

Seismic Analysis of Ambient Noise Volcanic Earthquake on Mount Agung Analisis Seismik Ambient Noise Gempa Vulkanik Pada Gunung Agung

Reni Agustiani^{*1}, Bagus Jaya Santosa², Yasa Suparman³, Devi K.Syahbana⁴

¹Program Studi Fisika, Universitas Palangka Raya, Indonesia

²Jurusan Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

^{3,4}Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Gunung Api, Indonesia

Article Info

Submitted:

01/04/2023

Accepted:

02/04/2023

Approved:

10/04/2023

Published:

29/04/2023.

ABSTRAK

Gunung Agung adalah salah satu jenis gunung berapi strato yang terletak di Provinsi Bali. Letusan Gunung Agung yang terekam pada 25 November 2017 merupakan bencana besar bagi masyarakat yang tinggal di sekitar gunung tersebut. Letusan tersebut terjadi akibat meningkatnya aktivitas seismik di tubuh Gunung Agung. Oleh karena itu, perlu dilakukan pemantauan aktivitas Gunung Agung. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis data seismik kebisingan sekitar untuk mengetahui peningkatan aktivitas sebelum dan selama erupsi Gunung Agung. Variasi kecepatan semu akibat korelasi sinyal seismik kebisingan sekitar yang terekam pada dua sensor seismik. Hal itu dapat mencerminkan perubahan tekanan dan elastisitas medium dengan mengasumsikan bahwa struktur bawah permukaan bersifat isotropis homogen dan sifat fisik batuan dianggap sama, terutama pada medium dekat permukaan tubuh Gunung Agung. Pola variasi kecepatan semu $((\partial v)/v)$ pada peningkatan aktivitas Gunung Agung menurun 15-100 hari sebelum erupsi dan mengalami penurunan nilai $((\partial v)/v)$ secara kontinyu selama proses erupsi di bulan November 2017 - Januari 2018.

Kata Kunci: Seismik Kebisingan Sekitar, Variasi Kecepatan Semu, Gunung Agung, Gempa Vulkanik.

ABSTRACT

Agung Vulcano is a type of strato volcano located in the Province of Bali. The eruption of Agung volcano recorded on 25 November 2017 is a major hazard for people living around the mountain. The eruption occurred due to increased seismic activity in the body of Mount Agung. Therefore, it is necessary to monitor the activity of Agung volcano. The method used in this study is an analysis of ambient noise seismic data to determine the increase in activity before and during the eruption of Mount Agung. Variation of apparent speed as a result of the correlation of ambient noise seismic signals recorded on two seismic sensors. That can reflect changes in pressure and elasticity of the medium by assuming that the subsurface structure is isotropically homogeneous and the physical properties of the rocks are considered to be the same, especially in the medium near the surface of the body of Agung volcano. The pattern of apparent velocity variation $((\partial v)/v)$ in the increase in Mount Agung activity decreased 15-100 days before the eruption and experienced a continuous decrease in value $((\partial v)/v)$ during the eruption process in November 2017 - January 2018.

Keywords: Ambient Noise Seismic, Apparent Velocity Variation, Mount Agung, Volcanic Earthquake.

PENDAHULUAN

Gunung Agung merupakan gunungapi aktif terbesar di Pulau Bali dengan tipe strato yang dapat memiliki letusan dari kawah pusat ke bagian atas. Hal ini membuat Gunung Agung sangat berbahaya bagi

masyarakat yang tinggal di sekitarnya ketika mengalami erupsi. Erupsi Gunungapi adalah letusan yang mengeluarkan material gunungapi berupa gas, debu, aliran lava, fragmen batuan dan lain-lain (Brenguier dkk., 2008). Gunung Agung yang telah lama berhenti bererupsi sejak 27 Januari 1964,

* Correspondence Address

E-mail: reniagustiani@mipa.upr.ac.id

namun pada tanggal 10 Agustus 2017 mulai menunjukkan aktivitas gempa vulkanik dan tektonik. Aktivitas tersebut semakin meningkat hingga mengalami erupsi pertama kali pada November 2017. Frekuensi erupsi ini terus mengalami fluktuasi peningkatan dan terjadi penurunan pada akhir Januari 2018.

