

---

## Variasi Entropi Permutasi Hasil Pemantauan Aktivitas Seismik Gunung Raung di Jawa Timur Periode Januari 2015

Qori Fajar Hermawan<sup>1,\*</sup>, Sukir Maryanto<sup>2</sup>, Hendra Gunawan<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Geofisika, Universitas Mulawarman, Jl. Barong Tongkok No. 4 Gunung Kelua, Kota Samarinda, Kalimantan Timur, 75242, Indonesia

<sup>2</sup> Program Studi Fisika, Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Kota Malang, Jawa Timur, 65145, Indonesia

<sup>2</sup> Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Jl. Diponegoro No. 57, Kota Bandung, Jawa Barat, 40122, Indonesia

\*Corresponding author e-mail: [qorifajarhermawan@fmipa.unmul.ac.id](mailto:qorifajarhermawan@fmipa.unmul.ac.id)

### ABSTRAK

Entropi permutasi adalah metode statistika yang dapat menentukan tingkat kompleksitas data *time-series*. Metode ini digunakan pada data hasil perekaman seismometer di gunung api, termasuk Gunung Raung. Gunung Raung yang menunjukkan aktivitasnya pada Januari 2015 telah dihitung nilai entropi permutasinya. Variasi entropi permutasi menunjukkan bahwa stasiun RAUN, MLLR, dan POSR memiliki tingkat kompleksitas yang rendah ketika terjadi aktivitas letusan. Variasi entropi permutasi di stasiun KBUR pada saat terjadi letusan tidak menunjukkan penurunan tingkat kompleksitas, karena adanya tremor yang mendominasi. Penurunan nilai entropi permutasi karena adanya aktivitas tremor dapat digunakan sebagai *early warning system*. Namun, hal ini butuh penelitian lebih lanjut.

**Kata Kunci:** entropi permutasi; Gunung Raung; tremor; *early warning system*.

## ABSTRACT

Permutation entropy is a statistical method that can determine the level of complexity of time-series data. This method can be used on data recorded by seismometers on volcanoes, including Mount Raung. Mount Raung which showed its activity in January 2015 can be calculated permutation entropy value. Permutation entropy variations indicate that the RAUN, MLLR, and POSR stations have a low level of complexity when eruptive activity occurs. Permutation entropy variations at the KBUR station at the time of the eruption did not show a decrease in the level of complexity, because the tremor predominated. The decrease in the permutation entropy value due to tremor activity can be used as an early warning system. However, this requires further research.

**Keywords** : permutation entropy; Mount Raung; tremor; early warning system.

### 1. Pendahuluan

Entropi permutasi adalah sebuah metode yang digunakan untuk mengukur tingkat kompleksitas data. Metode ini biasa digunakan pada data time series, seperti data seismik [1]. Berdasarkan variasi nilai entropi permutasi tersebut, diharapkan dapat menjadi penanda berdasarkan nilai kompleksitasnya. Data dengan derajat kompleksitas yang tinggi menandakan bahwa data tersebut lebih acak sedangkan data dengan derajat kompleksitas yang rendah menandakan bahwa data tersebut lebih teratur. Keteraturan data tersebut dapat diartikan sebagai penanda awal dari aktivitas yang besar, seperti letusan sebuah gunung api.

Konstantinou, dkk [1] menerapkan entropi permutasi ini untuk mengidentifikasi karakter gangguan sinyal seismik sebelum letusan di Gunung Shinmoedake, Jepang. Berdasarkan penelitian tersebut, menunjukkan bahwa gangguan sinyal seismik di Gunung Shinmoedake memiliki derajat kompleksitas yang tinggi. Namun, sebelum letusan terjadi, gangguan sinyal seismik tersebut mengalami penurunan sehingga sinyal tersebut bukan sepenuhnya gangguan sinyal seismik. Berdasarkan analisis polarisasi menunjukkan bahwa sinyal dengan nilai kompleksitas yang lebih rendah berasal dari tubuh gunung

tersebut. Oleh karena itu, metode ini dapat menentukan derajat kompleksitas sebagai penanda adanya aktivitas seismik dari gunung api.

Selain Gunung Shinmoedake, aktivitas Gunung Kelud juga pernah dianalisis menggunakan metode ini. Nugraheni, dkk [2] menganalisis perubahan nilai entropi permutasi pada proses pembentukan kubah lava Gunung Kelud tahun 2007. Derajat kompleksitas yang menurun menunjukkan bahwa proses pembentukan lava. Namun, proses ini hanya dapat diamati menggunakan sensor seismometer short period dengan jarak maksimal 1 kilometer. Jadi, variasi nilai kompleksitas berdasarkan entropi permutasi dapat dijadikan penanda dari aktivitas gunung api.

