Mekanisme Fokus Gempa Vulkanik Tipe A Gunung Semeru, Jawa Timur - Indonesia

Kartika Andryana[1)*], Sukir Maryanto[1)], Adi Susilo [1)], Hetty Triastuti [2)]

[1)] Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya, Malang
[2)] Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), Bandung

Diterima tanggal 8 September 2011, direvisi tanggal 5 Oktober 2011

ABSTRAK

Telah dilakukan studi mengenai mekanisme fokus Gempa Vulkanik Tipe A (VA) Gunung Semeru dengan tujuan untuk mengetahui aktivitas gunungapi secara lebih mendalam, hingga informasi mengenai berlangsungnya proses migrasi magma dalam tubuh gunungapi. Penelitian dimulai dengan seleksi rekaman gempa VA yang memiliki kenampakan yang jelas, dilanjutkan dengan konversi pembacaan nilai pada alat serta koreksi amplitudo yang meliputi koreksi efek propagasi dan efek lokal. Distribusi hiposenter menunjukkan bahwa pusat gempa dominan berada pada arah barat – utara relatif terhadap pusat gunung, dengan kedalaman antara 1-13 km. Interpretasi dari sebaran hiposenter, didukung dengan penelitian terdahulu serta informasi geologi sekitar, memberi pendugaan awal bahwa ada kolom aliran magma yang mengarah dari barat laut ke pusat kawah. Telaah mekanisme fokus gempa VA menggambarkan bahwa tipe patahan turun dominan terjadi pada saat puncak erupsi, dan akan berganti tipenya menjadi patahan naik setelah aktivitas turun menjadi normal. Dari hasil penelitian, gempa VA di G. Semeru dapat diklasifikasikan menjadi 2 tipe, yaitu Gempa VA dalam (VA_D) dengan kisaran kedalaman lebih dari 6 km dan Gempa VA dangkal (VA_S), dengan kedalaman antara 1 - 6 km.

Kata kunci**:** Semeru, mekanisme fokus, distribusi hiposenter

ABSTRACT

Study of the focal mechanisms of A-Type Volcanic earthquake (VA) Semeru has been done to know the volcanic activity in more detail, until the information about the magma migration process. The study began with the selection of seismic events that has a clear appearance, continued with the conversion value in the instrument readings and the amplitude correction which includes the correction of propagation effect and local effect. Hypocenter distribution showed that the epicenter was dominant in the northwest direction, relative to the central volcano, with a depth between 1-13 km. Interpretation of the hypocenter distribution, supported by past research as well as geological information around, gave initial estimates that there was a column of magma flow that leads from the northwest to the center of the crater. VA study of earthquake focal mechanism illustrate that the dominant type of normal fault occurs at the peak of eruption, and would change to reverse fault after the activity dropped to normal. From the research, VA earthquake in G. Semeru could be classified into two types: deep VA (VA_D) with a depth range of more than 6 km and the shallow VA (VA_S), with a depth of 1-6 km.

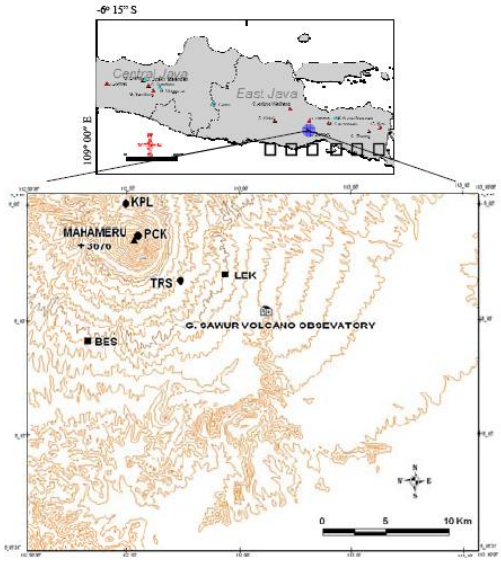
Key word: Semeru, focal mechanism, hypocenter distribution

