

# Studi Pendahuluan Mengenai Penentuan Episenter Tremor Vulkanik Dengan Menggunakan Metode *Semblance* (Studi Kasus Gunungapi Sakurajima)

Ratri Andinisari<sup>1)\*</sup>, Sukir Maryanto<sup>2)</sup>, Ahmad Nadhir<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> Program Studi Magister Ilmu Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>2)</sup> Laboratorium Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

<sup>3)</sup> Laboratorium Instrumentasi, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya, Malang

Diterima 02 Agustus 2013, direvisi 16 Oktober 2013

## ABSTRAK

Tremor vulkanik adalah salah satu aktivitas vulkanik yang penting karena kaitannya dengan pergerakan magma dan aktivitas eruptif suatu gunungapi. Oleh karena itu penentuan episenter tremor vulkanik menjadi sangat penting. Tidak adanya kenampakan gelombang P dan S pada seismogram tremor vulkanik adalah faktor utama yang menyebabkan sulitnya penentuan episenter. Penggunaan metode *semblance* dalam penentuan episenter dinilai tepat karena metode tersebut tidak membutuhkan informasi berupa waktu tiba gelombang P dan S. Studi pendahuluan telah dilakukan untuk menentukan episenter tremor vulkanik Gunungapi Sakurajima dengan durasi 100 s. Dalam penelitian ini, digunakan rekaman sinyal seismik dari 5 stasiun seismik, yaitu KOM, KAB, HIK, ARI, and HAR. Rekaman sinyal seismik tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode *semblance* dengan *moving window* selebar 30 s yang digeser sepanjang sinyal. Koefisien *semblance* yang dihasilkan dalam penelitian ini memiliki rentang antara 0,2522 hingga 0,4231. Episenter tremor vulkanik yang diamati terletak pada bagian Timur Laut kawah Minamidake dengan azimuth  $-18,66^\circ$  hingga  $54,10^\circ$  dari arah Timur. *Epicentral distance* tremor vulkanik yang diamati berada pada rentang 608,28 sampai dengan 948,68 m dari kawah Minamidake.

**Kata kunci :** *semblance*, episenter, tremor vulkanik, Gunungapi Sakurajima

## ABSTRACT

Volcanic tremor is one of the most important volcanic activities due its strong connection to magma movement and impeding eruption. Therefore, the determination of volcanic tremor epicenter becomes very important. The absence of apparent P and S wave arrival of volcanic tremor is the main constraint of its epicenter determination. The use of semblance method is required because semblance method requires no information about P and S wave arrival in epicenter determination. A preliminary application of semblance method has been done to determine the epicenter of 100 s length volcanic tremor of Sakurajima volcano. In this research we use the recorded seismic signal from 5 different volcano observatories, which are KOM, KAB, HIK, ARI, and HAR. The recorded tremor signal is then analyzed by using semblance method. The analysis is carried out by calculated semblance coefficient in every 30 s moving window along the signal. The resulting semblance coefficient varied from 0,25 to 0,42. The epicenter of observed volcanic tremor is located in the north-east part of Minamidake crater by  $-18,66^\circ$  to  $54,10^\circ$  of azimuth counted from the east, while the epicentral distance of the observed volcanic tremor varied from 608,28 to 948,68 m from Minamidake crater.

**Keywords :** *semblance*, epicenter, volcanic tremor, Sakurajima volcano

---

\*Corresponding author :

E-mail: ratri\_andini@yahoo.co.id

## PENDAHULUAN

Pada umumnya, posisi sumber gempa vulkanik dapat ditentukan dengan mengetahui waktu tiba gelombang P dan S. Akan tetapi, penentuan dengan metode yang biasa digunakan tidak dapat diterapkan untuk aktivitas vulkanik berupa tremor. Hal tersebut disebabkan karena tidak adanya kenampakan P dan *S-wave arrival* pada rekaman seismik tremor vulkanik. Di lain pihak, tremor vulkanik merupakan aktivitas vulkanik yang sangat penting karena aktivitas tersebut merupakan tanda adanya pergerakan magma dan indikasi akan terjadinya letusan. Oleh karena itu, penentuan posisi sumber tremor vulkanik menjadi sangat penting.

Berbagai metode telah dikembangkan untuk mengetahui posisi sumber tremor vulkanik berdasarkan data rekaman seismik yang dihasilkannya. Salah satu metode yang digunakan untuk menentukan posisi sumber tremor vulkanik adalah metode *semblance*, di mana pada metode tersebut tidak diperlukan informasi berupa waktu tiba gelombang P dan S. Metode *semblance* telah digunakan dalam penentuan posisi sumber tremor vulkanik di Gunungapi Aso [1] dan digunakan pula dalam pengamatan migrasi posisi sumber tremor vulkanik di gunungapi yang sama [2].