Penerapan entropi permutasi yang telah berhasil tersebut memungkinkan untuk diterapkan di Gunung Raung, Jawa Timur. Gunung Raung menunjukkan peningkatan aktivitasnya mulai dari November 2014 [3]. Pada periode kritis tersebut menunjukkan terdapat beberapa sinyal seismik yang khas seperti tremor. Berdasarkan analisis sinyal tremor menggunakan metode polarisasi dan semblance

menunjukkan bahwa tremor yang terekam berasal dari 2,1 km timur laut puncak Gunung Raung [4]. Namun, berdasarkan dugaan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), bahwa pada Desember 2014 - Januari 2015 terdapat aktivitas keluarnya lava pijar di kawasan kaldera Gunung Raung [5]. Aktivitas lava pijar ini sulit diamati oleh pos pengamatan karena luasnya yang berkisar 2.250 meter  $\times$  1.750 meter dengan kedalaman 500 meter. Laporan aktivitas yang dirangkum oleh aktivitas seismik yang dilaporkan Global Volcanism Program [6] menunjukkan bahwa hingga 12 Januari 2015 terdapat sinyal tremor yang terekam. Pada 6 Januari 2015 terjadi letusan besar dengan kategori Volcanic Explosivity Index (VEI) 1 yang berarti terdapat letusan dengan material sebanyak 100 meter kubik hingga 1 kilometer kubik. Periode Januari 2015 adalah periode dengan cakupan aktivitas yang cukup lengkap, seperti tremor, letusan, dan anomali termal.

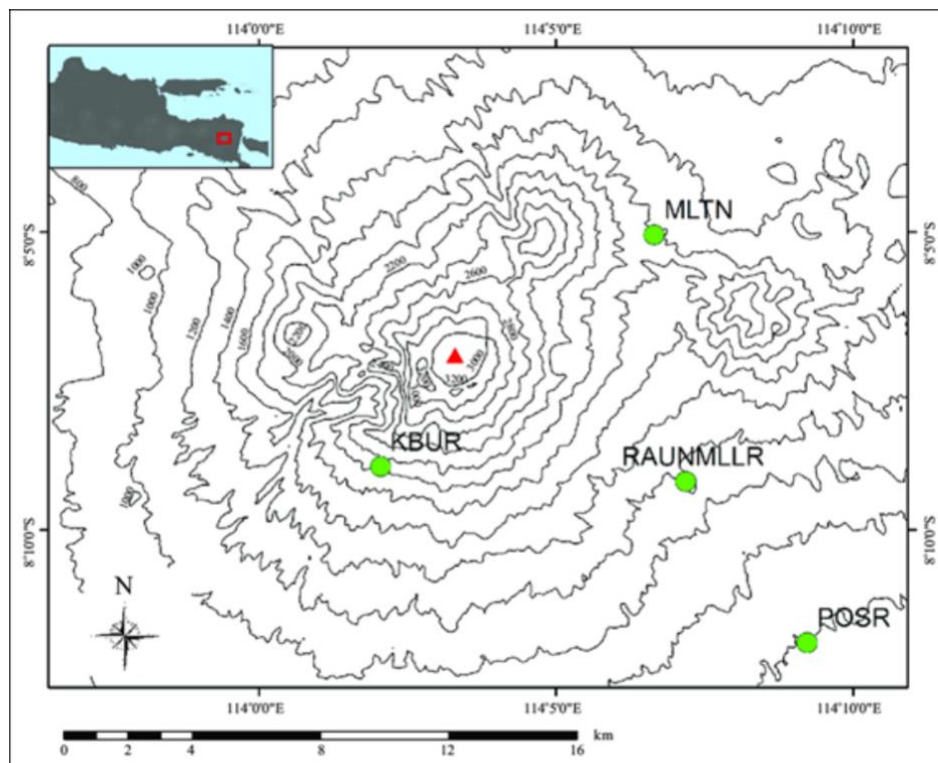
Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis tingkat kompleksitas menggunakan nilai entropi permutasi. Selain itu, karakteristik sinyal seismik

yang terekam juga dinilai berdasarkan variasi entropi permutasi tersebut. Analisis entropi permutasi ini juga dilakukan sebagai upaya menjadi *early warning system*.

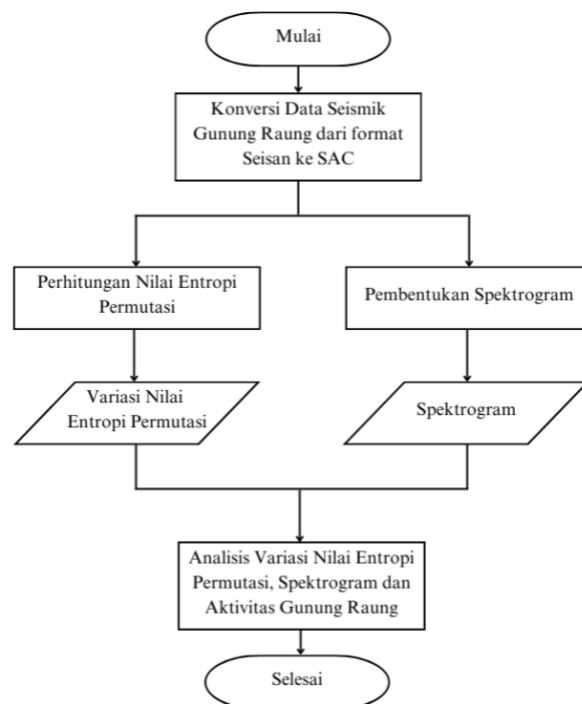
## 2. Data dan Metode

Penelitian ini menggunakan data aktivitas seismik yang terpantau oleh stasiun seismik di Gunung Raung. Gunung Raung dipantau oleh empat stasiun seismik yaitu KBUR, RAUN, MLLR dan POSR. Namun, stasiun MLTN diduga rusak akibat kegagalan teknis [4]. Sebaran lokasi stasiun seismik tersebut ditunjukkan oleh Gambar 1. Stasiun KBUR, RAUN, dan POSR menggunakan sensor seismometer 1-komponen L4 dengan *corner frequency* 1 Hz, sedangkan stasiun MLLR menggunakan sensor seismometer 3-komponen L22 dengan *corner frequency* 2 Hz [7]. Keempat stasiun ini menyimpan data seismik dengan frekuensi pencacahan 100 Hz. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data yang terekam di masing-

