

ARTIKEL RISET

# Identifikasi Dinamika Magma Berdasarkan Analisis Tremor Vulkanik di Gunungapi Slamet Jawa Tengah

Wanri Lumbanraja dan Kirbani Sri Brotopuspito<sup>2\*</sup>

## Abstrak

Selama fase aktif tahun 2014 lima seismometer yang ditempatkan di sekitar Gunungapi Slamet merekam sinyal tremor mulai pertengahan Juli. Keberadaan tremor ini kemudian diikuti dengan letusan-letusan abu dan lontaran lava pada tanggal 18 Agustus 2014, hingga terjadi letusan-letusan pada awal hingga pertengahan September 2014. Analisis spektrum dilakukan pada sinyal tremor untuk mengetahui kandungan frekuensi sinyal tersebut, metode yang digunakan adalah dengan menerapkan Metode Entropi Maksimum. Selain analisis spektrum, analisis polarisasi juga diterapkan untuk mengetahui karakter gelombang seismik tremor. Rentang spektrum yang dikandung oleh sinyal relatif sempit terletak antara 1 Hz hingga 4 Hz, dimana puncak daya spektrum dominan terletak pada frekuensi rata-rata 2,0 Hz dan 3,1 Hz. Terdapat hubungan antara pola daya spektrum dengan bocornya magma ke permukaan, dimana erupsi terjadi setelah diawali oleh pelemahan atau kehilangan daya frekuensi 3,1 Hz. Analisis gerakan partikel menunjukkan adanya gelombang Rayleigh dengan arah propagasi ke utara. Selain itu, gelombang SH juga teramati dengan arah tangensial terhadap puncak Gunung Slamet. Gelombang Rayleigh ini mengonfirmasi bahwa sumber tremor relatif dangkal, relatif terhadap seismometer 3 komponen. Saat mendekati fase erupsi, besar sudut azimut cenderung bergeser ke arah 0 derajat dan sudut datang cenderung bergeser ke arah 90 derajat, fakta ini mengarah pada kesimpulan bahwa pipa tidak vertikal sempurna melainkan memiliki kemiringan, perubahan azimut dan sudut datang ini mengindikasikan adanya kenaikan magma ke puncak.

**kata kunci:** tremor; G. Slamet; dinamika magma; Metode Entropi Maksimum \_\_\_\_\_

## Abstract

During the active phase in 2014 five seismometers placed around Slamet volcano began recording tremor signal in mid-July. The existence of this tremor were followed by eruptions of ash and lava burst in August, 18th 2014, then there were the main eruptions in the early to mid-September 2014. Spectrum analysis performed on the signal to determine the frequency contents of the tremor, the method used is the Maximum Entropy Method. In addition to spectrum analysis, polarization analysis was also applied to determine the character of the seismic waves tremor. The range of the spectrum contained by the signal relatively narrow lies between 1 Hz to 4 Hz, where the dominant power spectrum peak lies in frequency average of 2.0 Hz and 3.1 Hz. There is a relations between the pattern of the power spectrum with the leaking of magma to the surface, that is the eruption occurred after initiated by the weakening or loss of power frequency of 3.1 Hz. Particle motion analysis showed the presence of Rayleigh wave which propagate to the north direction. In addition, the SH waves were also observed in the direction tangential to the summit of Mount Slamet. This Rayleigh wave confirm that the tremor source is relatively shallow, relative to the 3 components seismometer. When approaching eruption phase, azimuth angles tends to shift toward 0 degrees and the angles of incidence tends to shift toward 90 degrees, This fact leads to the conclusion that the pipe is not perfectly vertical but has a certain slope. The change in azimuth angles and the angles of incidence indicates the rising of magma to the summit.

**keywords:** Tremor; M.Slamet; Magma Dynamics; Maximum Entropy Method

\*Korespondensi: kirbani@ugm.ac.id

<sup>2</sup> Department of Physics, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara PO BOX BLS 21, 55281 Yogyakarta, Indonesia

Informasi lengkap tentang penulis dapat dilihat pada akhir artikel

## 1. Pendahuluan

Gunung Slamet merupakan salah satu gunungapi yang aktif di Jawa Tengah. Jika dilihat dari sejarah letusannya yang tercatat mulai tahun 1772 hingga

2014, gunung ini merupakan gunungapi yang aktif secara terus menerus, artinya tidak ada jeda waktu non-aktif yang lama. Tercatat sejak tahun 1825 hingga 2014 periode keaktifannya bervariasi hanya dalam satu tahunan hingga sepuluh tahun dan kemungkinan masih akan terus berlanjut. Walaupun demikian penelitian menyangkut seismik, baik Volcano Tektonik (VT) maupun tremor belum banyak dilakukan di gunungapi ini. Aktivitas gunungapi Slamet pada tahun 2014 diamati meningkat hingga terjadi letusan besar pada tanggal 17 September 2014. Selama periode peningkatan aktivitas itu, seismometer merekam sinyal seismik berupa tremor. Sebaran seismometer di gunungapi Slamet diperlihatkan pada Gambar 1.