PENDAHULUAN

Latar Belakang. Gunung Semeru adalah gunung berapi tertinggi di Pulau Jawa, dengan puncaknya Mahameru, 3.676 meter dari permukaan laut (mdpl), dengan kawahnya yang dikenal dengan nama Jonggring Seloko. Posisi gunung ini terletak di antara wilayah administrasi Kabupaten Malang dan Lumajang. Disebelah selatan, kubah ini

----
*Coresponding author :
E-mail: kartikaandryana@gmail.com

mendorong tepi kawah,sehingga menyebabkan aliran lava mengarah ke sisi selatan meliputi daerah Pronojiwo dan Candipuro di Lumajang. Pengamatan Gunung Semeru dilakukan dengan memasang 5 stasiun seismometer, yaitu Puncak, Kepolo, Leker, Tretes dan Besuk Bang, dengan posisi seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pengamatan perlu dilakukan dalam kaitannya dengan usaha mitigasi bencana kegunungapian. Selain kerugian jiwa yang tidak sedikit, bencana letusan gunungapi juga menyebabkan terganggunya kehidupan sosial ekonomi masyarakat sekitar. Untuk inilah, diperlukan suatu langkah yang terintegrasi dalam upaya penanggulangan bahaya erupsi suatu gunungapi.



Gambar 1. Peta lokasi Gunung Semeru dan stasiun seismik

Pengenalan terhadap karakteristik sebuah gunungapi dilakukan dengan pemantauan aktivitasnya secara kontinyu. Pemantauan gunungapi meliputi berbagai metode diantaranya visual, seismik, deformasi, geofisika dan geokimia. Metode seismik pada saat ini masih menjadi andalan dalam pemantauan kegiatan gunungapi. Mekanisme fokus dari gempa vulkanik dapat dijadikan sebagai salah satu bahan pengenalan karakteristik dari suatu gunungapi. Pemantauan kegiatan gunungapi juga dapat dilihat dari migrasi magma dalam tubuh gunungapi. Untuk memperkirakan tingkat keaktifan sebuah gunungapi, dapat mengacu pada letak hiposenter gempa vulkanik yang semakin mendekati permukaan. Dengan mengetahui mekanisme sumber gempa serta kaitannya dengan distribusi hiposenter, diharapkan dapat memberikan sumbangsih pada pengenalan karekteristik gunungapi itu sendiri, terlebih pada gunungapi yang sedang dalam keadaan aktif.

Usaha yang dilakukan untuk menelaah karakteristik dari gunung Semeru ini dilakukan dengan berbagai macam topik penelitian. Sebelumnya, Maryanto (1999) telah melakukan penelitian mengenai mekanisme erupsi Gunung Semeru [1], dengan melakukan analisis terhadap sinyal seismik broadband 3 komponen terkait dengan letusan tahun 1998. Hasil analisis terhadap hiposenter dan episenter memberikan penafsiran bahwa kantong magma bagian dalam terdapat pada kedalaman 1800-2300 m dari kawah dengan arah sebelah Tenggara kawah Jonggring Seloko [1].

Penelitian mengenai mekanisme erupsi G. Semeru juga pernah dilakukan oleh Masato Iguchi, dkk pada tahun 2005. Dari penelitian ini dijelaskan bahwa kondisi awal terjadinya erupsi diterangkan sebagai suatu proses dimana magma dan gas terakumulasi dalam konduit. Tekanan dan volume gas akhirnya meningkat yang dapat diamati melalui adanya inflasi dari ungkitan yang terukur dari tiltmeter. Ketika terjadi pelepasan gas, deformasinya diidentifikasi dengan adanya deflasi ungkitan. Ketika batuan penutup kawah telah rusak, paket gas yang bergerak keluar menjadi sumber deformasi sendiri. Debu dan gas juga diidentifikasi keluar dari dalam konduit. Dan akhirnya, tekanan dan volume menurun ditandai dengan adanya deflasi ungkitan [2].