masing stasiun tanpa dilakukan filter. Data dari stasiun MLLR yang digunakan hanya data yang terekam di komponen Z (*up-down*). Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak Matlab. Pengolahan data yang dilakukan adalah penentuan nilai entropi permutasi dan pembentukan spektrogram dari data seismik yang terekam. Penelitian ini dimulai dengan mengekstraksi data seismik dari format Seisan (\*.MAN) menjadi format SAC (\*.SAC) menggunakan program GISMO [8]. Hasilnya berupa data SAC setiap 10 menit. Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai entropi permutasi. Secara bersamaan, dibentuk pula spektrogram. Setelah itu didapatkan variasi nilai entropi permutasi dan spektrogram untuk data setiap sepuluh menit. Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis dari data yang telah didapatkan. Tahapan-tahapan dalam penelitian ini dapat ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 1. Distribusi stasiun seismik di Gunung Raung. Lingkaran hijau menunjukkan lokasi stasiun seismik, dan segitiga merah menunjukkan lokasi puncak Gunung Raung [4].



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

## 2.1. Variasi Entropi Permutasi

Entropi permutasi adalah metode yang menginformasikan data time-series menggunakan konsep entropi dan dinamika simbolik sehingga hasilnya dinyatakan dalam bentuk angka [9]. Penentuan nilai entropi permutasi menggunakan Persamaan (1).

$$H_p(m) = - \sum_{j=1}^{m!} P_j \ln P_j \quad (1)$$

dengan  $H_p$  adalah nilai entropi permutasi dan  $m$  adalah dimensi Euclidean, serta  $j$  adalah jumlah simbol.  $P_j$  merupakan kemungkinan distribus yang terjadi pada setiap jenis simbol yang ditampilkan oleh  $j$ . Pada penentuan variasi entropi permutasi dari sebuah data *time-series*, hal yang paling awal ditentukan adalah faktor penundaan. Faktor penundaan ini berbentuk vektor seperti  $x(i), x(i+L), \dots, x(i+(m-1)L)$  dengan  $i$  adalah indeks sampel, dan  $L$  adalah penundaan waktu analisis yang merupakan kelipatan interval sampel. Nilai entropi permutasi ini biasanya akan dibagikan dengan nilai  $\ln(m!)$ , sehingga nilai entropi permutasi akan bernilai dari 0 hingga 1. Apabila nilai entropi permutasi menunjukkan nilai 1 maka data tersebut memiliki

kompleksitas yang tinggi dan sebaliknya.

Pada penelitian ini, digunakan program untuk menentukan entropi permutasi yang disusun oleh Unakafova dan Keller [10]. Penelitian tersebut berhasil menentukan nilai entropi permutasi dari data *time-series* dengan menggunakan metode *gliding-window*. Penggunaan metode ini dapat memudahkan penentuan variasi nilai entropi permutasi berdasarkan pergeseran panjang sampel data yang dianalisis berdasarkan waktu penundaan.

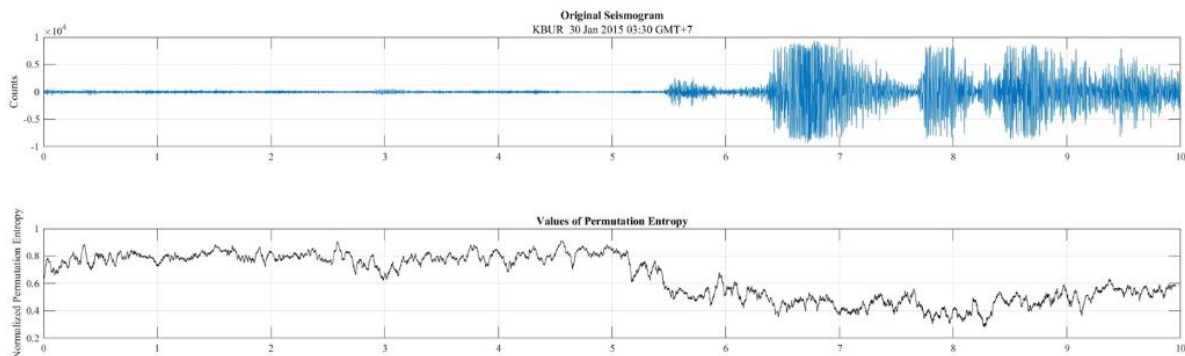
Penentuan nilai  $m, L$ , panjang sampel data dalam penentuan nilai entropi permutasi sangat bebas bergantung kepada tipe data yang dianalisis. Namun, Band dan Pompe [9] menyarankan untuk menggunakan nilai  $m = 3, \dots, 7$  dan  $L = 1$ . Panjang data yang digunakan adalah jauh lebih besar dibandingkan nilai  $m!$ . Konstantinou, dkk [1] telah mencoba untuk menentukan nilai entropi permutasi dengan nilai  $m = 5, 6$  dan  $L = 1, 2, 3, 4, 5$ . Penelitian tersebut menunjukkan bahwa perubahan nilai  $m$  tidak mengubah nilai entropi permutasi