Posisi kedalaman dapur magma gunungapi Slamet telah diidentifikasi dengan metode gravitasi, berada pada kedalaman 3,5 -16 km di bawah permukaan laut [1]. Berdasarkan posisi dapur magma ini, pipa magma berarti memanjang dari puncak hingga kedalaman tersebut, dimana magma yang berada pada pipa berasal dari injeksi dari dapur magma.

Beberapa peneliti telah melakukan berbagai pendekatan empiris dan pendekatan analisis fisis dan matematis untuk menjelaskan bagaimana mekanisme ter-bangkitkan-nya sinyal seismik tremor hingga terekam oleh seismometer. Pendekatan yang dilakukan mencakup geometri ruang, sifat fisika-kimia magma, hingga sifat fisika batuan di sekitar magma. [2] dan [3] mengusulkan model mekanisme sumber yang berhubungan dengan dimensi konduit serta impedansi aliran fluida di dalam konduit dan lobang (orifice) yang dilalui oleh fluida tersebut. Perbandingan impedansi aliran fluida antara konduit dengan lobang akan menentukan apakah sistem perpipaan termasuk pipa organa terbuka atau pipa organa tertutup. Konsep ini digunakan untuk menjelaskan keberadaan puncak frekuensi tremor baik yang inharmonik maupun harmonik. [4] mengusulkan model mekanisme sumber yang memungkinkan untuk membangkitkan tremor dengan menganalisis aliran Poiseuille dan gelombang Krauklis. [4] menyimpulkan bahwa kondisi yang memungkinkan untuk membangkitkan sinyal seismik tremor adalah solusi antisimetri dari gelombang Krauklis. Julian (1994) mengatakan bahwa tremor bisa berasal dari eksitasi aliran fluida yang tidak stabil, dimana frekuensi tremor yang dihasilkan dipengaruhi oleh massa jenis magma, tekanan dan sifat elastik dari batuan di sekitar magma.

Identifikasi dinamika sumber tremor yang dianalisis berdasarkan pola perubahan spektrum juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Jika terdapat perubahan frekuensi terhadap waktu atau pelayangan frekuensi (frekuensi gliding), penyebabnya bukan

karena perubahan frekuensi dari sumber melainkan karena perubahan jarak sumber relatif terhadap penerima [5]. Kasus demikian dianalogikan dengan Efek Dopler yang terjadi pada bunyi. Pelayangan juga bisa disebabkan oleh naiknya gelembung gas pada pipa dan akibat aliran slug [6]. Interpretasi ini memungkinkan kita untuk mengetahui efek dari gerakan magma di dalam pipa ketika magma itu mulai bergerak atau mengalir pada pipa yang memanjang, misalnya naiknya magma menuju puncak gunungapi yang bersangkutan.

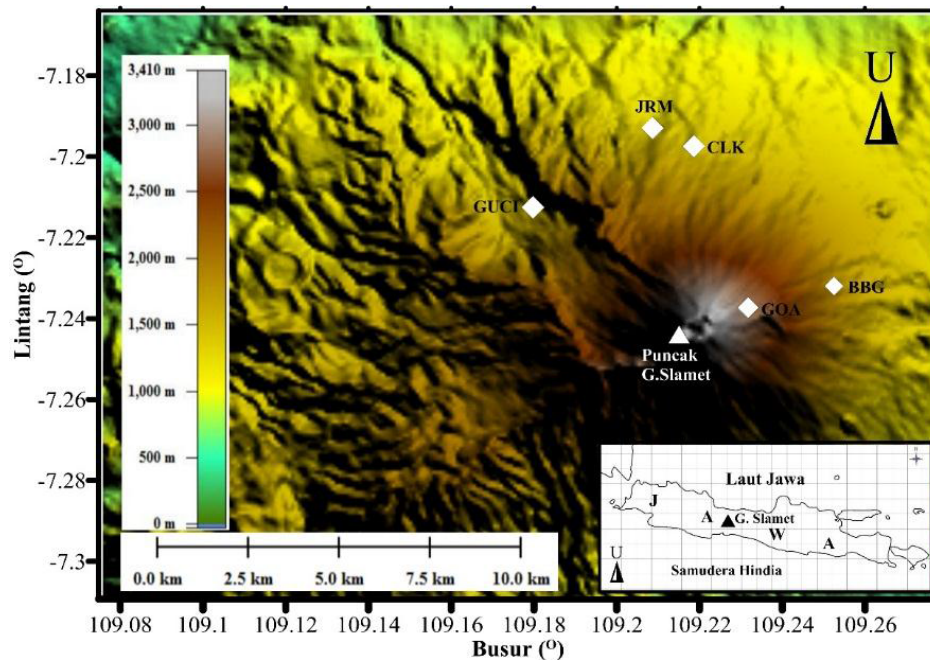
Adapun penelitian ini fokus untuk mengidentifikasi perubahan pola amplitudo di domain waktu dan pola daya spektrum pada masing-masing puncak frekuensi secara temporal, selanjutnya mengidentifikasi hubungannya signifikan dengan erupsi yang akan terjadi setelah tremor-tremor tersebut. Hasil penelitian ini mencoba meningkatkan akurasi prediksi erupsi berdasarkan pola spektrum dan pola amplitudo sinyal tremor.