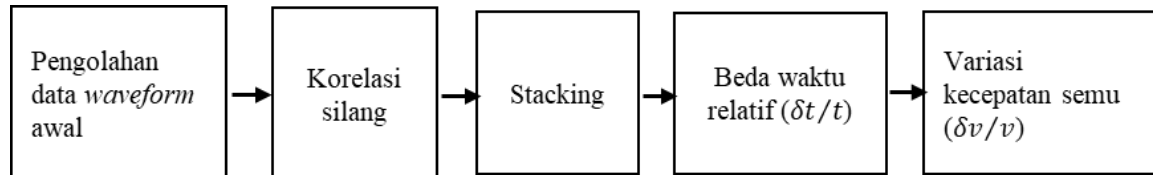
Pemantauan aktivitas Gunung Agung dilakukan dengan pengamatan secara visual dan instrumental untuk mengetahui karakteristik aktivitas dan identifikasi prekursor erupsi. Mengingat adanya kendala utama di Indonesia pada umumnya dan khususnya di wilayah sekitar Gunung Agung yaitu keterbatasan jumlah stasiun seismik untuk pemantauan aktivitas dan prediksi gunungapi yang dipasang dalam kurun waktu yang lama, maka analisis data pemantauan kegempaan dengan memanfaatkan jumlah stasiun yang terbatas serta waktu pengolahan yang relatif singkat perlu dilakukan.

Pada penelitian ini telah dilakukan analisis terhadap variasi kecepatan semu sebagai hasil korelasi silang seismik ambient noise untuk mengetahui pola variasi kecepatan semu pada peningkatan aktivitas

Gunung Agung menjelang erupsi dan saat erupsi. Pemantauan terhadap gelombang coda sebagai hasil korelasi silang ambient noise adalah suatu metoda untuk memprediksi terjadinya erupsi gunungapi dengan memanfaatkan jumlah stasiun yang terbatas (Duputel dkk., 2009), karena noise seismik direkam secara terus menerus dan tidak tergantung pada sumber gempa (Clarke dkk., 2011). Hasil dari korelasi silang adalah parameter variasi kecepatan seismik semu yang berkaitan dengan perubahan tegangan yang disebabkan oleh tekanan magmatik dan elastisitas medium sehingga dapat memberikan informasi tentang proses dinamik gunungapi (Obermann dkk., 2013). Nilai variasi kecepatan semu mengalami penurunan saat terjadinya peningkatan aktivitas gunungapi (Brenguier dkk., 2007).

METODE

Variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) diperoleh dari data seismik *ambient noise* yang diolah menggunakan *software* MSNoise dan dilakukan seperti diagram alir pada Gambar 5 berikut:



Gambar 5. Diagram alir pengolahan variasi kecepatan semu

Gambar 5 dapat dijelaskan bahwa pengolahan data *waveform* dalam format miniSEED dilakukan dengan beberapa tahapan sebagai berikut:

1. *Demean* yaitu proses pengurangan sinyal dengan nilai rata-rata sinyal sehingga perbedaan/*offset* terhadap nilai nol dapat dihilangkan dan nilai rata-rata sinyal dikembalikan pada nilai nol.
2. *Merging* merupakan proses penggabungan sinyal menjadi sinyal dengan panjang 24 jam. Apabila panjang sinyal kurang dari 24 jam maka akan ditambahkan nilai nol untuk mengisi kekosongan data, dan apabila panjang sinyal lebih dari 24 jam maka sinyal akan dipotong menjadi panjang 24 jam.
3. *Filtering* menggunakan filter bandpass Butterworth dengan rentang frekuensi

0,01 - 8 Hz. Proses ini dilakukan untuk menghindari frekuensi rendah yang disebabkan oleh variasi temperatur dan tekanan.

4. *Resampling* dengan data *waveform* dengan *sampling rate* 100 Hz di *sampling* ulang menjadi 20 Hz. Hal ini dilakukan untuk memperkecil ukuran data sehingga lebih cepat dalam proses pengolahan data.
5. Normalisasi dalam domain waktu dan frekuensi dilakukan untuk menghilangkan atau mengurangi sinyal gempabumi; gangguan maupun sinyal yang bersifat nonstasioner lainnya. Normalisasi dalam domain waktu dilakukan dengan *clipped waveform* dengan ambang tiga kali RMS (*Root Means Squared*) sinyal dan dalam domain frekuensi diaplikasikan pemutihan

(whitening) frekuensi pada rentang frekuensi 0,1 - 1,0 Hz.