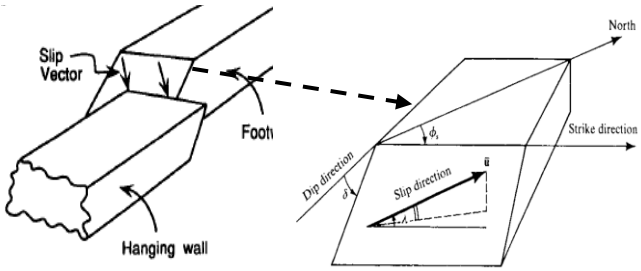
Penelitian mengenai mekanisme gempa vulkanik Gunung Semeru beserta evaluasi daerah bahayanya juga telah dilakukan oleh Siswowidjojo dkk (1995). Hasil analisis lokasi gempa menunjukkan bahwa daerah dalam radius sekitar 1 km di sekitar kawah Jonggringseloko sampai kedalaman 30 km, batas yang dianalisis merupakan wilayah a-

seismik. Begitu pula pada kedalaman sekitar 5 dan 20 km di bawah puncak juga menunjukkan adanya daerah a-seismik. Gejala tersebut ditafsirkan bahwa diatrema masih terisi oleh magma dalam keadaan leleh [3].

Susilo (1997) melengkapi hasil penelitian sebelumnya, yang mana dibuat satu pemodelan kantung magma yang baru. Dengan menganggap aliran fluida adalah laminer, didapatkan bahwa diameter pipa magma sebesar 7,1 m. [4]

Dari beberapa penelitian yang telah ada, dapat diketahui beberapa informasi yang belum ditelaah sebelumnya, seperti belum adanya spesifikasi yang jelas mengenai jenis gempa yang dianalisis. Pembahasan mengenai mekanisme terjadinya erupsi pada Semeru telah banyak dilakukan, namun mekanisme sumber terjadinya gempa vulkanik terutama gempa Vulkanik Dalam belum pernah dilakukan sebelumnya. Beberapa hal inilah yang memotivasi penulis untuk melakukan penelitian lanjutan mengenai mekanisme sumber terjadinya gempa vulkanik dengan suatu metode yang belum pernah dipakai pada Semeru, yaitu berupa metode radiasi sumber.

Mekanisme Sumber Gempa. Gelombang seismik yang diradiasikan dari sumber gempa merefleksikan geometri dari sesar dan pergerakan sesar itu sendiri. Gambar 2 adalah gambaran geometri dari suatu sesar. Vektor slip merupakan arah gerakan *hanging wall* terhadap *foot wall*, dan terletak pada bidang sesar. Dip (δ) merupakan sudut antara permukaan atau bidang horizontal dan bidang sesar, yang bervariasi antara 0-90˚. Garis perpotongan antara bidang horizontal dengan bidang sesar disebut garis *strike*. Arah *strike* mengikuti garis *strike*, yang mana kaidah penentuannya mengikuti kaidah tangan kiri, dengan jari telunjuk menunjuk arah *strike*, dan ibu jari menunjuk arah dip. Sudut *strike* (∅) dihitung searah jarum jam dari arah utara geografis ke arah *strike*. Arah gerak *hanging wall* dinyatakan oleh sudut slip (λ) yang diukur berlawanan arah jarum jam dari suatu garis pada bidang sesar yang sejajar dengan arah *strike*.



Gambar 2. Bidang patah dan parameter bidang patah

Studi geometri sesar ini dapat dipelajari dari pola seismogram yang terekam di beberapa lokasi berbeda. Hal ini dilakukan karena pola radiasi gelombang seismik bergantung pada geometri sesar. Salah satu cara sederhana untuk melakukannya adalah studi polarisasi gelombang [6]. Metodenya berdasarkan polaritas gerak awal gelombang seismik dan bentuk/pola amplitudo dari gelombang badan serta gelombang permukaan. Perpindahan gelombang P medan jauh yang berjarak r dari sumber seismik titik dengan kecepatan rambat α telah diuraikan oleh Aki dan Richards [7] sebagai berikut ;

$$U_P(r,t) = \frac{1}{4\pi\rho r\alpha^3} R^P \dot{M}\left(t - \frac{r}{\alpha}\right) \quad (1)$$

dengan :