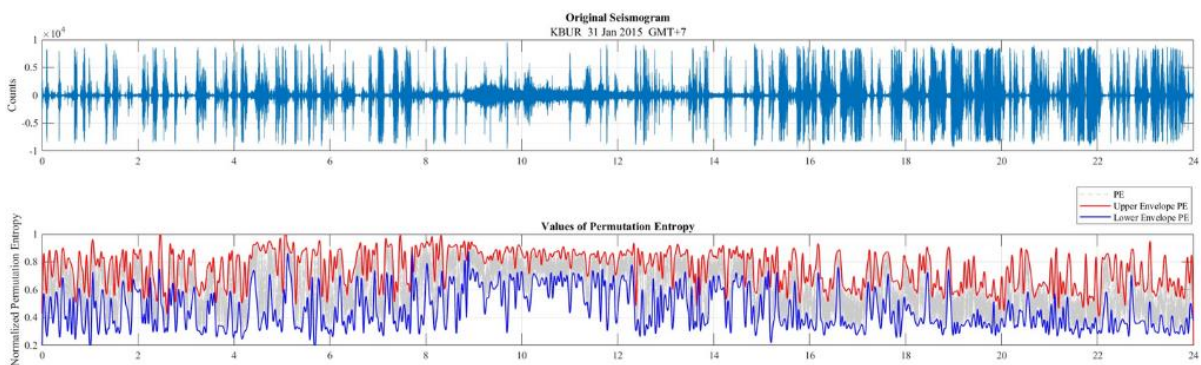
secara signifikan, tetapi nilai  $L$  dapat meningkatkan nilai entropi permutasi.

Penelitian ini menggunakan nilai  $m = 4$ ,  $L = 2$ , dan panjang sampel data yang dianalisis adalah 256 sampel. Parameter tersebut dipilih berdasarkan efisiensi waktu pengolahan data dan keterbatasan komputer yang digunakan.

Namun, hasil yang didapatkan berdasarkan parameter ini masih dapat menggambarkan variasi nilai kompleksitas dari data yang dianalisis. Gambar 3 menunjukkan contoh hasil pengolahan data menggunakan parameter tersebut.



Gambar 3. Variasi nilai entropi permutasi yang tercatat di stasiun KBUR pada 30 Januari 2015 pukul 03:30 WIB.



Gambar 4. Variasi entropi permutasi dari data yang terekam di stasiun KBUR pada 31 Januari 2015.

Pada penentuan variasi nilai permutasi entropi ini, untuk mempermudah

melihat variasi dari data satu hari, maka diterapkan fungsi *envelope* yang ada di

Matlab. Fungsi ini akan membentuk gelombang sesuai dengan puncak variasi nilai entropi permutasi. Envelope warna merah menunjukkan batas atas dari variasi entropi permutasi, sedangkan warna biru menunjukkan batas bawah dari variasi entropi permutasi. Gambar 4 menunjukkan variasi entropi permutasi di Stasiun K BUR pada 31 Januari 2015.

## 2.2. Pembentukan Spektrogram

Spektrogram adalah grafik tiga dimensi yang dihasilkan dengan menerapkan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Metode FFT ini akan membentuk spektrum frekuensi dari sinyal yang dianalisis. Spektrum frekuensi ini akan menginformasikan identitas gelombang berdasarkan frekuensi yang terkandung pada sinyal yang dianalisis. Pembentukan frekuensi dilakukan berdasarkan Persamaan (2) dan (3) [11].

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (2)$$

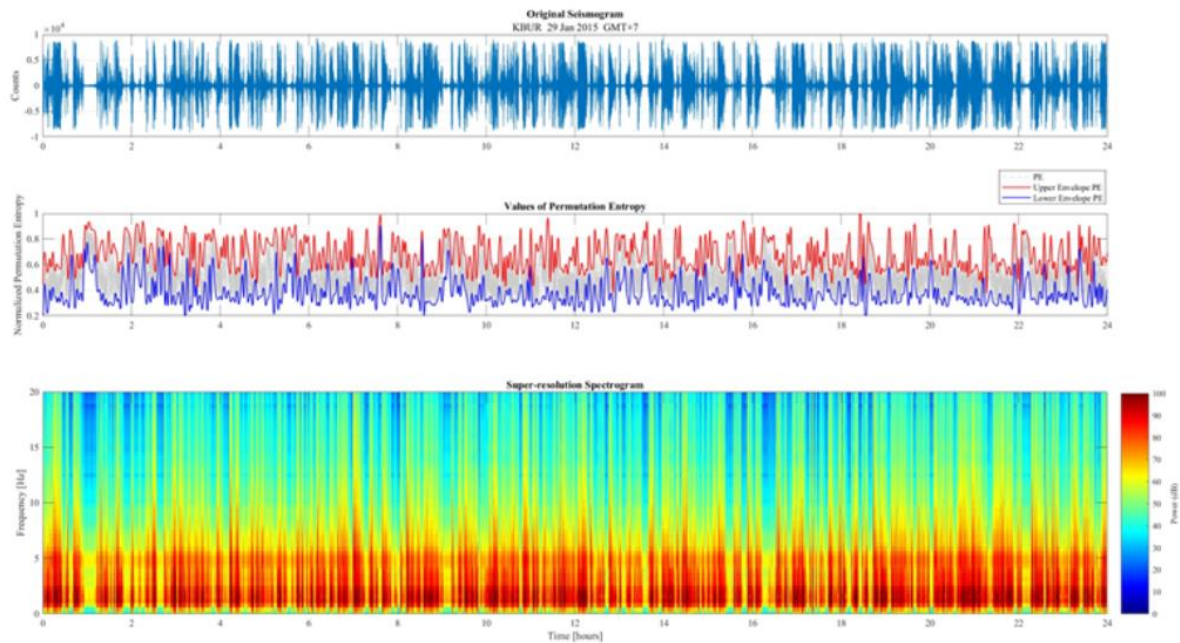
$$F(\omega) = |A(\omega)| e^{i\phi(\omega)} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