Clarke (2011) menyebutkan bahwa koreksi instrument tidak dilakukan untuk menghitung variasi kecepatan semu dari pasangan seismometer yang sama. Karena instrument yang digunakan pada ketiga stasiun adalah sama yaitu LC4 maka koreksi instrument tidak diperlukan. Fungsi korelasi silang dihitung pada domain frekuensi pada tiap pasangan stasiun seismik. Untuk sejumlah N stasiun, maka akan terdapat M pasang stasiun yang akan di korelasi silang, dimana M diformulasikan sebagai berikut:

$$M = N \times (N - 1) / 2 \quad (1)$$

Stacking merupakan proses penjumlahan *trace-trace* dalam satu *gather* data yang bertujuan untuk mempertinggi rasio sinyal terhadap noise. Dengan proses *stacking* maka sinyal yang koheren akan terkuatkan dan sinyal yang tidak koheren akan diperlemah. Prinsip dasar dari monitoring variasi kecepatan adalah membandingkan fungsi korelasi silang *current* (CC_{CUR}), yang mencerminkan kondisi media pada waktu tertentu, dengan fungsi referensi (CC_{REF}), yang merupakan kondisi normal dari media. Tahap awal adalah menentukan fungsi referensi (CC_{REF}), yang diperoleh dengan melakukan *stacking* seluruh fungsi korelasi silang di tiap pasangan stasiun pada selang waktu referensi. Tiap pasangan stasiun akan mempunyai satu CC_{REF} .

Perhitungan variasi kecepatan semu dilakukan berdasarkan perhitungan perbedaan waktu relatif ($\delta t/t$) antara CC_{CUR} dengan CC_{REF} menggunakan metoda *Moving Window Cross Spectrum* (Clarke dkk., 2011). Perbedaan waktu relatif antara CC_{REF} dan CC_{CUR} diperoleh dari regresi linier perbedaan waktu (δt) pada masing-masing jendela. Lecocq dkk. (2014) menyarankan untuk tidak melakukan perhitungan perubahan waktu pada lag time sekitar nol untuk menghindari interferensi gelombang langsung, seperti gelombang balistik (Duputel dkk., 2009), karena gelombang tersebut sangat sensitif terhadap perubahan posisi sumber (Froment dkk., 2010).

Hubungan antara perbedaan waktu relatif ($\delta t/t$) dengan variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) pada media yang homogen adalah

(Ratdomopurbo dan Poupinet, 1995 dalam Lecocq dkk., 2014):

$$\delta v/v = -\delta t/t \quad (2)$$

Kesesuaian dari hasil perhitungan variasi kecepatan relatif ditunjukkan oleh nilai error kecil pada setiap pasangan stasiun seismik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

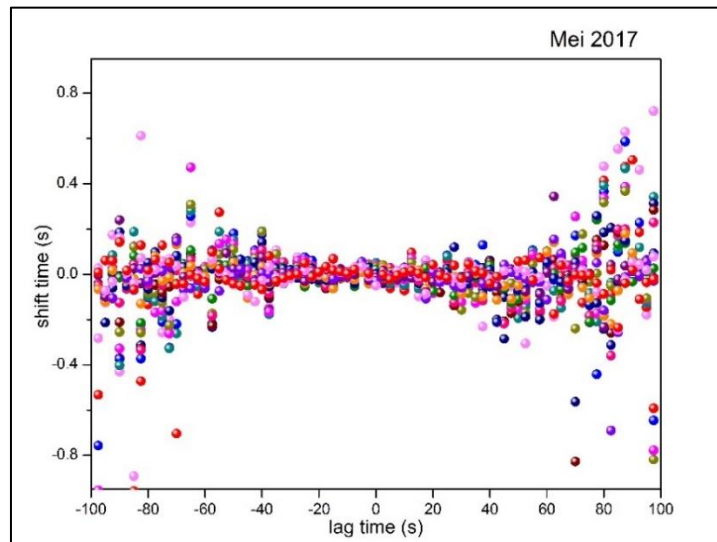
Pada prinsipnya analisis variasi kecepatan semu adalah membandingkan antara fungsi korelasi silang pada CC_{REF} yang mencerminkan kondisi media pada kondisi normal dengan fungsi korelasi silang dengan CC_{CUR} yang mencerminkan kondisi media pada waktu tertentu. Jumlah pasangan stasiun yang dihasilkan oleh tiga stasiun yang digunakan dalam penelitian yaitu BTR-TMKS, BTR-PSAG, dan PSAG-TMKS. Penentuan CC_{REF} dilakukan dengan memilih jumlah harian gempa yang terekam relatif sedikit, pada penelitian diambil 16 hari yaitu tanggal 2-17 Mei 2017. Jendela *stacking* yang digunakan yaitu 1-20 hari dan menunjukkan kesuaian yang baik pada ≥ 10 hari sehingga pada penelitian digunakan jendela *stacking* CC_{CUR} 10 hari dengan rentang frekuensi 0,5 - 1 Hz untuk perhitungan $\delta t/t$.