$U_P(r,t)$ = medan perpindahan untuk gelombang P

R_P = pola radiasi gelombang P

r = jarak ke hiposenter

$\dot{M}$ = fungsi momen rata-rata

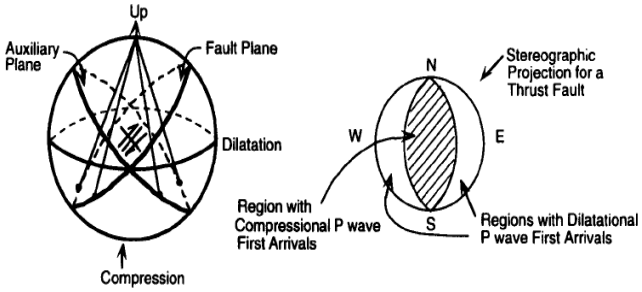
α = kecepatan gelombang P

ρ = densitas batuan sekitar gunungapi

Pola radiasi gelombang P ini dapat diperoleh dari hubungan dibawah ini [7], dengan $\varnothing_S$, δ, dan λ menggambarkan *strike*, *dip*, dan *rake* dari bidang patah, sedangkan $\varnothing$ dan i_ξ menggambarkan sudut azimuth dan sudut datang gelombang dari sumber, relatif terhadap stasiun.

$$\begin{aligned} R^P &= \cos\lambda \sin\delta \sin^2 i_\xi \sin 2(\phi - \phi_s) \\ &- \cos\lambda \cos\delta \sin 2i_\xi \sin 2(\phi - \phi_s) \\ &+ \sin\lambda \sin 2\delta (\cos^2 i_\xi - \sin^2 i_\xi \sin^2(\phi - \phi_s)) \\ &+ \sin\lambda \cos 2\delta \sin 2i_\xi \sin(\phi - \phi_s) \end{aligned} \quad (2)$$

Bola fokus akan menunjukkan perbedaan geometri yang menunjukkan mekanisme terjadinya suatu gempa, seperti Gambar 3, apakah karena patahan naik, patahan turun, ataupun patahan geser.



Gambar 3. Proyeksi bidang patahan dan bidang bantu ke bola fokus

METODE PENELITIAN

Langkah Penelitian. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap yaitu dimulai dengan seleksi data rekaman seismik Gempa Vulkanik Dalam (VA) tahun 2009 dan 2010. Sebagai bahan koreksi, diperlukan juga seleksi data Gempa Tektonik Jauh, dalam rentang tahun yang sama. Rekaman seismik yang telah diseleksi selanjutnya dianalisis nilai frekuensi, amplitudo, dan waktu tiba terjadinya gempa. Pada tahap ini, ditentukan pula hiposenter tiap Gempa Vulkanik Dalam. Beberapa perhitungan faktor koreksi, diantaranya koreksi pembacaan alat, efek propagasi gelombang, dan juga koreksi lokal yang ditelaah dari besarnya faktor kualitas medium (*Q factor*) Gunung Semeru. Faktor koreksi ini diperlukan untuk mendapatkan nilai amplitudo asli dari sumbe gempa. Dari nilai amplitudo terkoreksi inilah yang selanjutnya dianalisis mekanisme fokus gempa yang terjadi. Interpretasi akhir dilakukan dengan melihat hubungan antara perkembangan posisi hiposenter gempa dengan proses migrasi magma. Ditelaah pula, interpretasi mekanisme fokus gempa dalam kaitannya dengan model aktivitas Gunung Semeru secara umum dan manfaatnya dalam mitigasi bencana kegunungapian.