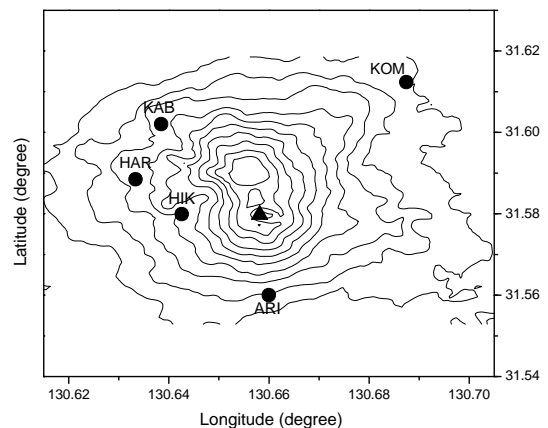
Salah satu gunungapi dengan aktivitas vulkanik yang sangat tinggi yang terdapat di Jepang adalah Gunungapi Sakurajima. Gunungapi Sakurajima terletak pada bagian selatan Pulau Kyushu dan terpisah dari daratan utama pulau tersebut. Gunungapi Sakurajima merupakan gunungapi dengan aktivitas vulkanik tertinggi di Jepang pada kurun waktu 50 tahun terakhir.

Aktivitas Gunungapi Sakurajima telah banyak pula dipelajari pada berbagai penelitian. Mekanisme sumber tremor harmonik yang dihasilkan Gunungapi Sakurajima telah diteliti [3, 4], demikian pula korelasi antara *micro-earthquake* Gunungapi Sakurajima dan aktivitas vulkaniknya [5]. Dari penelitian lainnya, diketahui pula bahwa posisi sumber tremor harmonik yang dihasilkan Gunungapi Sakurajima tidak terlalu dalam [6].

Tremor harmonik terjadi selama beberapa jam setelah terjadinya gempa vulkanik B

(HTB) dan terjadi pula setelah terjadinya letusan (HTE). Analisis gerakan partikel menunjukkan bahwa baik HTE maupun HTB memiliki pola gelombang Rayleigh dan Love yang serupa. Dominasi gelombang permukaan pada kedua jenis tremor harmonik tersebut mengindikasikan bahwa tremor harmonik memiliki posisi sumber yang dangkal. Kedua jenis tremor harmonik tersebut memiliki pola spektral yang serupa dengan karakter temporal yang berbeda. HTB memiliki puncak-puncak frekuensi yang konstan, sedangkan HTE memiliki puncak frekuensi yang terus meningkat secara gradual [6].

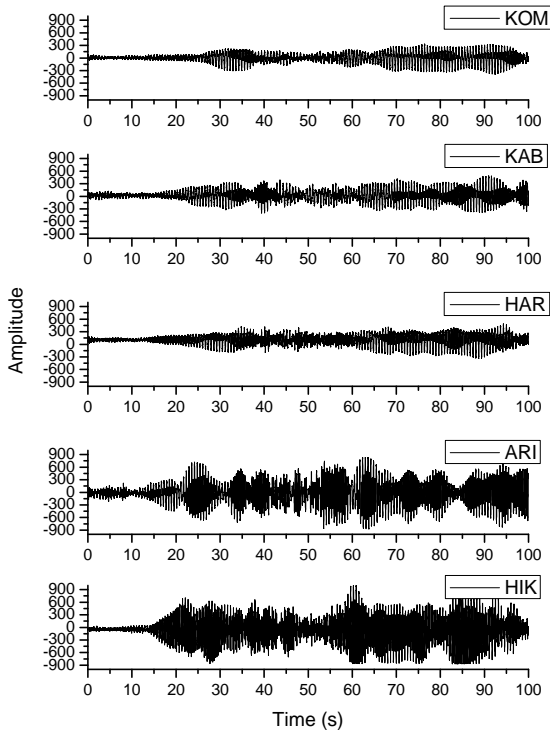
Aktivitas Gunungapi Sakurajima dipantau secara terus-menerus oleh *Sakurajima Volcano Research Center* (SVRC). Pemantauan aktivitas vulkanik secara seismik dilakukan dengan menggunakan 10 stasiun seismograf yang ditanam di sekitar kawah. Seismometer yang digunakan dalam sistem pemantauan tersebut terdiri atas seismometer tiga komponen dan komponen tunggal dengan rincian 8 *borehole seismometer* dan 2 seismometer biasa. Lima dari 10 stasiun seismograf yang dimiliki SVRC adalah HIK, ARI, HAR, KAB, dan KOM yang terletak pada jarak 1,7 hingga 4,4 km dari kawah aktif Minamidake. Letak kelima stasiun tersebut disajikan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Lokasi stasiun seismograf Gunungapi Sakurajima (KAB, HAR, KOM, ARI, HIK) ditandai oleh persegi hitam dan kawah aktif Minamidake ditandai dengan segitiga hitam.