## 2. Metode Analisis

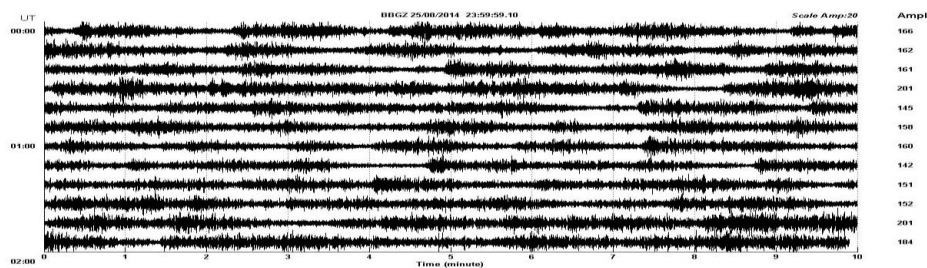
### a. Instrumen dan Data

Data direkam dengan menggunakan seismometer merek Mark Product L-4C dan Mark Produk L-22. Stasiun CLK menggunakan Mark Product L22 velocity seismometer 3 komponen yang memiliki frekuensi natural 2 Hz dengan dua zero pada posisi nol dan dua pole pada posisi  $(-8,886 + 8,886i)$  dan  $(-8,886, -8,886i)$ . Empat stasiun lain yaitu stasiun BBG, JRM, GOA dan GUCI menggunakan seismometer L-4C dengan frekuensi natural 1 Hz dengan dua zero pada posisi nol dan dua pole pada posisi  $(-4,443, 4,443i)$  dan  $(-4,443, -4,443i)$ .

Data tremor pada penelitian ini dipartisi sepanjang 10 menit dalam satu folder, sehingga terdapat puluhan ribu folder selama empat bulan data. Dalam satu folder terdiri atas file data rekaman setiap komponen dari kelima seismometer yang terpasang. File data memiliki format .SAC. Adapun untuk keperluan analisis lain, sampel data diambil secara random dengan hanya mempertimbangkan keberurutan data dari awal hingga mendekati fase-fase erupsi. Bentuk sinyal tremor yang terekam di gunungapi Slamet memiliki dua pola yang berbeda antara lain sinyal yang diawali pada tanggal 24 Juli 2014 dibandingkan sinyal tremor yang diawali pada tanggal 26 Agustus 2014. Data pada tanggal 26 terlihat lebih stasioner dari pola sinyal pada tanggal 24 Juli 2014. Hal ini menunjukkan adanya perubahan pola sinyal menjelang erupsi, perlu diketahui erupsi lava mulai terlihat tanggal 18 Agustus 2014, kemudian terulang lagi mulai 01 September 2014.



**Gambar 1** Lokasi stasiun seismometer yang ada di sekitar Puncak gunungapi Slamet (tanda segitiga). GOA, BBG, JRM, BBG dan CLK (tanda berlian) adalah kode untuk masing-masing nama stasiun seismometer



**Gambar 2:** Bentuk sinyal di stasiun BBG pada tanggal 26 Agustus 2014

#### b. Analisis spektral

Model awal dalam penelitian ini mengikuti model paruh gunungapi yang disarankan oleh [7] di gunungapi Etna, Italia. Pembuatan model didasarkan pada pola radiasi daya seismik yang direkam oleh seismometer, dimana radiasi seismik berasal dari aliran monopol, dipol dan kuadropol fluida[8]. [9] mengatakan bahwa total daya radiasi dari suatu sumber merupakan kombinasi dari monopol, dipol dan kuadropol, kekuatannya ditentukan oleh besar magnitudo injeksi, gaya yang diberikan oleh fluida, dan momentum gerakan fluida. Dalam kasus seismik tremor, daya spektrum yang terkandung pada data seismiknya dideskripsikan sebagai hasil jumlahan dari resonansi osilator harmonik dari masing-masing dyke atau ruang yang diisi oleh magma dinamis [7]. Untuk

mengidentifikasi pola spektrum dari masing-masing sumber, estimasi daya spektrum dilakukan pada sinyal tremor yang diduga berasal dari dyke yang berisi magma tersebut.