Konversi pembacaan alat. Dilakukan untuk mendapatkan nilai amplitudo asli yang direkam oleh seismometer. Faktor pengali untuk nilai terbaca pada masing-masing stasiun adalah 20.3×10^{-12} untuk stasiun Kepolo, Leker, dan Trestes, serta 10×10^{-12} untuk stasiun Besuk Bang.

Koreksi amplitudo. Nilai yang terukur adalah nilai yang telah terpengaruh efek lokal, medium, & efek instrument. Sehingga perlu dikoreksi berdasar rumusan berikut [7] :

$$U(\omega) = X(\omega)E(\omega)Q(\omega)I(\omega) \qquad (3)$$

dengan :

$U(\omega$ = amplitudo tercatat
$X(\omega)$ = amplitudo sumber
$I(\omega)$ = faktor instrumentasi
$Q(\omega)$ = efek propagasi
$E(\omega)$ = efek lokal

Koreksi Alat. Pada Gunung Semeru, jenis sensor yang dipakai di kelima stasiun seismometer adalah sama, yaitu jenis L4C. sehingga faktor koreksinya adalah 1 (satu).

Koreksi Efek Propagasi. Dalam kondisi yang ideal, yaitu bumi yang elastik, besar amplitudo dipengaruhi oleh beberapa hal, di antaranya adalah geometri penjalaran gelombang, serta pola refleksi dan juga transmisi gelombang dalam sebuah bidang batas. Proses pelemahan ini dijelaskan dalam sebuah sistem eksponensial teredam, yang mana atenuasi dideskripsikan sebagai besar dari faktor kualitas medium (*Q factor*) dengan rumus [8] :

$$A(x) = A_0 e^{-(f\pi/Qv)x} \qquad (4)$$

dengan :

Q = faktor kualitas medium
v = kecepatan rambat gelombang dalam medium
f = frekuensi
x = jarak propagasi gelombang
A = amplitudo yang terekam di seismometer
A_o = amplitudo sumber

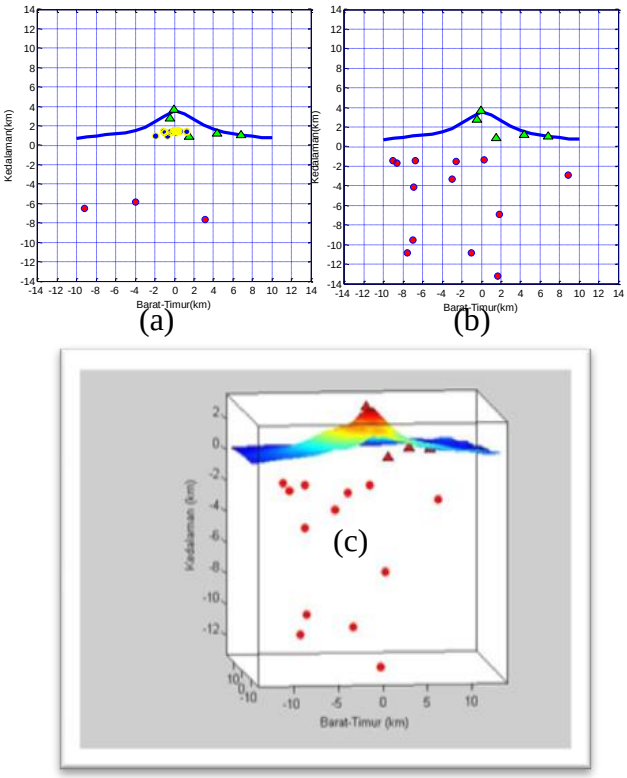
Koreksi Efek Lokal. Asumsi bahwa medium homogen tidaklah sepenuhnya dapat dijadikan sebagai acuan. Jaringan seismik di sekeliling gunungapi, dianggap sebagai suatu titik kecil oleh gempa tektonik jauh. Oleh karena itu, diasumsikan bahwa gelombang menjalar dengan pola yang sama, dan akan