Lebar jendela untuk menghitung δt adalah 5 detik. Hasil perhitungan δt ditunjukkan pada Gambar 6 yang memperlihatkan nilai δt yang acak pada jendela lag time kurang dari -60 sekon dan lebih dari 60 sekon. Sehingga pada penelitian ini perhitungan $\delta t/t$ dengan mwcs dilakukan pada jendela lag time ± 5 sekon hingga ± 60 sekon untuk menghindari interferensi gelombang langsung tersebut. Selain itu digunakan parameter lain dalam perhitungan yaitu δt maksimum sebesar 0,8 sekon dan error maksimum sebesar 0.1 sekon.

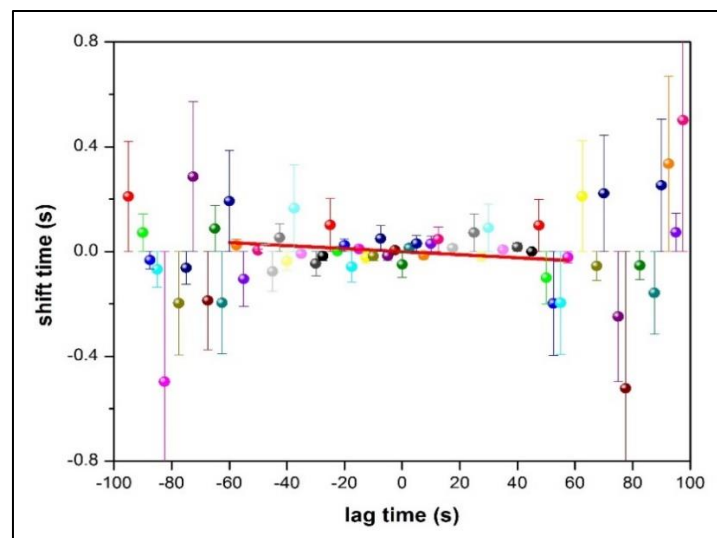
Gambar 7. menunjukkan nilai δt dan erornya serta garis merah yang menunjukkan hasil regresi linier pada lag time ± 5 sekon hingga ± 60 sekon untuk memperoleh nilai $\delta t/t$. Penurunan variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) pada media homogen sebanding dengan perbedaan waktu relatif ($\delta t/t$). Sehingga semakin besar nilai ($\delta t/t$) maka semakin turun nilai ($\delta v/v$). Nilai variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) pada tubuh Gunung Agung pada tiap pasang stasiun seismik

ditunjukkan pada Gambar 8. Variasi kecepatan semu dapat menunjukkan adanya penambahan tekanan pada tubuh Gunung Agung yang menyebabkan penambahan retakan pada tubuh gunung yang diakibat oleh salah satunya pergerakan fluida magma menuju permukaan. Semakin mengalami

penurunan nilai $\delta v/v$ artinya semakin terjadi peningkatan tekanan pada tubuh gunung tersebut. Hal ini dikarenakan *shift time* atau waktu tunda antara perbandingan fungsi korelasi silang CC_{REF} dengan CC_{CUR} semakin besar.