Kita mengetahui bahwa resolusi puncak spektrum dalam TF sangat bergantung dengan panjang data yang ditransformasi [10]. Selain itu, resolusi tersebut juga dipengaruhi oleh pola pancungannya terhadap data, semakin dekat pancungannya dengan perulangan periodisasi data maka spektrumnya semakin tajam, begitu pula sebaliknya. Untuk mengakomodasi kelemahan tersebut, dalam penelitian ini estimasi spektrum dilakukan dengan prinsip maximum entropi. Prinsip ini berasal dari *ide* bahwa, untuk mendapatkan model yang paling cocok dengan kenyataan apabila kita tidak memiliki data

yang cukup banyak adalah dengan menambahkan *noise* [11]. Artinya, sistem model dianggap memiliki ketidakaturan yang paling maksimal (*maximum entropy*).

Distribusi data runtun waktu yang memiliki entropi maksimum (sinyal random dengan *noise*) dapat dinyatakan dalam bentuk model autoregresi. Spektrum untuk model autoregresi dari suatu proses random dapat dihitung dari domain  $z$  proses autoregresi itu, yakni,

$$X(z) - X(z)(\alpha_1 z + \alpha_2 z^2 + \dots + \alpha_M z^M) = w(z) \quad (1)$$

dengan  $w(z)$  merupakan sinyal random atau *white noise*. Dengan mensubstitusikan  $z = \exp(-i2\pi f)$ , kita peroleh setengah dari total spektrum power. Mengingat bahwa variansi dari suatu data random dengan nilai rata-rata nol adalah sebanding dengan  $w(z)$ , maka total power dari  $-M$  hingga  $+M$  adalah,

$$S(f) = \frac{2\sigma^2}{1 - \sum_{k=1}^M \alpha_k \exp(-2\pi f k)^2} \quad (2)$$

dengan sigma  $\sigma$  adalah variansi dari sinyal random dan  $\alpha_k$  adalah parameter proses autoregresi [12]. John Parker Burg menciptakan Algoritma untuk menghitung  $\alpha_k$  berdasarkan prosedur rekursi Levinson (Burg, 1975).

### c. Polarisasi

Analisis polarisasi dilakukan untuk mengetahui pola gelombang di dalam medium perambatan. Proses untuk menganalisis polarisasi dilakukan dalam domain waktu pada sinyal tiga komponen yang dipisah dalam jendela waktu [13]. Jika data terkoreksi menjadi terdistribusi normal, artinyaa setiap data pada ketiga komponen  $X$  digeser ke pusat distribusi, misalnya dengan melakukan koreksi baseline (substract mean value) maka nilai rata-rata akan menjadi nol. Sehingga matriks kovarian  $S$  dapat dievaluasi sebagai

$$S_{jk} = \frac{XX^T}{N} = \left[ \frac{1}{N} X_{ij} X_{ik} \right], \quad (3)$$

$T$  merupakan tanda transpos. Matriks kovarian adalah  $3 \times 3$ , real dan simetri. Secara eksplisit,  $S$  merupakan auto- dan kros-varian dari gerakan 3 komponen, yaitu

$$S = \begin{bmatrix} S_{zz} & S_{zn} & S_{ze} \\ S_{zn} & S_{nn} & S_{ne} \\ S_{ze} & S_{ne} & S_{ee} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sumbu utama ditentukan dengan menyelesaikan aljabar nilai eigen dan vektor eigen untuk  $S$ . nilai eigen dan vektor eigen harus merupakan solusi yang tidak trivial untuk persamaan

$$(S - \lambda^2 I) u = 0, \quad (5)$$

dengan  $I$  merupakan matriks identitas  $3 \times 3$  dan  $0$  merupakan matriks kolom yang bernilai nol. Ketiga sumbu utama dari ellipsoid diberikan oleh  $\lambda_j U_j$ ,  $j=1,2$  dan  $3$  dimana vektor eigen tersebut merupakan sumbu orientasi yang panjangnya adalah  $\lambda_j$  dalam satuan amplitudo.

Setelah sumbu-sumbu utama ditentukan untuk satu window, maka azimuth arah rambat gelombang  $P$  dapat diestimasi dari gerakan horizontal yang diberikan oleh vektor eigen  $u_1$ , yang berkorespondensi dengan nilai eigen paling besar, yaitu,

$$\text{Azimut}_P = \tan^{-1} (123) \frac{U_{21} \text{sign}(U_{11})}{U_{31} \text{sign}(U_{11})} \quad (6)$$

dengan  $u_{j1}$ ,  $j=1,2,3$  merupakan ketiga kosinus arah untuk vektor eigen  $u_1$ . Sudut datang gelombang diperoleh dari cosinus arah vertikal dari  $u_1$ , yaitu,

$$\text{Inc}_P = \cos^{-1} |U_{11}| \quad (7)$$

Jika medium perambatan gelombang seismik diasumsikan homogen dan isotropik, kedalaman sumber dapat dihitung dengan menerapkan rumus Pythagoras berdasarkan arah datang dominan gelombang seismik [14], yaitu

