkat Kegiatan Gunungapi*, Direktorat Vulkanologi. Bandung.
- [9] Tselentis, G. A. (1998), Intrinsic and scattering seismic attenuation in W. Greece, *Pure Applied Geophysics* **153**, 703–712.
- [10] Susilo, Adi. (1997), *Analisis Sinyal Seismik Gunungapi Semeru (Jawa Timur, Desember 1993–Pebruari 1994) Dengan Dekonvolusi Homomorfik Untuk Menentukan Mekanisme Sumbernya*, Tesis, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- [11] Priyono, A., G. Suantika dan S. Widiyantoro (2010), Perbandingan hasil atenuasi tomografi 3D menggunakan metoda spectral fitting dan spectral ratio dalam usaha pemetaan bawah permukaan (Studi kasus Gunung Guntur), *Jurnal Matematika dan Sains*, Vol. **15** No. 3, 113-122.
- [12] Zobin, M. (2012), *Introduction to Volcanic Seismology*, Elsevier, London.
- [13] Sanny, T. A., Handayani. G., dan Rizal (2000), Pengaruh porositas dan saturasi pada kecepatan getaran P dan faktor kualitas Q, *Jurnal Geofisika* No **2**, 30-38.
- [14] Sheriff, R. E. and Geldart, L. P. (1995), *Exploration Seismology*, Cambridge University Press, America.
- [15] Sutawijaya, I.S, D. Wahyudin dan E. Kusdinar (1996), *Peta Geologi Gunungapi Semeru, Jawa Timur*, Direktorat Vulkanologi, Bandung.
- [16] Wahyudin, Deden (2010), Aliran lava produk letusan celah tahun 1941 serta kemungkinan terjadinya letusan samping baru di Gunungapi Semeru Jawa Timur, *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, Vol. **1** No. 3. 199-211.
- [17] Chouet, Bernard (2003), Volcano Seismology, *Pure appl. Geophys.* **160**, 739-788.
- [18] Maryanto, S. (1999), *Analysis of Seismic Signal of Mt. Semeru (East Java, March 1st-21st, 1988) in Order to Determine it's Source and Eruption Mechanism*, Tesis, Universitas Gajahmada, Yogyakarta.
- [19] Dana, I. N., DedenWahyudi, dan A. Wildan (1995), *Panduan aktivitas Gunung Semeru*, Direktorat Vulkanologi Subdit Pengamatan Gunungapi Seksi Jawa Bagian Timur, Bandung.
- [20] Suyanto, I. (1992), Harmonic tremor of Mt. Merapi (Central Java) before the 1992 Lava Doming, *International Workshop on Physical Volcanology, XVII Annual Meeting of HAGI (Indonesian) Association of Geophysicist*, Yogyakarta.
- [21] Ringler, Adam, T. (2011), Relative seismic attenuation estimation, *Geophys. J. Int.* **111**, 363-390.
- [22] Anderson, D.L, (1989), *Theory of The Earth*, Blackwell Scientific Publications. Boston.