dengan  $\omega$  adalah frekuensi sudut,  $A(\omega)$  adalah amplitudo dan  $\phi(\omega)$  adalah sudut fase.

Namun, dalam penelitian ini FFT yang dilakukan hanya kepada potongan sinyal yang lebih pendek. Metode ini biasanya disebut dengan metode *Short-Time Fourier Transform*. Pemaksimalan metode ini dilakukan dengan menghasilkan *super-resolution spectrogram* menerapkan PLCA berpasangan (*coupled PLCA*). Selain itu, dilakukan pemanfaatan fungsi pengaburan (*blurring function*) untuk memperjelas identitas frekuensi dari sinyal yang dianalisis [12].

Penelitian ini menggunakan parameter panjang sampel data 256 data, tipe jendela data adalah *hanning window*, dan parameter PLCA dengan maksimum iterasi sebanyak 10. Berdasarkan parameter ini dapat menggambarkan perubahan frekuensi dari sinyal yang dianalisis. Gambar 5 menunjukkan spektrogram dari data yang terekam di Stasiun K BUR pada tanggal 29 Januari 2015.





Gambar 5. Spektrogram dari data yang terekam oleh Stasiun KBUR pada 29 Januari 2015.

### 3. Hasil dan Pembahasan

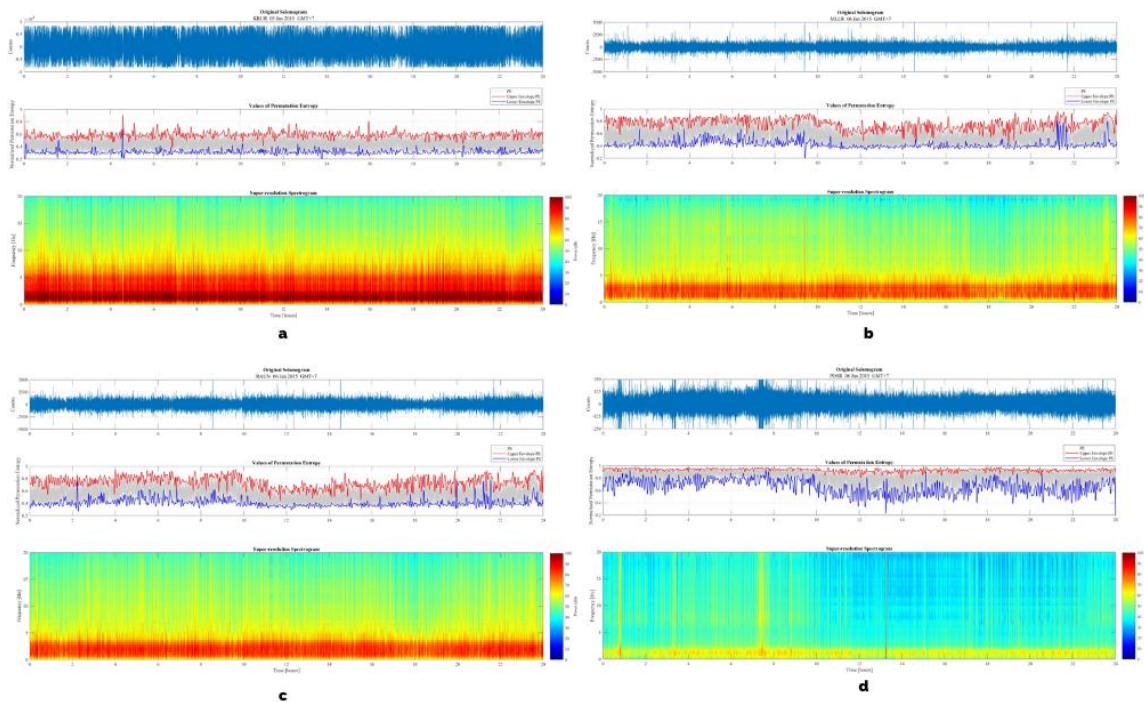
Setelah dilakukan pengolahan data untuk menentukan variasi entropi permutasi dan pembentukan spektrogram, didapatkan hasil bahwa Stasiun KBUR dapat merekam sinyal paling baik dibandingkan dengan sinyal dari stasiun MLLR, RAUN, dan POSR. Hal ini berdasarkan nilai amplitudo dari data seismik yang terekam selama Januari 2015. Hal ini berakibat nilai amplitudo di spektrogram menjadi lebih merah (tinggi) dibandingkan stasiun lainnya. Jarak stasiun ke puncak Gunung Raung menjadi salah satu faktor yang mempengaruhi hasil perekaman. Stasiun KBUR berjarak sekitar 4

kilometer dari puncak Gunung Raung. Stasiun MLLR, RAUN, dan POSR memiliki jarak dari puncak Gunung Raung secara berturut-turut adalah 6 kilometer, 6 kilometer dan 14 kilometer. Hal ini juga dikaitkan dengan bumi sebagai *low-pass filter* yang dapat menahan gelombang seismik di atas 10 Hz [13]. Selain itu, kualitas rekaman juga dipengaruhi oleh sensor seismometer yang digunakan di masing-masing stasiun [4].

