

## Tremor di Gunungapi Raung: Periode Krisis November-Desember 2014

Vico Luthfi Ipmawan<sup>1</sup>, Kirbani Sri Brotopuspito<sup>2</sup>, dan Hetty Triastuty<sup>3</sup>

1. Program Studi Fisika, Institut Teknologi Sumatera, Jalan Terusan Ryacudu, Lampung Selatan

2. Program Studi Fisika, Universitas Gadjah Mada, Jln. Kaliurang, Yogyakarta

3. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi, Jln. Diponegoro 57, Bandung

### **Abstract**

*Crisis period of Raung Volcano, located in East of Java, Indonesia, was started in November 2014. The seismicity of Raung Volcano was dominated by volcanic tremor. Volcanic tremor can be related with internal process of a volcano and can be a fruitful tool to understand the physical process inside the volcano. The intensity of tremor event in early crisis period is low but increases quickly then followed by the continuous tremor in the next month, December 2014. The dominant frequency of Raung volcano has range  $0,95 \pm 0,15$  Hz. We suggest that there are two resonators exciting tremor signal based on the number of peaks in Raung's tremor spectrum.*

**Keywords:** Maximum Entropy Spectral Analysis, MESA, continuous tremor

## 1. Pendahuluan

Gunungapi Raung (G. Raung) yang terletak di daerah perbatasan Kabupaten Banyuwangi, Jember, dan Bondowoso, di Provinsi Jawa Timur merupakan gunungapi tipe strato dengan tipe letusan strombolian. G. Raung beberapa tahun terakhir menjadi salah satu gunungapi di Indonesia yang sering mengalami erupsi. Setidaknya dalam kurun waktu 3 tahun terakhir terjadi 2 erupsi yaitu pada tahun 2012 dan 2015. Tanda-tanda suatu gunungapi yang akan mengalami erupsi dapat diketahui dengan pengamatan seismik yang berkelanjutan. Salah satu tandanya adalah meningkatnya aktivitas kegempaan yang bersifat lokal di gunungapi tersebut. Klasifikasi tipe-tipe gempa gunungapi dibagi dalam 4 tipe yaitu gempa tipe A, tipe B, gempa letusan, dan tremor gunungapi (selanjutnya disebut dengan tremor saja) [1].

Berdasarkan laporan bulanan pos pengamatan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), keberadaan sinyal tremor G. Raung pada periode krisis November s.d. Desember 2014 tergolong dominan dibandingkan dengan tipe gempa lain. Sinyal tremor mulai terekam pada 11 November 2014. Aktivitas G. Raung dilaporkan terus meningkat. Tanggal 13 November 2014 status G. Raung ditingkatkan menjadi level Waspada. Selama November, tremor G. Raung tercatat sebanyak 1709 kali diikuti tremor menerus yang mulai muncul di akhir November. Tremor menerus berlanjut sampai akhir Desember 2014. Keberadaan tremor yang dominan tersebut sangat berpotensi untuk memberikan informasi tentang G. Raung. Tremor dapat menjadi suatu alat yang baik untuk memahami proses fisis di dalam tubuh gunungapi [2].