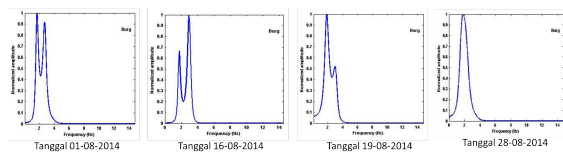
$$h = d \tan(90 - i), \quad (8)$$

dengan  $h$  adalah kedalaman sumber gelombang seismik,  $d$  merupakan jarak episenter dan  $i$  adalah sudut datang dominan gelombang (Incident angle).

## 3. Hasil dan Pembahasan

### a. Hasil

Pada penelitian ini seismometer L-4C dijadikan sebagai acuan restitusi. Sehingga, khusus untuk data pada stasiun CLK dengan seismometer L-22 yang memiliki frekuensi natural (fn) 2 Hz dilakukan restitusi atau koreksi respon instrumen untuk menyamakan respon frekuensi dengan seismometer L-4C (fn) 1 Hz. Hasil analisis frekuensi menunjukkan bahwa frekuensi dominan tremor yang terekam di Gunungapi Slamet selama periode rekaman Juli-Oktober adalah rata-rata 2,0 Hz dan 3,1 Hz. Sebelum tanggal 28 Agustus 2014 tremor memiliki frekuensi 2,0 Hz dan 3,1 Hz. Kedua puncak frekuensi



**Gambar 3** Perubahan pola daya spektrum pada tanggal yang berbeda untuk Stasiun CLK.

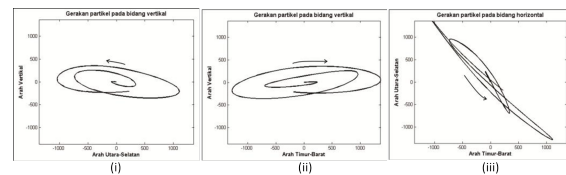
ini memiliki daya dengan dominasi yang jauh lebih tinggi dari frekuensi lain. Namun, pada tanggal itu dan setelahnya, daya untuk frekuensi 3,1 Hz berkurang dan bahkan tidak ada untuk sebagian data.

Gambar 3 memperlihatkan pola daya spektrum untuk tanggal yang berbeda. Terdapat empat pola dasar yang teramati, pertama daya frekuensi 2,0 Hz mendominasi dan diikuti oleh frekuensi 3,1 Hz. Kedua, daya frekuensi 3,1 Hz mendominasi, kemudian daya frekuensi 2,0 Hz. Ketiga, daya frekuensi 2 Hz kembali mendominasi, kemudian daya frekuensi 3 Hz. Terakhir, kondisi keempat adalah daya frekuensi 2 Hz sangat mendominasi, sementara daya frekuensi 3 Hz tidak teramati.

Kondisi pertama, yaitu kondisi dimana daya frekuensi 2,0 Hz dominan, terdapat pada data sebelum tanggal 15 Agustus 2014. Sementara kondisi kedua, dimana daya frekuensi 3,1 Hz mendominasi, terdapat pada data mulai tanggal 15 Agustus 2014 hingga tanggal 16 Agustus 2014. Kondisi ketiga terjadi mulai tanggal 17 hingga 27 Agustus 2014. Adapun kondisi keempat terjadi mulai tanggal 28 Agustus 2014.

Hasil pengolahan data dengan metode polarisasi memperlihatkan rentang variasi azimut, sudut datang, gerakan partikel (particle motion) dan hiposenter. Gambar 6 memperlihatkan bahwa sudut azimut bervariasi dari 0 derajat hingga sekitar 30 derajat, dimana dominannya berada pada azimut 20 derajat hingga 30 derajat. Menjelang adanya erupsi, yaitu erupsi lava pada tanggal 01 September 2014, data juga disertai sedikit derau atau noise yang berasal dari arah 180 derajat, noise mulai teramati mulai tanggal 29 Agustus 2014 dan semakin banyak pada hari-hari setelahnya. Adapun sudut datang gelombang yang direkam pada seismometer, nilai dominannya bervariasi mulai dari 75 hingga 85 derajat, dimana dominannya berada pada sudut 80 derajat hingga 85 derajat.