Walaupun demikian, aktivitas letusan yang dilaporkan oleh *Global Volcanism Program* pada 06 Januari 2015 [6], menunjukkan bahwa variasi entropi

permutasi di stasiun MLLR, RAUN, dan POSR mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa kompleksitas menurun saat terjadinya letusan. Penurunan variasi entropi permutasi terjadi dari 0,8 menjadi 0,6 (batas atas) di stasiun MLLR. Hal yang sama terjadi pada rekaman Stasiun RAUN, dengan penurunan tingkat kompleksitasnya dari 0,8 menjadi 0,6. Variasi entropi permutasi menurun dari 0,8 menjadi 0,4 (batas bawah) di stasiun POSR. Penurunan variasi entropi permutasi ini diakibatkan adanya aktivitas letusan yang terjadi.

Namun, penurunan variasi entropi permutasi tersebut tidak diikuti oleh data seismik yang terekam di stasiun KBUR. Hal ini dikarenakan beberapa hari sebelumnya sudah terekam aktivitas tremor di stasiun tersebut. Kehadiran aktivitas tremor ditandai dengan tingginya amplitudo di frekuensi rendah [14] dan hal ini juga sebagai penanda bahwa akan ada aktivitas letusan [1]. Tremor yang terekam memiliki frekuensi yang luas yaitu 0-8 Hz. Frekuensi dominan berada pada kisaran 1-2 Hz. Gambar 6 menunjukkan perbandingan variasi entropi permutasi dan spektrogram dari data seismik yang terekam di Stasiun KBUR, RAUN, MLLR, dan POSR.



Gambar 6. Variasi entropi permutasi dan spektrogram dari data yang terekam di stasiun KBUR (a), stasiun MLLR (b), stasiun RAUN (c) dan stasiun POSR (d)

Berdasarkan variasi entropi permutasi yang telah diamati selama Januari 2015 di Gunung Raung, didapatkan informasi bahwa tingkat kompleksitas di stasiun KBUR menunjukkan nilai yang paling rendah dibandingkan stasiun lainnya. Tingkat kompleksitas yang paling tinggi ditunjukkan oleh data seismik di stasiun POSR. Hal ini dikarenakan keterbatasan metode ini yaitu pada jarak stasiun pengamatan [2]. Sebaran tingkat kompleksitas data di stasiun KBUR, MLLR, RAUN, dan POSR dapat

dikaitkan dengan aktivitas seismik berdasarkan frekuensi dominan dari data yang terekam (Tabel 1). Data yang terekam dengan tingkat kompleksitas 0,4-0,6 menunjukkan adanya aktivitas seismik, baik tremor, gempa, ataupun letusan. Hal ini hanya ditunjukkan oleh data yang terekam di stasiun KBUR, MLLR, dan RAUN. Namun, data yang terekam di stasiun POSR menunjukkan bahwa terekamnya aktivitas seismik seperti tremor, gempa dan letusan pada saat tingkat kompleksitas yang berkisar 0,4-0,8.

Tabel 1. Sebaran tingkat kompleksitas data rekaman seismik di stasiun KBUR, MLLR, RAUN, dan POSR periode Januari 2015

Tingkat Kompleksitas Data	Stasiun			
	KBUR	MLLR	RAUN	POSR
	Aktivitas Seismik			
<b>0,8-1,0</b>	Letusan dan <i>seismic noise</i> (?)			
<b>0,6-0,8</b>	Perubahan dari <i>seismic noise</i> ke gempa, letusan dan tremor dan sebaliknya			Aktivitas seismik (letusan, tremor, gempa)
<b>0,4-0,6</b>	Aktivitas seismik (letusan, tremor, gempa)	Aktivitas seismik (letusan, tremor, gempa)		Aktivitas seismik (letusan, tremor, gempa)
<b>0,2-0,4</b>	Tidak terdapat data dengan tingkat kompleksitas ini			

Klasifikasi aktivitas seismik berdasarkan tingkat kompleksitasnya ini juga ditinjau dari frekuensi yang dikandung oleh data rekaman yang dianalisis. Data frekuensi tersebut ditunjukkan oleh spektrogram. Semakin besar amplitudo dan semakin sempit frekuensi dari data rekaman seismik tersebut, maka akan semakin rendah tingkat kompleksitasnya, dan sebaliknya. Aktivitas seismik seperti tremor dan gempa akan memiliki frekuensi yang sempit, sehingga tingkat kompleksitas data tersebut akan rendah [14]. Selanjutnya, *seismic noise* akan memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi karena frekuensinya cenderung luas dan amplitudonya rendah [1].

### 3.1 Aktivitas Letusan dan Variasi Entropi Permutasi

Aktivitas letusan gunung api menunjukkan adanya gelombang terus menerus dengan amplitudo yang besar dan frekuensi yang luas tetapi dominan di frekuensi rendah. Aktivitas ini dapat diamati oleh stasiun yang jauh seperti stasiun POSR pada 06 Januari 2015 (Gambar 6 d). Stasiun yang paling jauh ini dapat mengidentifikasi terjadinya letusan dengan menunjukkan variasi

entropi permutasi yang rendah dibandingkan sebelum letusan.