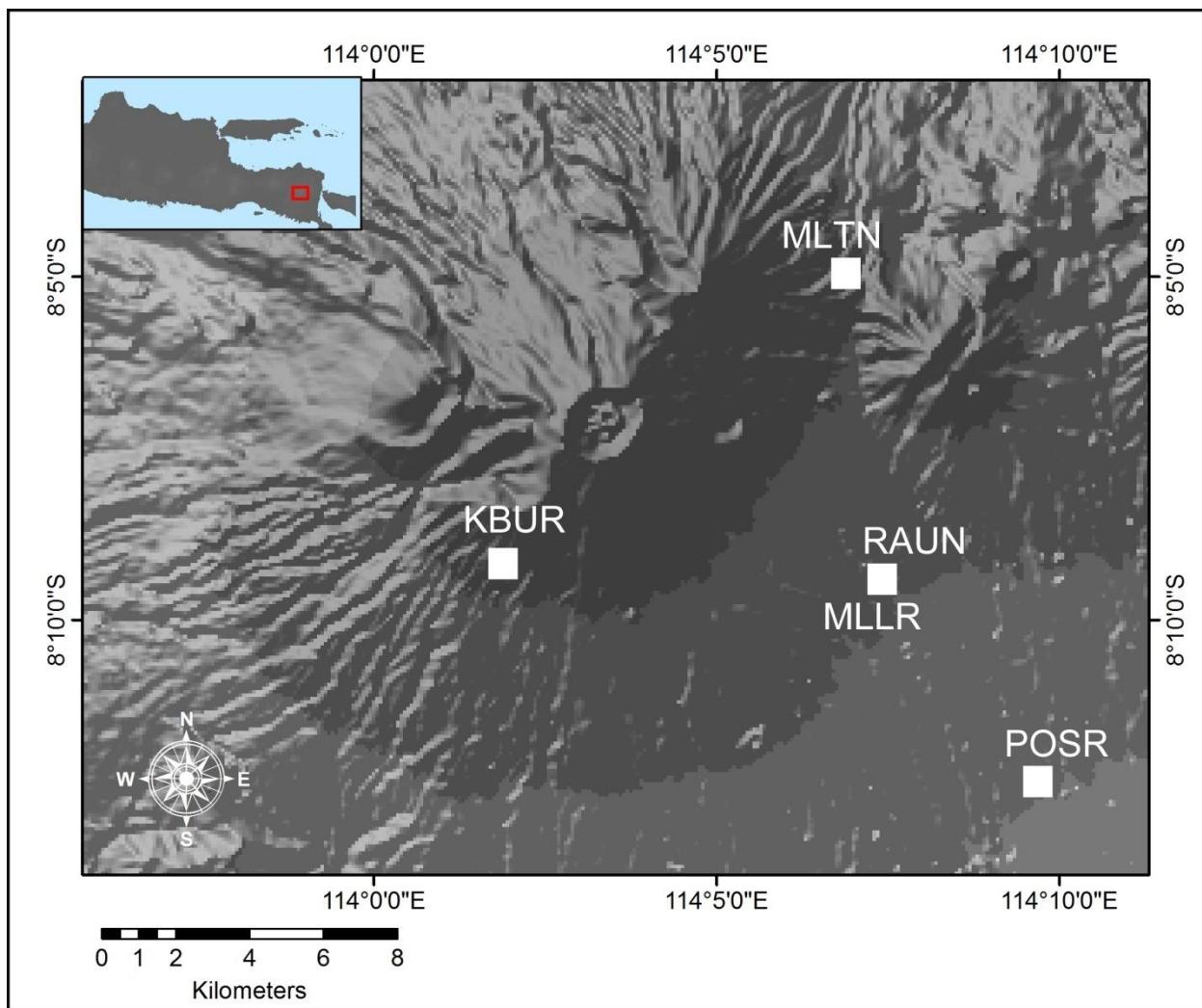
Tujuan penelitian ini adalah melihat kandungan spektral tremor G. Raung sebagai dasar interpretasi kondisi internal dalam tubuh gunung api tersebut.

## 2. Metode Penelitian

### **2.1 Pemilihan data**

Data seismik gunungapi diperoleh dari stasiun seismik G. Raung milik PVMBG. Terdapat 5 stasiun seismik dengan seismometer jenis *shortperiod* yaitu KBUR (berjarak 4 km dari puncak gunung), MLLR (6 km), RAUN (6 km), MILTN (6 km), dan POSR (14 km). Namun, data yang tersedia hanya dari 4 stasiun, yaitu KBUR, MLLR, RAUN, dan POSR. Seismometer di stasiun MILTN tidak merekam data selama rentang waktu tersebut dikarenakan rusak. Data dari stasiun POSR hanya digunakan sebagai data

pembanding untuk membedakan gempa vulkanik maupun gempa tektonik. Lokasi sebaran stasiun ditunjukan oleh Gambar 1.