Aktivitas vulkanik yang diamati dalam penelitian ini adalah tremor harmonik yang terjadi setelah gempa vulkanik B (HTB) pada tahun 1990 (HTB90). Sinyal seismik HTB90 direkam oleh 5 stasiun pengamatan gunungapi,

yaitu HIK, ARI, HAR, KAB, dan KOM. Seismogram dari HTB90 yang direkam pada 5 stasiun pengamatan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Seismogram tremor vulkanik HTB90 yang terekam pada stasiun seismogram KOM, KAB, HAR, ARI, dan HIK.

### METODE PENELITIAN

**Perhitungan koefisien *Semblance*.** Istilah *semblance* adalah ukuran kemiripan data seismik yang didapatkan dari beberapa sensor berbeda [7]. Secara matematis, *semblance* didefinisikan dalam Persamaan (1) [8].

$$S_0 = \frac{\sum_{j=1}^M (\sum_{i=1}^N U_i(\tau_i + j\Delta t))^2}{N \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^N U_i(\tau_i + j\Delta t)^2} \quad (1)$$

Dimana  $\Delta t$  adalah periode sampling dari sinyal seismik,  $t_{lag_i}$  adalah waktu tunda datangnya gelombang seismik pada stasiun ke- $i$ ,  $U_i(t_{lag_i} + j\Delta t)$  adalah *i*ime sample ke- $j$  sinyal  $U$  yang terekam pada stasiun ke- $i$ ,  $M$  dan  $N$  adalah jumlah *time sample* pada sebuah *time window* dan jumlah stasiun yang digunakan.

Konstanta yang dihasilkan Persamaan (1) akan memiliki rentang nilai antara 0 sampai 1. Konstanta  $S_0$  akan bernilai 1 apabila dua sinyal

atau lebih yang sedang dibandingkan benar-benar mirip, bukan hanya dari segi *waveform* tetapi juga dari segi amplitudonya.

Jika penelitian yang dilakukan hanya ingin membandingkan kenampakan gelombang tanpa membandingkan nilai amplitudo sinyal yang diterima masing-masing sensor, harus dilakukan pendefinisian ulang terhadap  $S_0$ . Nilai koefisien *semblance* atau  $S_0$  harus dinormalisasi dengan nilai *root mean square* yang dimilikinya [2]. Definisi *semblance*  $S_0'$  yang telah ternormalisasi tersebut diuraikan pada Persamaan (2).

$$S_0' = \frac{1}{MN^2} \sum_{j=1}^M \left( \sum_{i=1}^N \frac{U_i(t_{lag_i} + j\Delta t)}{rms_i} \right)^2 \quad (2)$$

Dengan nilai  $rms_i$  sebagai berikut

$$rms_i = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M U_i(t_{lag_i} + j\Delta t)^2} \quad (3)$$

Koefisien *semblance* dihitung tiap 30 sekon dengan jeda 10 sekon setiap perhitungan. *Time window* dengan lebar 30 sekon ini kemudian disebut *long window*. Tiap *long window* kemudian dibagi kembali menjadi 6 *short window* dengan lebar 5 sekon. Koefisien *semblance* dihitung pada tiap *short window* dan dihitung rata-ratanya untuk menghasilkan nilai koefisien *semblance* sebuah *long window*. Metode perhitungan serupa telah diterapkan sebelumnya dalam penentuan episenter tremor vulkanik di Gunungapi Aso [2].

Penggunaan *long window* dengan lebar 30 sekon disebabkan karena lebar *window* tersebut merupakan nilai yang seimbang. Dalam artian seismogram seismik dengan durasi tersebut mampu menampung informasi mengenai gerakan partikel dengan nilai kandungan *noise* yang rendah [8]. Selain itu, *long window* juga digeser dengan jeda 10 s sepanjang sinyal yang diamati. Hal ini dilakukan untuk mengamati pergerakan episenter tremor vulkanik itu sendiri. Episenter tremor vulkanik bersifat dinamis dikarenakan penyebabnya, yaitu vibrasi fluida magmatis pada pipa *conduit* gunung berapi [10, 11].