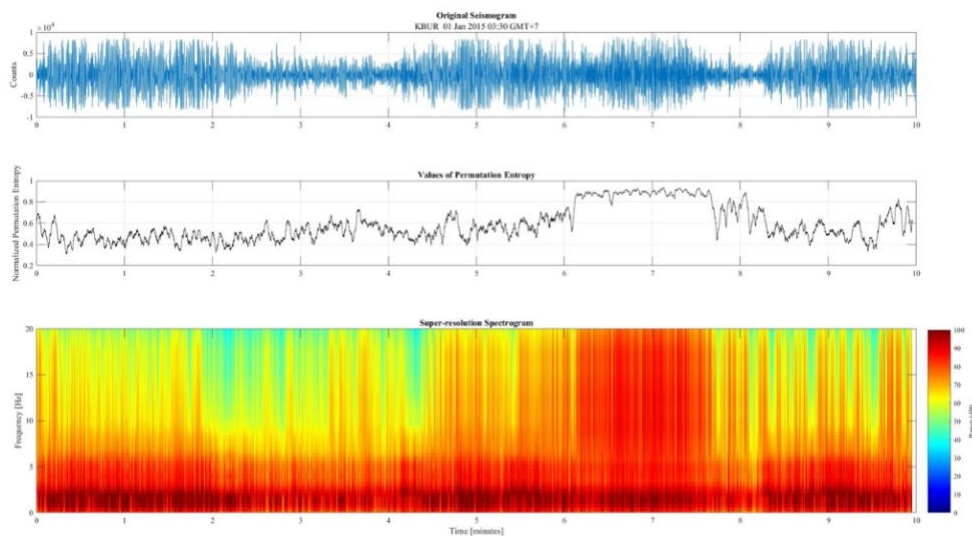
Nugraheni, dkk [2] menyebutkan bahwa metode entropi permutasi dapat menunjukkan penanda terjadi letusan pada stasiun dengan jarak yang sangat dekat seperti 1 kilometer. Namun, pada hasil pengamatan di Gunung Raung ini menunjukkan bahwa metode ini dapat mendeteksi adanya aktivitas seismik walaupun dari stasiun yang jaraknya lebih dari 1 kilometer. Catatannya adalah energi yang dilepaskan dari aktivitas seismik di gunung api tersebut harus besar dengan frekuensi dominan yang rendah. Catatan ini berkaitan dengan bumi hanya meloloskan gelombang seismik dengan frekuensi rendah dan juga peluruhan energi gelombang.

Aktivitas seismik dari letusan gunung api menunjukkan frekuensi yang luas dengan dominan di frekuensi rendah yang meningkatkan tingkat kompleksitas data yang terekam. Hal ini telah dianalisis oleh Konstantinou, dkk [1] yang menunjukkan bahwa aktivitas letusan Gunung Shinmoedake memiliki frekuensi yang luas sehingga variasi entropi permutasi tinggi. Letusan Gunung Raung pada 1 Januari 2015



pukul 03:10 WIB hingga 04:10. Aktivitas ini hanya terdeteksi oleh stasiun KBUR, stasiun lainnya tidak mendeteksi karena adanya aktivitas tremor. Frekuensi yang terkandung dalam data rekaman di stasiun KBUR luas yaitu 0-20 Hz, sehingga entropi

permutasinya tinggi. Gambar 7 menunjukkan variasi entropi permutasi pada 1 Januari 2015 yang terekam oleh stasiun KBUR.



Gambar 7. Variasi entropi permutasi data rekaman aktivitas seismik di stasiun KBUR pada 1 Januari 2015 pukul 03:30 WIB.

### 3.2 Entropi Permutasi sebagai *Early Warning System*?

Konstantinou, dkk [1] menunjukkan bahwa variasi entropi permutasi akan menurun sesaat sebelum terjadi letusan. Hal ini berkaitan dengan kehadiran tremor sebelum letusan. Tremor sebelum letusan akan menurunkan nilai kompleksitas data rekaman aktivitas seismik. Karakteristik tremor dan kehadiran tremor sebelum terjadinya letusan dapat digunakan sebagai

penanda aktivitas sebelum letusan di suatu gunung berdasarkan variasi entropi permutasi.

Karakteristik tremor ini dapat digunakan sebagai penanda sebelum letusan yang memanfaatkan kecerdasan buatan dalam penentuan jenis aktivitas seismik tersebut. Hal ini telah dilakukan oleh Konstantinou, dkk [15] menunjukkan bahwa gelombang tremor akan menunjukkan nilai entropi permutasi yang lebih rendah

dibandingkan data rekaman lainnya. Hal ini digunakan kecerdasan buatan untuk menentukan sebuah aktivitas gunung api dari rekaman. Parameter yang digunakan hanya parameter perhitungan entropi permutasi yaitu,  $m$ ,  $L$ , dan panjang jendela analisis.

Namun, hal ini masih perlu dikaji lebih dalam terkait dengan frekuensi dominan aktivitas letusan gunung api. Frekuensi yang luas ini akan menunjukkan variasi entropi yang tinggi. Stasiun perekaman yang lebih jauh akan menunjukkan hasil sebaliknya, karena adanya sifat bumi sebagai *low-pass filter* dan atenuasi gelombang seismik.