**Gambar 1.** Peta sebaran stasiun yang terpasang pada G. Raung

Pemilihan data tremor didasarkan pada pengamatan visual yang dilaporkan oleh petugas PVMBG yang mengamati G. Raung. Aktivitas seperti mengeluarkan kepulan asap dengan intensitas rendah sampai sedang, terdengar gemuruh, dan terlihat cahaya api terjadi pada tanggal-tanggal tertentu selama periode krisis. Tabel 1. Menunjukkan tanggal terjadinya aktivitas-aktivitas tersebut yang dijadikan dasar pemilihan sinyal tremor.

**Tabel 1.** Tanggal kejadian aktivitas G. Raung

| No. | Tanggal          | Keterangan                                      |
|-----|------------------|---|
| 1.  | 11 November 2014 | Pertama kali muncul tremor                      |
| 2.  | 19 November 2014 | Pertama kali muncul asap putih ketinggian 200 m |
| 3.  | 30 November 2014 | Asap putih, tinggi 400 m                        |
| 4.  | 12 Desember 2014 | Terdengar gemuruh                               |
| 5.  | 25 Desember 2014 | Terlihat cahaya api                             |

## 2.2 Restitusi sinyal

Restitusi sinyal diterapkan pada data tremor G. Raung untuk menghilangkan efek instrumentasi. Seismometer dapat dianggap sebagai suatu filter untuk masukan sinyal seismik. Hubungan antara input dan output pada sistem seismometer dapat dituliskan dalam kawasan frekuensi sebagai berikut

$$O(\omega) = T(\omega)I(\omega) \quad (1)$$

dengan  $I(\omega)$  merupakan input sinyal seismik,  $O(\omega)$  merupakan sinyal yang terekam (output), dan  $T(\omega)$  merupakan fungsi tanggapan frekuensi (*frequency response function*). Sehingga sinyal asli (input) dapat dicari dengan cara

$$I(\omega) = \frac{O(\omega)}{T(\omega)} \quad (2)$$

Fungsi tanggapan frekuensi dapat ditulis dalam bentuk *poles* dan *zero* [3]

$$T(\omega) = Y \frac{(i\omega - z_1)(i\omega - z_2)(i\omega - z_3)\dots}{(i\omega - p_1)(i\omega - p_2)(i\omega - p_3)\dots} \quad (3)$$

dengan  $p$  mewakili *poles*,  $z$  mewakili *zero*, dan  $Y$  merupakan konstanta normalisasi. *Poles* dan *zero* dapat diketahui dari manual produk seismometer yang digunakan.

## Metode Maximum Entropy Spectral Analysis (MESA)

Metode MESA digunakan untuk menganalisis sinyal yang telah direstitusi. Konsep entropi berhubungan dengan ketidakpastian dan keacakan suatu sistem yang mengirimkan informasi. Entropi  $H$  dapat dituliskan sebagai [4]

$$H = - \int_{-\infty}^{\infty} p(x) \log p(x) dx \quad (4)$$

dengan  $p(x)$  mewakili fungsi densitas kemungkinan suatu runtun waktu  $x$ ,  $\int$  mewakili suatu jumlah tak hingga dari  $-\infty$  ke  $+\infty$ . Persamaan (4) dapat dituliskan dalam domain frekuensi menjadi

$$H = \int \log S(f) df \quad (5)$$

dengan  $S(f)$  mewakili densitas spektrum daya (*power spectrum density*) runtun waktu,  $f$  mewakili frekuensi, dan batas integral pada keseluruhan pita frekuensi. Masalah yang harus diselesaikan pada persamaan (5) merupakan permasalahan maksimasi kendala. Besaran yang harus dimaksimasi adalah entropi  $H$ , dan kendala berasal dari runtun waktu parsial atau fungsi autokorelasinya. Dengan menggunakan metode pengali Lagrange, dihasilkan solusinya [4]