terekam di tiap stasiun observasi dengan besar pulsa yang sama. Dalam kenyataannya, ada perbedaan besar amplitudo yang terekam dikarenakan adanya pengaruh efek lokal di sekeliling stasiun pengamatan. Karena hal inilah, pengkajian mengenai efek lokal dilakukan dengan membandingkan tiap amplitudo gempa tektonik jauh yang terekam di tiap stasiun sebagai faktor koreksi. Didapat faktor koreksi untuk masing-masing stasiun sebesar 0, 72 ; 1 ; 0,39 ; 0,43 berturut-turut untuk stasiun Kepolo ; Leker ; Tretes dan Besuk Bang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Hiposenter. Distribusi hiposenter tahun 2009 dan 2010 dapat dilihat pada Gambar 4. Yang mana, di tahun tersebut gempa dominan terjadi pada arah Barat-Utara, hampir serupa dengan hasil penelitian Siswowidjojo (1995), sehingga diduga ada daerah aliran magma pada arah Barat Laut gunung Semeru. Dari informasi posisi hiposenter, diperoleh bahwa gempa mengelompok pada beberapa kedalaman. Dapat didefinisikan bahwa Gempa VA pada Semeru dapat dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan parameter kedalaman terjadinya gempa, yaitu Gempa VA dalam (disebut dengan VA_D) dan Gempa VA dangkal (disebut dengan *VAs*).

Disimpulkan bahwa kesesuaian kedalaman untuk VA_D adalah pada kedalaman lebih dari 6 km, dan untuk VAs, berkisar antara 1 hingga kurang dari 6 km. Penentuan ini merujuk pada kasus serupa di Gunung Merapi, dimana ada klasifikasi khusus untuk jenis Gempa Vulkano Tektonik (VT), yaitu Gempa Vulkano Tektonik Dalam (VTA), dan Gempa Vulkano Tektonik Dangkal (VTB). Dan ditelaah pula bahwa kedua jenis gempa ini memiliki kenampakan yang berbeda pula pada mekanisme fokus terjadinya. Diperoleh bahwa mekanisme yang terjadi untuk gempa VA_D dominan karena adanya tipe patahan normal dan tipe *strike slip*, berbeda dengan jenis VA_S yang dominan disebabkan oleh tipe *reverse fault*.

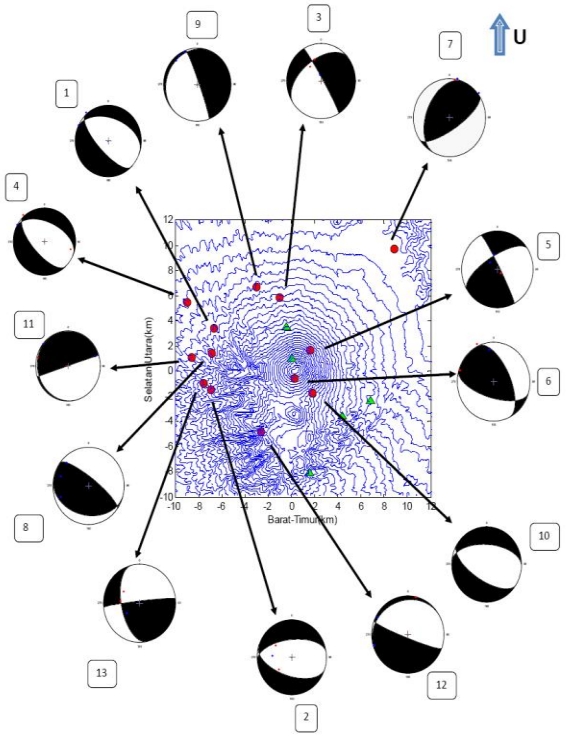


Gambar 4. Distribusi hiposenter (a) 2009, (b) 2010, dengan 3 dimensi (c). Segitiga adalah posisi stasiun seismometer, lingkaran merah adalah posisi Gempa VA, kuning adalah Gempa Letusan.