Gambar 4 menunjukkan gerakan partikel pada seismometer stasiun CLK 3-komponen. Gerakan partikel memperlihatkan adanya gelombang Rayleigh pada NE-V dan EW-V, dimana arah perambatan gelombangnya lebih jelas terlihat pada komponen NS-V yang menjalar ke utara. Gerakan partikel



**Gambar 4** Gerakan partikel yang direkam oleh seismometer 3-komponen tanggal 28 Agustus 2014

relatif konstan sepanjang perekaman. Terlihat bahwa gerakan partikel dominan berupa elips. Selain membentuk sudut terhadap sumbu mayor yaitu sudut datang, gerakan-gerakan partikel juga membentuk sudut  $\alpha$ , yaitu sudut yang dibentuk oleh sumbu vertikal dengan sumbu minor elips

#### b. Pembahasan

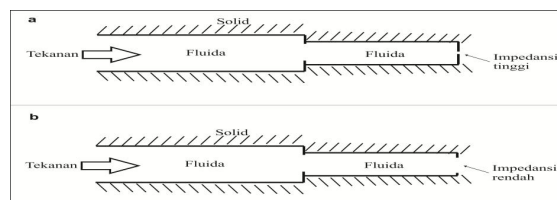
Analisis yang lebih rinci pada spektrum daya memberikan pola yang menarik, khususnya pada daya frekuensi 3,1 Hz. Pada awal-awal, daya frekuensi 2,0 Hz lebih dominan dibanding daya frekuensi 3,1 Hz, bentuk sinyal tremor pada fase ini terlihat didominasi oleh bentuk spasmodik. Pola kedua adalah, pola dimana frekuensi 3,1 Hz mendominasi, pada fase ini bentuk sinyal juga didominasi bentuk spasmodik. Pada pola ketiga, frekuensi 2,0 Hz kembali mendominasi, pada fase ketiga ini, bentuk sinyal didominasi oleh bentuk kuasi-stasioner dan atau stasioner. Pola keempat adalah sinyal kehilangan daya frekuensi 3,1 Hz. Urutan dan pola daya frekuensi ini lebih jelasnya diperlihatkan pada Gambar 3.

Pola perubahan pola perubahan daya frekuensi ini dapat diinterpretasikan dengan dinamika magma, diantaranya naiknya magma, fluktuasi magma, dan kebocoran magma ke permukaan. Pola sinyal yang spasmodik dapat disebabkan injeksi naiknya magma dari kedalaman tertentu menuju pipa magma, pada tahap ini frekuensi 2,0 Hz dominan, dominasi ini memberikan gambaran bahwa pipa penghasil 2,0 Hz berada di bawah pipa penghasil frekuensi 3,1 Hz karena tekanan dan fluktuasi lebih tinggi pada pipa bagian bawah. Keadaan dimana daya frekuensi 3,1 Hz lebih tinggi bisa dimungkinkan karena jarak pipa penghasil frekuensi ini lebih dekat ke permukaan. Selain itu, jika pipa penghasil 2,1 Hz sudah saturasi volum, magmanya akan mampat sehingga flutuasinya berkurang. Berbeda dengan pipa di bagian atasnya, yaitu pipa penghasil frekuensi 3,1 Hz, jika kondisinya belum saturasi volum magmanya akan lebih bebas bergerak sehingga memberikan gangguan yang lebih besar kepada dinding batuan di sekitarnya, sehingga total dayanya lebih besar.

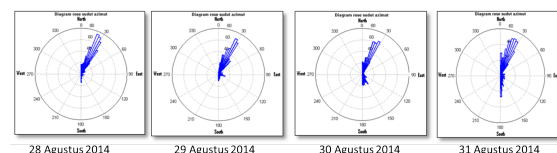
Kondisi selanjutnya adalah, kondisi dimana daya frekuensi 2,0 Hz kembali lebih besar, pada kondisi ini sinyal tremor di domain waktu cenderung lebih stasioner atau kuasi-stasioner. Keadaan ini memberikan gambaran bahwa kedua pipa penghasil frekuensi dominan telah memiliki kondisi yang sama-sama saturasi volum dan fluktuasi gerakan magma menjadi relatif konstan sehingga sinyal yang dihasilkan juga cenderung stasioner. Namun, karena dimensi pipa bawah, yaitu penghasil 2,0 Hz lebih besar, maka momentum gerakannya lebih besar sehingga dayanya juga lebih besar dibanding pipa penghasil 3,1 Hz. Penyebab yang lain adalah bocornya magma ke permukaan, sehingga total daya yang diemisikan oleh pipa bagian atas juga menjadi lebih kecil. Untuk memastikan adanya kebocoran tersebut, pada tanggal 18 Agustus 2014, terlihat ada semburan lava di puncak. Interpretasi ini sesuai dengan model yang diajukan oleh [7] dimana pipa yang memiliki dimensi lebih kecil akan menghasilkan frekuensi yang lebih tinggi dan terjadi sebaliknya, pipa yang berdimensi lebih besar akan menghasilkan frekuensi yang lebih kecil. Kondisi stasioner pada kedua pipa ini bisa terjadi jika tidak ada kebocoran, dan atau kebocoran magma masih sangat kecil dibandingkan suply magma dari bawah, sehingga gerakan yang mungkin hanya gerakan partikuler atau konveksi fluida akibat perbedaan tekanan karena adanya gradien suhu. Keadaan ini bisa terjadi jika impedansi ujung lobang bagian atas (orifis) sangat besar (Gambar 5 kondisi a).