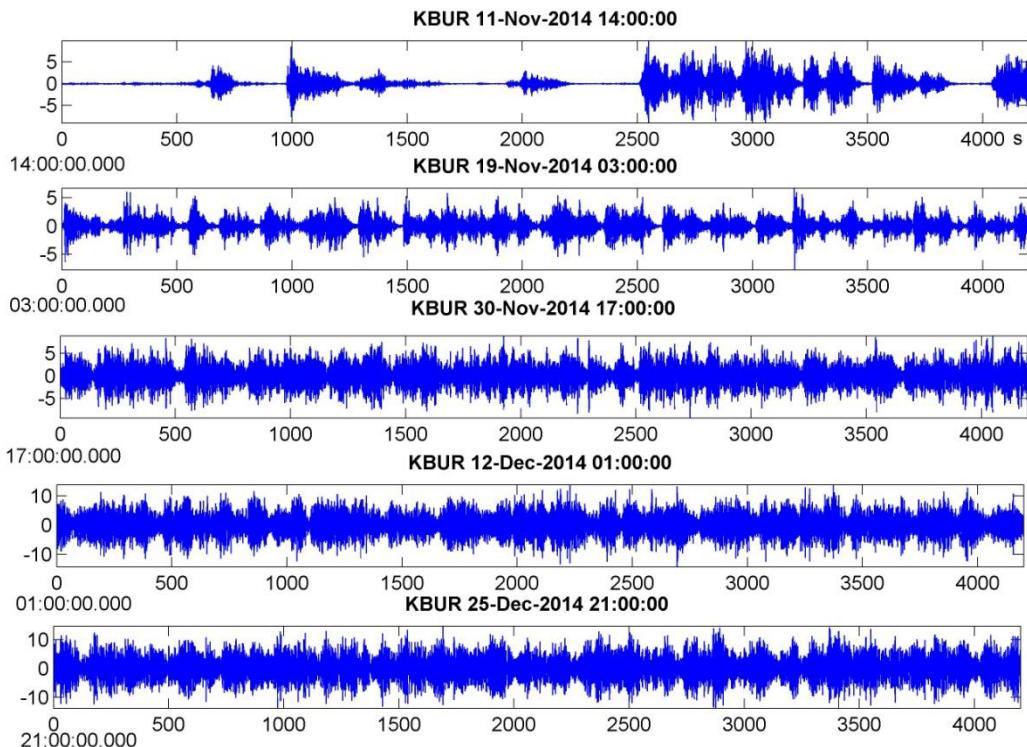
$$S(f) = \frac{P_M}{\left| \sum_{k=0}^M a_k \exp(-2\pi ifk) \right|^2} \quad (6)$$

dengan  $i = \sqrt{-1}$ ,  $p_M$  merupakan daya dari kesalahan prediksi (power of error prediction), dan  $a_k$  merupakan koefisien filter kesalahan prediksi dengan  $a_0 = 1$ . MESA dapat digunakan untuk menghasilkan estimasi daya spektrum dengan puncak yang tajam meskipun dengan sedikit data. Hasil spektrum dari MESA tidak bergantung pada banyak sedikitnya data.

### 3. HASIL DAN ANALISIS

Sinyal tremor pada tanggal 11, 19, dan 30 November 2014 serta 12 dan 25 Desember 2014 dipilih untuk diketahui kandungan spektralnya dengan metode MESA. Sebelum analisis spektral dilakukan, terlebih dahulu diterapkan restitusi sinyal pada tremor yang akan dianalisis. Koreksi ini diperlukan sebab frekuensi instrumen yang terpasang berbeda pada masing-masing stasiun seismik G. Raung. Pada stasiun RAUN, KBUR, POSR terpasang seismometer L4C dengan frekuensi 1 Hz sedangkan MLLR terpasang seismometer L22D dengan frekuensi 2 Hz.