Gambar 6. Nilai δt antara CC_{CUR} dan CC_{REF} pada selang waktu referensi



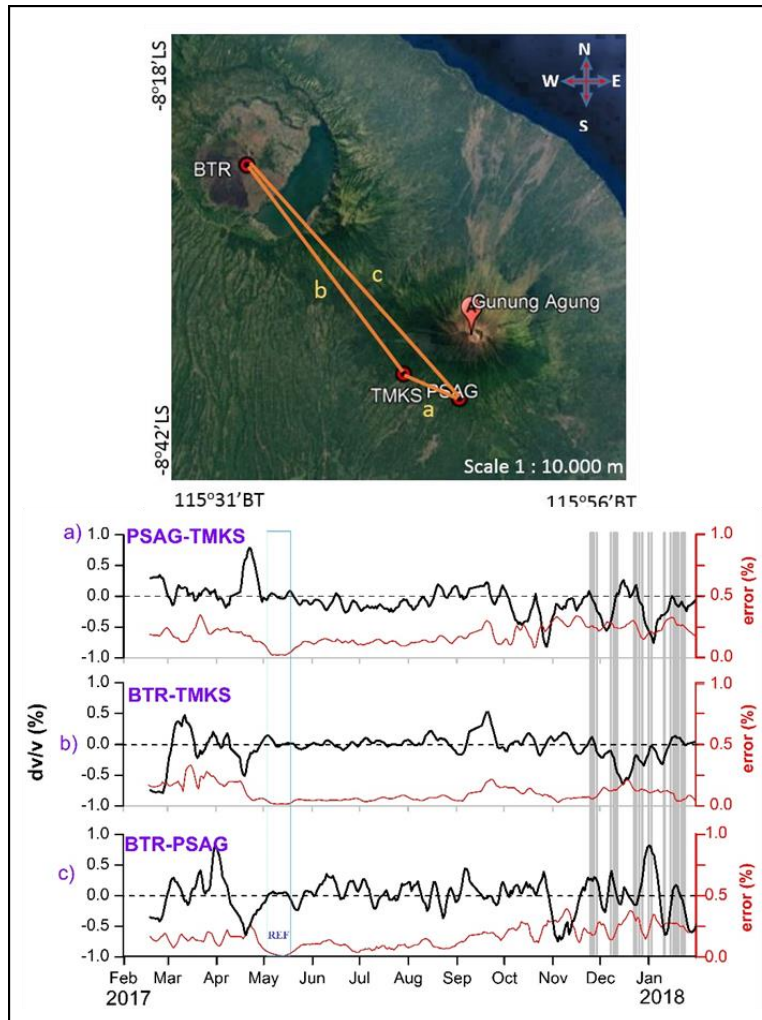
Gambar 7. Nilai δt , *error* δt (error bar), dan hasil regresi linier (garis merah)

Pada ketiga pasangan stasiun seismik (Gambar 8) nilai $\delta v/v$ pada selang waktu referensi hampir mendekati nol atau tidak ada variasi kecepatan dengan nilai eror yang sangat kecil. Penurunan nilai $\delta v/v$ pasangan stasiun PSAG-TMKS mengalami penurunan yang menerus pada Oktober 2017 hingga Januari 2018. Nilai $\delta v/v$ yang teramati sejak September 2017 mengalami fluktuasi pada pasangan stasiun BTR-TMKS dan mengalami

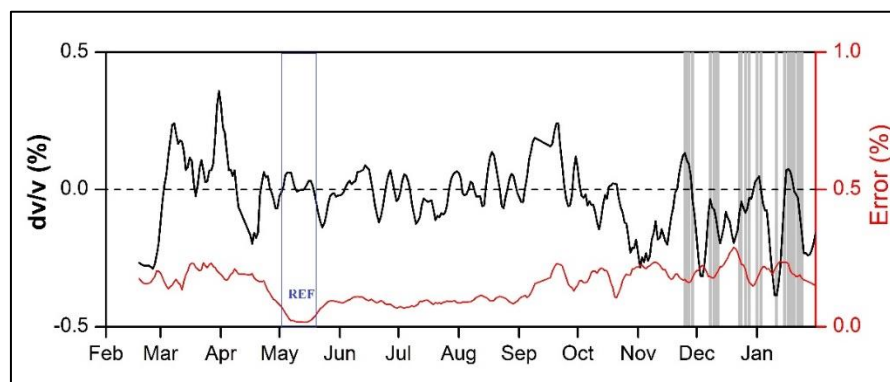
penurunan yang tajam pada akhir November 2017. Sedangkan pada pasangan stasiun BTR-PSAG mengalami fluktuasi nilai $\delta v/v$ sejak Juli 2017 dan mengalami penurunan yang signifikan pada akhir Oktober 2017. Nilai eror juga teramati meningkat pada saat terjadinya erupsi pada akhir November 2017 sampai Januari 2018. Brenguier dkk. 2008 mengatakan bahwa akurasi dari regresi linier pada perhitungan variasi kecepatan semu akan