Kondisi terakhir adalah ketika frekuensi 3,1 Hz kehilangan dayanya (Gambar 3). Kehilangan daya frekuensi ini setidaknya teramati mulai tanggal 28 Agustus 2014. Kondisi ini terjadi karena tekanan, momentum dan tenaga fluktuasi gerakan magma pada pipa yang bersangkutan berkurang drastis. Sehingga dayanya jauh lebih kecil relatif terhadap daya frekuensi 2,0 Hz yang posisi sumbernya berada di bawahnya. Saat tekanan magma sudah cukup besar, penyumbat magma akan terdorong dan terbuka sehingga impedansi orifisnya perlahan-lahan mengecil (Gambar 5 kondisi a dan b). Ketika impedansinya kecil, magma mengalami kebocoran hingga menyebabkan tekanan pada pipa berfrekuensi 3,1 Hz mengecil dan dayanya juga melemah. Saat impedansinya sangat kecil atau menuju nol, momentum magma pada pipa 3,1 Hz juga sangat kecil dibandingkan pada pipa 2,0 Hz, sehingga daya spektrum 3,1 Hz tersebut tidak teramati.

Interpretasi kehilangan daya frekuensi 3,1 Hz sebagai indikasi kebocoran magma ini dapat dikonfirmasi melalui hasil pengamatan visual erupsi Gunung Slamet. Beberapa hari setelah kehilangan



**Gambar 5** Pipa dengan dua kondisi lobang ujung (orifis) yang berbeda. (a) Impedansi tinggi sehingga kebocoran magma sangat kecil. (b) impedansi lobang sangat kecil sehingga magma mengalami kebocoran dengan jumlah yang besar



**Gambar 6** Perubahan azimuth seiring mendekati waktu erupsi

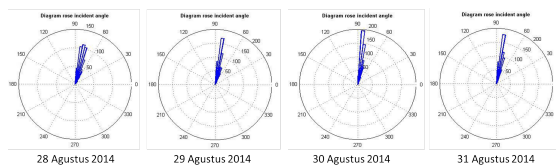
daya tersebut teridentifikasi terjadi erupsi lava pijar di puncak Gunung Slamet. Pada tanggal 28 Agustus 2014 frekuensi 3,1 Hz mulai kehilangan dayanya, kemudian pada tanggal 01 September 2014 teramati erupsi lava pijar. Artinya ada empat hari jeda waktu sejak kebocoran hingga magma mencapai puncak. Dengan demikian dapat dikatakan bahwa debit magma yang naik dari dapur magma tidak terlalu besar, yang mana jika debit suply magma besar, selang waktu kebocoran dengan erupsi di puncak tidak akan lama.

Debit naiknya magma dari dapur magma yang tidak terlalu besar kemungkinan merupakan faktor penentu karakter erupsi Gunung Slamet. Diketahui bahwa, karakter intensitas erupsi Gunung Slamet tidak terlalu besar dibandingkan gunung lain. Secara kualitatif, material yang dikeluarkan juga tidak terlalu banyak

namun periode erupsinya cenderung lebih pendek dibandingkan gunung lain. Berdasarkan sejarah letusan, periode letusannya hanya satu hingga sepuluh tahunan, dan terjadi secara terus menerus.

Seiring mendekati waktu erupsi yang terjadi pada tanggal 01 September 2014, artinya magma mulai naik ke arah puncak, terlihat bahwa besar azimuth cenderung semakin bergeser ke arah nol derajat (Gambar 6), sementara sudut datang bergeser ke arah 90 derajat (Gambar 7). Jika tremor bersumber dari gerakan magma, maka fakta ini mengarah pada kesimpulan bahwa pipa magma memiliki kemiringan, artinya pipa tidak vertikal sempurna.

Analisis gerakan partikel menunjukkan bahwa gelombang badan SH/Transversal dan gelombang



**Gambar 7** Perubahan sudut datang seiring mendekati waktu erupsi

permukaan Rayleigh juga dominan. Komponen utara seismometer stasiun CLK longitudinal (L) ke arah puncak Gunung Slamet, sementara komponen EW transversal/tangensial (T) ke arah puncak. Karena gerakan pada komponen NS merupakan manifestasi dari gelombang longitudinal dengan demikian dapat dikatakan bahwa gelombang longitudinal lebih dominan dibandingkan gelombang transversal. Lebih lanjut gelombang longitudinal pada komponen NS ini tidak lain merupakan proyeksi dari komponen Q atau gelombang P pada bidang horizontal. Sehingga dapat dikatakan bahwa gelombang P juga signifikan pada data. Gerakan partikel pada komponen NS-Vertikal menunjukkan bahwa terdapat gelombang Rayleigh yang bergerak secara retrograde (Gambar 4). Gerakan retrograde ini menunjukkan bahwa arah rambat gelombang adalah longitudinal ke utara. Mengingat bahwa gelombang Rayleigh adalah gelombang permukaan, maka kemungkinan sumber berada pada kedalaman dangkal, relatif terhadap penenerima (Maryanto. S., dkk, 2008).