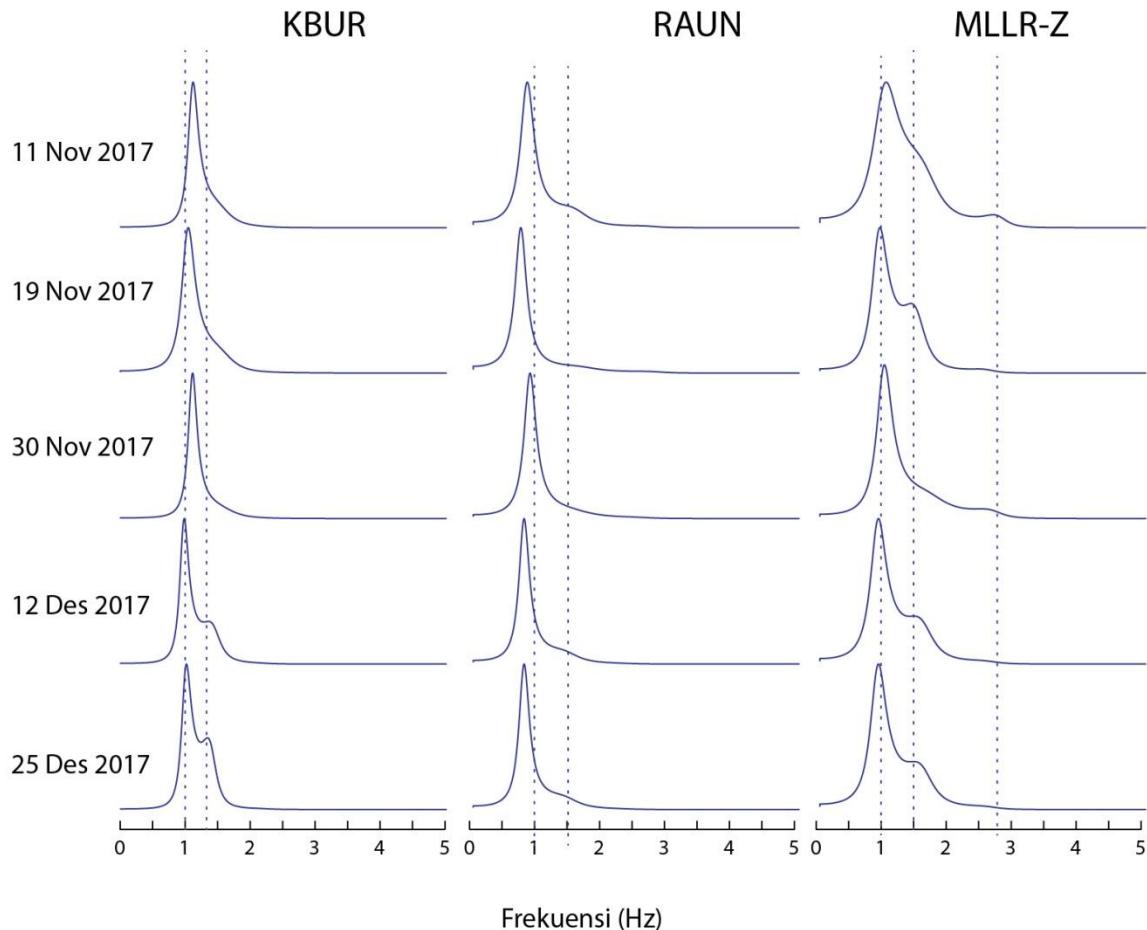
Perubahan sinyal tremor sepanjang 4200 detik di stasiun KBUR pada tanggal 11, 19, dan 30 November 2014 serta 12 dan 25 Desember 2014 diperlihatkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Intensitas kejadian tremor G. Raung pada tanggal 11 November 2014 paling rendah (paling atas). Tremor G. Raung berubah kontinu mulai dari tanggal 30 November 2014 s.d. akhir bulan Desember 2014.