meningkat dengan melakukan perata-rataan nilai δt pada semua pasangan stasiun. Dengan demikian dilakukan perata-rataan nilai δt pada ketiga pasangan stasiun (Gambar 9) dan memperlihatkan penurunan nilai $\delta v/v$ sejak

September 2017, sekitar 60 hari sebelum terjadinya erupsi pada 25 November 2017. Waktu terjadinya erupsi digambarkan oleh garis-garis berwarna abu-abu (Gambar 8 dan 9).



Gambar 8. Variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) setiap pasang stasiun. Bagian atas merupakan lintasan variasi kecepatan semu. Bagian bawah merupakan nilai variasi kecepatan semu dan erornya. Kotak biru merupakan selang waktu referensi. Garis abu-abu menunjukkan waktu erupsi



Gambar 9. Nilai rata-rata variasi kecepatan semu dan erornya dari ketiga pasangan stasiun. Garis abu-abu menunjukkan waktu erupsi. Kota biru merupakan selang waktu referensi.

Rentang frekuensi yang digunakan pada fungsi korelasi silang pada penelitian ini adalah 0,5 – 1 Hz sehingga penetrasi dari sensitivitas perubahan kecepatan yang dihasilkan akan lebih dangkal dari 2,5 km. Hal ini menyebabkan penurunan nilai $\delta v/v$ hanya akan didominasi oleh pengaruh peregangan atau dilatasi medium perambatan gelombang dibandingkan pengaruh dari intrusi magma. Penurunan nilai $\delta v/v$ yang menerus menunjukkan peningkatan tekanan akibat intrusi magma berupa pelepasan gas, migrasi magma, atau aktivasi rekahan kembali yang mengakibatkan akumulasi tekanan pada kondukt dalam jangka waktu yang lama. Fluktuasi $\delta v/v$ dipengaruhi oleh jarak pasangan stasiun terhadap lokasi tekanan dan kompaksi medium.

Semakin kompak suatu medium dan semakin jauh dari lokasi tekanan maka perubahan kecepatan relatif akan semakin mendekati nol. Tekanan yang terlokalisasi pada area tertentu akan mengakibatkan turunnya nilai $\delta v/v$ pada pasangan stasiun di sekitarnya. Dan meningkatnya nilai $\delta v/v$ pada pasangan stasiun yang jaraknya jauh dari lokasi tekanan. Penurunan nilai $\delta v/v$ dapat dijadikan sebagai indikasi sebelum terjadinya onset erupsi pada 25 November 2017.

ACKNOWLEDGMENTS

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Bapak Yasa Suparman dan Bapak Devi K. Syahbana dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Gunung Api (PVMBG) Bandung yang telah berkenan memberikan data dan membimbing selama proses penelitian berlangsung. Selain itu, peneliti mengucapkan terima kasih kepada Prof Bagus Jaya Santosa Dosen Program Pasca Sarjana Fisika ITS Surabaya yang telah memberikan banyak masukan terhadap penelitian ini.

SIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian Analisis Seismik Ambient Noise Gempa Vulkanik Pada Gunungapi Agung adalah Pola variasi kecepatan semu ($\delta v/v$) sebagai hasil korelasi silang seismik ambient noise pada peningkatan aktivitas Gunung Agung mengalami penurunan ($\delta v/v$) sekitar 15-100 hari menjelang onset erupsi dan mengalami

penurunan nilai ($\delta v/v$) yang menerus selama proses erupsi pada November 2017 – Januari 2018. Sehingga penurunan nilai ($\delta v/v$) dapat menjadi penanda bahwa gunung tersebut akan mengalami erupsi atau sedang terjadi erupsi.