#### 4. Simpulan

Penerapan metode entropi permutasi di data seismometer di stasiun KBUR, RAUN, MLLR dan POSR di Gunung Raung pada Januari 2015 menunjukkan bahwa variasi entropi permutasi akan rendah karena ada aktivitas gunung api seperti letusan, tremor, dan gempa. Hal ini disebabkan oleh frekuensi yang sempit. Selain itu, entropi permutasi ini dapat mengindikasikan adanya aktivitas letusan Gunung Raung pada 6 Januari 2015 oleh stasiun seismik terjauh yaitu

POSR (14 kilometer). Variasi entropi permutasi ini dapat digunakan untuk penentuan aktivitas gunung api seperti tremor, tetapi perlu dikaji lebih mendalam karena entropi permutasi bergantung pada luasnya frekuensi data rekaman. Di sisi lain, entropi permutasi ini dapat dengan baik mengidentifikasi kehadiran tremor yang menjadi baik sebagai penanda letusan gunung api dan dapat digunakan sebagai *early warning system*.

#### Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) yang telah memberikan kesempatan dan data pada penelitian ini.

#### 5. Referensi

1. K. I. Konstantinou, D. A. Rahmalia, I. Nurfitriana, dan M. Ichihara, "Permutation entropy variations in seismic noise before and after eruptive activity at Shinmoedake volcano, Kirishima complex, Japan," *Earth, Planets and Space*, vol. 74, no. 1, hlm. 175, Nov 2022, doi: 10.1186/s40623-022-01729-9.
2. L. R. Nugraheni, A. Harijoko, W. Suryanto, dan H. Triastuty, "Permutation entropy variation for



- 2007 effusive dome-forming eruption period of Kelud Volcano, Indonesia,” *E3S Web of Conferences*, vol. 325, hlm. 01010, Nov 2021, doi: 10.1051/e3sconf/202132501010.
3. V. L. Ipmawan, “Dinamika Fluida Magma Gunungapi Raung Berdasarkan Analisis Tremor Studi Kasus Periode Krisis November-Desember 2014,” Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, 2016. [Daring]. Tersedia pada: <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/93392>
  4. V. L. Ipmawan, K. S. Brotopuspito, dan H. Triastuty, “Locating Tremor Source with Polarization and Semblance Methods During the 2014 Crisis Period of Raung Volcano,” *Indonesian Journal on Geoscience*, vol. 7, no. 1, Feb 2020, doi: 10.17014/ijog.7.1.41-49.
  5. E. Kurniawati, “Gunung Raung Diduga Telah Meletus,” *Tempo*, Indonesi, 16 Februari 2015. Diakses: 10 Agustus 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://nasional.tempo.co/read/642910/gunung-raung-diduga-telah-meletus>
  6. Global Volcanism Program, “Raung (263340) in [Database] Volcanoes of the World (v.5.1.0),” *Smithsonian Institution, compiled by Venzke, E*, 9 Juni 2023.
  7. M. Haney, “Seismicity at Raung,” Bandung, Nov 2012.
  8. G. Thompson, “geoscience-community-codes/GISMO.” GitHub, 13 April 2023. Diakses: 10 Agustus 2023. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/37289-permutation-entropy>
  9. C. Bandt dan B. Pompe, “Permutation Entropy: A Natural Complexity Measure for Time Series,” *Phys Rev Lett*, vol. 88, no. 17, hlm. 174102, Apr 2002, doi: 10.1103/PhysRevLett.88.174102.
  10. V. Unakafova dan K. Keller, “Efficiently Measuring Complexity on the Basis of Real-World Data,” *Entropy*, vol. 15, no. 12, hlm. 4392–4415, Okt 2013, doi: 10.3390/e15104392.
  11. E. O. Brigham, *The Fast Fourier Transform and Its Applications*. New Jersey: Prentice-Hall, 1988.
  12. J. Nam, G. Mysore, J. Ganseman, K. Lee, dan J. S. Abel, “A Super-Resolution Spectrogram using Coupled PLCA,” dalam *The 11th Annual Conference of the*

- International Speech Communication Association (NTERSPEECH 2010)*, Japan: International Speech Communication Association (ISCA), Sep 2010.
13. M. , A. Gamal dan G. Maher, “Studying The High Frequency Seismic Signals for Enhanced Knowledge of The Shallow Earth Structure and Soil Investigation,” *Contributions to Geophysics and Geodesy*, vol. 53, no. 1, hlm. 1–21, Mar 2023, doi: <https://doi.org/10.31577/congeo.2023.53.1.1>.
14. K. I. Konstantinou dan V. Schlindwein, “Nature, wavefield properties and source mechanism of volcanic tremor: a review,” *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 119, no. 1–4, hlm. 161–187, Jan 2003, doi: [10.1016/S0377-0273\(02\)00311-6](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00311-6).
15. K. I. Konstantinou, D. Ayu Rahmalia, I. Nurfitriana, dan M. Ichihara, “Fast Identification of Volcanic Tremor and Lahar Signals during the 2009 Redoubt Eruption Using Permutation Entropy and Supervised Machine Learning,” *Seismological Research Letters*, vol. 93, no. 1, hlm. 435–443, Jan 2022, doi: [10.1785/0220210176](https://doi.org/10.1785/0220210176).