Analisis MESA diterapkan pada rekaman sepanjang 70 menit di semua tanggal yang dipilih dengan parameter jumlah poles adalah 40. Perubahan bentuk spektral tremor G. Raung pada tanggal-tanggal yang telah disebutkan dan dikelompokkan berdasarkan masing-masing stasiun disajikan pada Gambar 3. Rekaman yang digunakan dalam analisis ini hanya rekaman dari KBUR, RAUN, dan MLLR komponen Z, (MLLR-Z). Rekaman dari stasiun MLTN tidak digunakan karena seismometer pada stasiun tersebut mengalami kerusakan. Hasil analisis MESA menunjukkan bahwa terdapat konsistensi frekuensi dominan di seluruh stasiun dan pada seluruh tanggal yaitu di sekitar  $0,95 \pm 0,15$  Hz. Pada beberapa tanggal, seperti tanggal 12 dan 25 Desember 2014 terdapat puncak frekuensi lain di sekitar 1,4 Hz di spektral

KBUR. Kemunculan puncak frekuensi kedua juga terjadi di stasiun MLLR-Z yaitu di sekitar 1,5 Hz. Frekuensi puncak di sekitar 1,5 Hz ini selalu muncul di MLLR-Z kecuali pada tanggal 30 November 2014. Nilai frekuensi dominan pada masing-masing spektral disajikan dalam Tabel 2



**Gambar 3.** Sebanyak 15 spektrum dengan menggunakan metode MESA disajikan berdasarkan tanggal dan stasiun di G. Raung.

**Tabel 2.** Frekuensi dominan spektral tremor G. Raung berdasarkan tanggal dan stasiun

| Tanggal<br>Stasiun \ | 11 Nov 2017 | 19 Nov 2017 | 30 Nov 2017 | 12 Des 2017 | 25 Des 2017 |
|----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| KBUR                 | 1,1 Hz      | 1,1 Hz      | 1,1 Hz      | 1 Hz        | 1 Hz        |
| RAUN                 | 0,8 Hz      | 0,8 Hz      | 0,9 Hz      | 0,8 Hz      | 0,8 Hz      |
| MLLR-Z               | 1 Hz        | 0,9 Hz      | 1 Hz        | 0,9 Hz      | 0,9 Hz      |

### **Hubungan Aktivitas Seismik Raung dengan Pengamatan Visual**

Aktivitas seismik G. Raung terlihat semakin meningkat dan sebanding dengan peningkatan aktivitas yang teramat secara visual, mulai dari keluarnya asap, terdengar gemuruh, dan terlihat cahaya api di sekitar kawah. Tremor G. Raung mulai terlihat pada tanggal 11 November 2014. Kemunculan tremor masih sangat jarang (Gambar 2). Asap putih teramat dari pos pengamatan G. Raung pada tanggal 19 November 2014 dengan ketinggian sekitar 200 m. Sinyal tremor mulai meningkat intensitasnya meskipun sinyal tidak kontinyu. Sinyal tremor berubah menjadi tremor menerus (*continuous tremor*) mulai pada akhir November 2014. Aktivitas seismik G. Tremor meningkat. Pada tanggal 30 November 2014 asap putih keluar dari kaldera G. Raung dengan ketinggian sekitar 400 m dan teramat dari Pos Pengamatan Raung. Sampai bulan Desember tremor menerus masih berlangsung, aktivitas kegunungan semakin beragam seperti terdengar gemuruh pada tanggal 12 Desember 2014 dan terlihat cahaya api pada tanggal 25 Desember 2014. Kemungkinan pada tanggal tersebut telah terjadi erupsi strombolian yang menyebabkan kawah terlihat berpendar dari pos observasi G. Raung.

Perubahan spektrum berdasarkan tanggal dan stasiun secara keseluruhan memiliki kisaran nilai yang sama untuk frekuensi dominannya yaitu disekitar  $0,95 \pm 0,15$  Hz. Spektrum di stasiun RAUN sedikit lebih rendah nilai frekuensi dominannya dibandingkan di stasiun MLLR dan KBUR. Kemungkinan perbedaan ini diakibatkan oleh efek tempat mengingat koreksi intrumentasi telah dilakukan. Medium yang berbeda dapat menjadikan spektrum berbeda pula.

Secara keseluruhan puncak-puncak spektrum yang muncul ada tiga (Gambar 3). Puncak pertama ada di kisaran  $0,95 \pm 0,15$  Hz (paling dominan). Puncak kedua ada di kisaran  $1,4 \text{ s.d.} 1,5$  Hz yang terlihat di stasiun KBUR pada 12 dan 19 Desember 2014 dan terlihat di MLLR-Z di seluruh tanggal kecuali tanggal 30 November 2104. Puncak ketiga dengan ketinggian jauh lebih rendah muncul di staisun KBUR pada tanggal 11 dan 30 November 2014 dan memiliki nilai di kisaran 2,8 Hz.