Deklarasi penulis

Kontribusi dan tanggung jawab penulis

Para penulis membuat kontribusi besar untuk konsepsi dan desain penelitian. Para penulis mengambil tanggung jawab untuk analisis data, interpretasi dan pembahasan hasil. Para penulis membaca dan menyetujui naskah akhir.

Pendanaan

Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal.

Ketersediaan data dan bahan

Semua data tersedia dari penulis.

Kepentingan yang bersaing

Para penulis menyatakan tidak ada kepentingan bersaing.

REFERENSI

- Brenguier, F., Shapiro, N., Campillo, M., Ferrazzini, V., Duputel, Z., Coutant, O., Nercessian, A., (2008), "Towards Forecasting Volcanic Eruptions using Seismic Noise", *Nature Geoscience* 1 (2), 126-130.
- Brenguier, F., Shapiro, N.M., Campillo, M., Nercessian, A., Ferrazzini, V., (2007), 3-D surface wave tomography of the Piton de la Fournaise volcano using seismic noise correlations. *Geophys. Res. Lett.* 34 (2), 2305.
- Campillo, M., dan A. Paul., (2003), "Long-range Correlations in The Diffuse Seismic Coda, *Science* 299, no. 5606, 547-549, doi: 10.1126/science.1078551.
- Clarke, D., Zaccarelli, L., Shapiro, N., Brenguier, F., (2011), "Monitoring Crustal Temporal Variations from Correlations of Ambient Seismic Noise", *Assessment of Resolution and Accuracy, Geophysical Journal International.* 186, 867-882.
- Duputel, Z., Ferrazzini, V., Brenguier, F., Shapiro, N., Campillo, M., Nercessian, A., (2009), "Real Time Monitoring of Relative Velocity Changes using Ambient Seismic Noise at The Piton de la Fournaise Volcano (La Reunion) from January 2006 to June 2007. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 184 (1-2), 164-173.
- Froment, B., Campillo, M., Roux, P., Gouedard, P., Verdel, A. dan Weaver, R.L., (2010), "Estimation of The Effect of

- Nonisotropically Distributed Energy on The Apparent Arrival Time in Correlations", *Geophysics*, 75, SA85-SA93.
- Gou´edard, P., Stehly, L., Brenguier, F., Campillo, M., Colin de Verdi`ere, Y., Larose, E., Margerin, L., Roux, P., S´anchez-Sesma, F. J., Shapiro, N. M., and Weaver, R. L., (2008), "Cross-correlation of random fields: mathematical approach and applications," *Geophysical Prospecting*, 56(3):375-393.
- Landes, M., Hubans, F., Shapiro, N. M., Paul, A., and Campillo, M., (2010), "Origin of deep ocean microseisms by using teleseismic body waves", *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 115.
- Lecocq, T., Caudron, C., Brenguier, F., (2014), "MSNoise, a Python Package for Monitoring Seismic Velocity Changes using Ambient Seismic Noise", *Seismological Research Letters*, Vol.8 Number 3.
- Mordret, A., Jolly, A., Duputel, Z., Fournier, N., (2010), "Monitoring of phreatic eruptions using Interferometry on Retrieved Cross-Correlation Function from Ambient Seismic Noise: results from Mt. Ruapehu, New Zealand. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 191 (1-2), 46-59.
- Obermann, A., Planès, T., Larose, E., Campillo, M., (2013), "Imaging Pre- and Co- Eruptive Structural Changes of a Volcano with Ambient Seismic Noise", *Journal of Geophysical Research, Solid Earth*, Vol. 118, 1 - 10
- Poupinet, G., Ellsworth, W., and Frechet, J., (1984), "Monitoring velocity variations in the crust using earthquake doublets: an application to the Calaveras faults, California. *Journal of Geophysical Research*, 89:5719- 5731.
- Ratdomopurbo, A. and Poupinet, G, (1995), "Monitoring a temporal change of seismic velocity in a volcano: application to the 1992 eruption of Mt. Merapi (Indonesia)", *Geophysical Research Letters*, 22(7):775-778.
- Suparman, Y., (2017), *Pemantauan Seismik Ambient Noise Dan Realtime Seismik Amplitud Measurement Untuk Identifikasi Peningkatan Aktivitas Gunung Api*, Tesis, Institut Teknologi Bandung, Bandung.