#### 4. Kesimpulan

Dinamika naik dan bocornya magma ke permukaan secara empirik dapat diamati melalui pola sinyal di domain waktu dan domain frekuensi. Pola sinyal spasmodik dan stasioner, secara berurutan merepresentasikan naiknya magma dan fluktuasi gerakan magma pada pipa magma. Sementara kebocoran magma berhubungan dengan kehilangan daya dari frekuensi tertentu pada data tremor, dalam kasus ini kehilangan daya frekuensi 3,1 Hz.

Gerakan partikel memiliki pola yang konstan sepanjang data dan menunjukkan adanya gelombang Rayleigh pada komponen Longitudinal-Vertikal (NS-V) serta gelombang SH pada komponen transversal (EW). Distribusi azimut dan sudut datang gelombang juga menunjukkan pola yang konstan dan sempit. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kedalaman sumber adalah dangkal relatif terhadap seismometer 3 komponen dan juga relatif terpusat.

#### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada ketua Laboratrium Geofisika di FMIPA UGM yang telah memberi ijin untuk

menggunakan Fasilitas Lab. Penulis juga mengucapkan terimakasih kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Bandung Dr. Hetty Triastuty, dan Kementerian ESDM melalui Bapak Dr. Hendra Gunawan atas kesediannya memberikan data, sarana dan prasarana yang telah membantu pelaksanaan penelitian ini.

#### Informasi penulis

<sup>1</sup> Sekolah Tinggi Ilmu Kesehatan Senior, Jl. Jamin Ginting KM.8,5 No.13, Mangga, Medan Tuntungan, 20131 Medan, Indonesia. <sup>2</sup> Department of Physics, Universitas Gadjah Mada, Sekip Utara PO BOX BLS 21, 55281 Yogyakarta, Indonesia.

#### Pustaka

1. Reswara, A.P., Sehad: Pendugaan lapisan reservoir panas bumi di kawasan gunungapi slamet dengan memanfaatkan data anomali medan gravitasi citra satelit. *Berkala Fisika* **17** (2014)
2. Ferrick, M.G., Qamar, A., F, S.L.W.: Source mechanism of volcanic tremor. *Journal Of Geophysical Research* **87**, 8675–8685 (1982)
3. Dahm, T.: Eigenvibrations of magma-filled dyke systems with complex geometry. In: R. Schick, .M. (ed.) *Volcanic Tremor and Magma Flow*, pp. 97–114 (1991). Julich, Forschungszentrum Julich GmbH
4. Sakuraba, A., Yamauchi, H.: Linear stability of plane poiseuille flow in an infinite elastic medium and volcanic tremors. *Earth, Planets and Space* **66** (2014)
5. Eibl, E.P., I, L., Bean, C.J., Akerlie, E., Vogfjord, K.S.: Helicopter vs. volcanic tremor: Characteristic features of seismic harmonic tremor on volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **304**, 108–117 (2015)
6. Maryanto, S., Iguchi, M., Tameguri, T.: Constraints on the source mechanism of harmonic tremors based on seismological, ground deformation, and visual observations at sakurajima volcano, japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* **170** (2008)
7. Cosentino, M., Lombardo, G., Privitera, E.: A model for internal dynamical processes on mt etna. *Geophysical* **97**, 367–319 (1989)
8. Kirbani, S.B.: Analysis Of Volcanic Tremor At Mount Merapi (Central Java, Indonesia) In Order To Understand Internal Magma Flow
9. Morse, M.P., Ingard, K.U.: *Theoretical Acoustics*. Mc Graw-Hill, New York (1968)
10. Konstantinou, K.I., Schlindwein, V.: Nature, wavelfield properties and source mechanism of volcanic tremor. *Journal Of Volcanology And Geothermal Research* **119** (2002)
11. Wu, N.: *The Maximum Entropy Method*. Springer, Berlin Heidelberg (1997)
12. Ulrych, T.J., Bishop, T.N.: Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics and Space Physics* **13** (1975)
13. Jurkevics, A.: Polarization analysis of three-component array data. *Bulletin of the Seismological Society of America* **78** (1988)
14. Setiawan, A.: Pengukuran seismik tiga komponen dan analisis polarisasi kegiatan seismik gunung merapi pada saat pembentukan kubah lava tahun 1992. PhD thesis, Yogyakarta, Universtias Gadjah Mada (1993)