### **Kondisi Internal Gunungapi Raung**

Dengan mengasumsikan bahwa setiap puncak frekuensi dihasilkan oleh sebuah resonator, maka puncak-puncak frekuensi yang berbeda tersebut dapat diinterpretasikan berasal dari resonator yang berbeda pula. Kami menduga bahwa di G. Raung setidaknya terdapat dua resonator menghasilkan sinyal tremor tersebut. Resonator tersebut bisa berupa kantong magma, pipa magma atau dike. Kami juga menduga bahwa puncak ketiga dikisaran 2,8 Hz merupakan *overtones* dari puncak pertama. Dugaan ini didasari bahwa tremor quasi-harmonis telah dilaporkan muncul di awal periode krisis 2014 G. Raung [5].

Frekuensi sinyal dari tremor dapat memberikan gambaran letak dan ukuran suatu resonator [6]. Resonator yang menghasilkan frekuensi  $0,95 \pm 0,15$  Hz dapat diinterpretasikan memiliki ukuran relatif lebih besar daripada resonator yang menghasilkan frekuensi  $1,4 \text{ s.d.} 1,5$  Hz. Berdasarkan letaknya maka resonator yang menghasilkan frekuensi  $0,95 \pm 0,15$  Hz dapat diinterpretasikan pula memiliki letak relatif lebih dalam daripada resonator yang menghasilkan frekuensi  $1,4 \text{ s.d.} 1,5$  Hz.

Resonator dalam G. Raung dapat dimodelkan sebagai pipa magma yang terisi fluida dengan letak yang lebih dangkal dan lebih kecil menghasilkan frekuensi puncak pertama  $0,95 \pm 0,15$  Hz yang terhubung kantong magma berukuran lebih besar dengan letak yang lebih dalam sebagai resonator frekuensi puncak kedua.

### **4. Kesimpulan**

Berdasarkan analisis spektrum pada tremor G. Raung dapat disimpulkan bahwa aktivitas G. Raung sebanding dengan aktivitas seismisitasnya. Nilai frekuensi dominan tremor G. Raung bernilai pada kisaran  $0,95 \pm 0,15$  Hz. Puncak-puncak spektral tremor G. Raung mengindikasikan terdapat dua resonator yang meghasilkan sinyal tremor. Resonator puncak frekuensi pertama terletak pada letak yang lebih dalam dan berukuran lebih besar relatif dengan resonator puncak frekuensi kedua.

## **5. Penghargaan**

Ucapan terimakasih disampaikan penulis kepada PVMBG yang telah menyediakan data dan membantu terlaksanakannya penelitian ini.

## **6. Daftar Pustaka**

- [1] Minakami, T., "Seismology of volcano in Japan", Civetta, L., Gasparini, P., Luongo, G., and Rapolla, A., *Physical Volcanology*, Amsterdam: Elsevier, 1974, pp. 127-131.
- [2] Konstantinou, K. & Schlindwein, V. "Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: a review", *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 119, pp. 161-187, July 2002.
- [3] Havskov, J. and Alguacil, G., "Instrumentation in earthquake seismology", Dordrecht: Springer, 2010, pp.167-171.
- [4] Wu, N., "The Maximum Entropy Method" (translated by T. S. Huang), Berlin: Springer-Verlag, 1997, pp.11-32
- [5] Ipmawan, V.L., Brotopuspito, K.S., and Triastuty, H., 2018. Gliding and Quasi-harmonic Tremor Behaviour of Raung Volcano: November 2014 Crisis Period Case Study. *Indonesian Journal on Geosciences*, 5 (1), p.13-21. DOI: 10.17014/ijog.5.1.13-21
- [6] Cosentino, M., Lombardo, G., Privitera, E.: A model for internal dynamical processes on mt etna. *Geophysical* 97, 367–319 (1989)