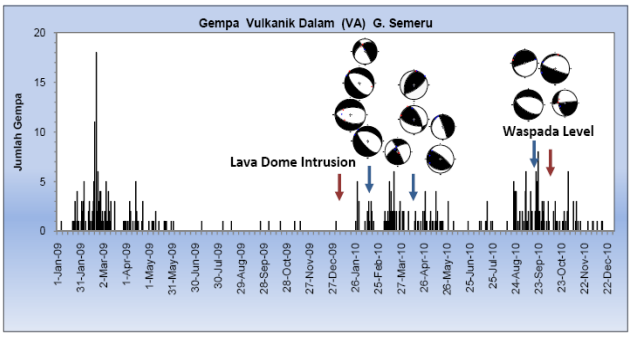
Mekanisme Fokus Sumber Gempa. Mekanisme sumber yang didapat dari analisa data Gempa VA dapat dilihat pada Gambar 5. Hubungan antara aktivitas gunung dengan telaah pola mekanisme sumber yang terjadi dapat merepresentasikan hasil yang lebih baik. Pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara aktivitas vulkanik dengan mekanisme fokus gempa VA-nya.

Pola sebaran mekanisme sumber dikelompokkan berdasarkan aktivitas vulkanik yang tampak. Pada kisaran awal tahun 2010, sangat dominan pola mekanisme patahan normal, kemudian diikuti dengan pola patahan naik. Mengacu pada penelitian Nishi (1978), hal ini-pun dapat diamati pada Gunung Sakurajima, Jepang. Di Sakurajima, pola mekanisme patahan normal sangat dominan di

masa erupsi, dan akan dominan menjadi patahan naik setelah aktivitas mencapai puncaknya.

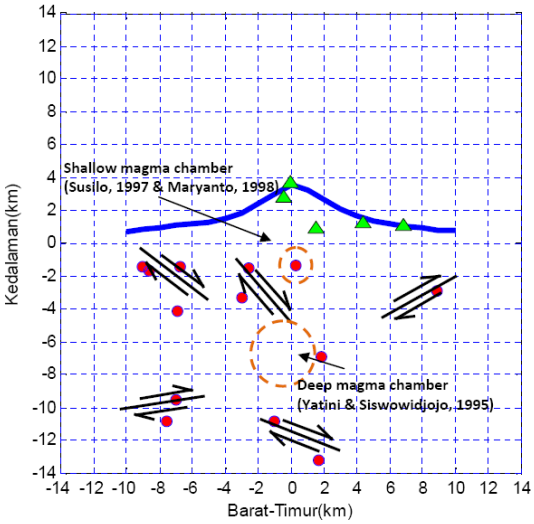


Gambar 5. Mekanisme sumber gempa vulkanik VA di sekitar Semeru. Segitiga hijau menunjukkan posisi stasiun seismometer, lingkaran merah menunjukkan episenter gempa VA.



Gambar 6. Hubungan aktivitas vulkanik dengan mekanisme fokus gempa VA

Pada kasus Semeru, awal tahun 2010 dimungkinkan masih aktifnya pertumbuhan kubah lava - yang mulai terjadi pada Desember 2009, sehingga mekanisme yang tampak adalah berupa patahan normal. Pada kisaran bulan Maret hingga Mei 2010, ketika masa-masa pertumbuhan kubah lava telah berlalu, pola patahan naik yang lebih tampak. Berbeda dengan kejadian di akhir tahun, kisaran bulan September 2010, pola mekanismenya kembali dominan tipe patahan normal, tepat ketika aktivitas Semeru ditingkatkan menjadi level waspada. Dari hasil ini, dapat dilihat sedikit kemiripan antara Gunung Semeru dengan Gunung Sakurajima di Jepang dari segi pola mekanisme gempa dan kaitannya dengan aktivitas gunungapi.



Gambar 7. Sketsa sistem magma di G. Semeru

Mekanisme gempa di Semeru tampak bahwa penyebab adanya gempa vulkanik lebih dikarenakan oleh adanya *crack* (patahan kecil). Selain itu, beberapa kejadian gempa yang posisi episenternya relatif jauh dari pusat kawah Semeru (terutama yang berjarak 8 km ke atas), mengindikasikan bahwa gempa tidak hanya bersumber dari pusat konduit gunung saja, melainkan lebih meluas kedaerah sisi tubuh gunung. Mengacu pada informasi geologi daerah Semeru, di sekitar arah Barat laut gunung Semeru memang terdapat patahan normal aktif. Hal ini bersesuaian dengan dominansi episenter gempa yang berada di sekitar Barat laut Semeru.

Sketsa sistem magma pada Semeru dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 7. Dari penelitian Yatini dan Siswowijoyo (1995), daerah aseismik diduga berada pada kedalaman lebih dari 4 km, yang diindikasikan

sebagai kantung magma bagian dalam. Kantung magma dangkal diperkirakan ada pada kedalaman sekitar 2 km, sebagai hasil penelitian Susilo (1998) dan Maryanto (1999). Kedua kantung magma inilah yang berperan pada terjadinya gempa vulkanik, ditambah dengan informasi geologi Semeru, adanya kelurusan *crack* yang mengarah ke barat laut yang menyebabkan adanya gempa vulkanik yang dominan berada pada arah tersebut.

KESIMPULAN

Posisi episenter gempa VA yang dominan kearah Barat Laut relatif terhadap pusat kawah mengindikasikan aktifnya patahan normal yang ada di wilayah tersebut. Diklasifikasikan jenis Gempa VA khusus untuk Semeru, yaitu gempa VA Dalam (VA_D) dengan posisi kedalaman gempa lebih dari 6 km dan VA Dangkal (VA_S) yang kedalamannya berkisar antara 1 hingga kurang dari 6 km. Teramati bahwa ketika gunung sedang dalam kondisi aktif, terlebih saat masa-masa puncak erupsi, mekanisme sumber yang terjadi lebih disebabkan oleh *crack* dengan tipe patahan normal (turun), dan akan berganti menjadi patahan naik ketika kondisi gunung telah lepas dari masa aktifnya kembali ke kondisi normal.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Dr. Surono selaku Kepala Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), atas izin penggunaan data Semeru, kepada Sri Hidayati & Yasa Suparman atas izin penggunaan program mekanisme fokus, serta kepada Hery atas pengumpulan data yang baik.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Maryanto, S (1999), *Analysis of Seismic Signal of Mt. Semeru (East Java, March 1st- 21st , 1998) in order to Determine Its Source and Eruption Mechanism*, A thesis, UGM, Yogyakarta.

[2] Iguchi, M., Yakiwara, H., Tameguri, T., Hendrasto, M., and Hirabayashi, J, (2007), *Mechanism of explosive eruption revealed by geophysical observations at the Sakurajima, Suwanosejima and Semeru volcanoes*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 178(2008)1-9.

[3] Siswowidjojo, S., Santoso, D., Sudarsono, U., dan Surono (1995), *Laporan Final Riset Unggulan Terpadu : Penelitian Mekanisme Letusan G.Semeru di Jawa Timur dan Evaluasi Daerah Bahayanya*, Dewan Riset Nasional dan Proyek Pusat Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi, Bandung.

[4] Susilo, A, (1998) *Analisis Sinyal Seismik Gunungapi Semeru (Jawa Timur, Desember 1993-Februari 1994) dengan Dekonvolusi Homomorfik untuk Menentukan Mekanisme Sumbernya*, UGM, Jogjakarta.

[5] Siswowidjoyo, S, (1981), *Seismologi Gunungapi*, Sub Direktorat Pengamatan Gunungapi- Direktorat Vulkanologi, Bandung.

[6] Afnimar, (2009), *Seismologi*, Penerbit ITB , Bandung.

[7] Aki, K, dan Richard, P. (2002), *Quantitative Seismology*, University Science Book, Sausalito.

[8] Stein, S and Wysession,M, (2003), *An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*, Blackwell Publishing, UK.

[9] Lay, T dan Wallace, (1995), *Modern Global Seismology*, Academic Press, California.