Dalam penelitian ini, gelombang seismik diasumsikan merambat secara horizontal, sehingga nilai kedalaman sumber tremor vulkanik tidak diperhitungkan. Stasiun yang digunakan juga diasumsikan terletak pada elevasi yang sama [1].

**Penentuan kecepatan.** Sebelum menghitung koefisien *semblance*, nilai kecepatan gelombang seismik harus diasumsikan terlebih dahulu. Kecepatan gelombang seismik merupakan faktor yang sangat penting dalam metode *semblance*.

Aproksimasi kecepatan gelombang seismik, khususnya dalam kasus tremor vulkanik, dilakukan dengan memanfaatkan informasi mengenai dominasi gelombang Rayleigh pada tremor vulkanik di Gunungapi Sakurajima. Di samping itu diketahui pula bahwa nilai Poisson's *ratio* Gunungapi Sakurajima berada pada rentang 0,2 hingga 0,4 [6]. Dari informasi tersebut, dapat diasumsikan bahwa kecepatan gelombang seismik untuk tremor vulkanik di Gunungapi Sakurajima bernilai antara  $0,9v_s$  hingga  $0,95v_s$  [9]. Karena kecepatan gelombang S di Gunungapi Sakurajima bernilai 1,44 km/s [6], maka nilai kecepatan gelombang seismik untuk tremor vulkanik berada pada rentang 1,30 hingga 1,37 km/s. Untuk mendapatkan nilai kecepatan tunggal, dalam penelitian ini digunakan median dari rentang tersebut, yaitu 1,335 km/s.

Dalam penelitian ini, medium perambatan gelombang seismik diasumsikan bersifat isotropis. Dengan demikian kecepatan gelombang seismik bernilai konstan.

**Grid search.** Untuk menentukan episenter tremor vulkanik, lokasi yang mungkin mengandung episenter tremor vulkanik harus dibagi menjadi grid-grid dengan ukuran tertentu. Kemudian, waktu tunda tremor vulkanik dihitung berdasarkan travel time gelombang seismik dari tiap *node* pada *grid* ke tiap stasiun dengan menggunakan kecepatan yang telah ditentukan sebelumnya. Setelah itu, perhitungan koefisien *semblance* dapat dilakukan.

Area yang diasumsikan mengandung episenter tremor vulkanik di Gunungapi Sakurajima adalah area sekitar kawah aktif Minamidake, dengan ukuran  $2 \times 2$  km. Area tersebut kemudia dibagi menjadi grid-grid dengan ukuran  $100 \times 100$  m. Untuk mempermudah perhitungan, digunakan sistem koordinat Cartesian dengan kawah aktif Minamidake sebagai pusat koordinat.

**Perhitungan nilai error.** Untuk menghitung nilai error dalam penelitian ini,

terlebih dahulu harus dilakukan penentuan terhadap *signal-to-noise ratio* (SNR) dari seismogram yang diamati. Nilai *network-averaged-SNR* yang digunakan dalam perhitungan error terdapat pada persamaan (4).

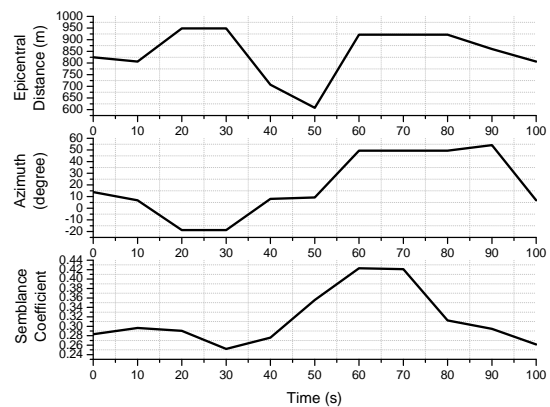
$$SNR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\max|U_i|}{nrms_i} \quad (4)$$

Dimana  $|U_i|$  adalah modulus kecepatan sinyal yang terekam pada stasiun ke-*i* dan  $nrms_i$  mewakili nilai *rms* seismogram pada time window yang hanya mengandung *noise*.

Setelah menentukan nilai SNR dari seismogram yang diamati, nilai error dari seluruh perhitungan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5) yang mendeskripsikan korelasi antara deviasi koefisien *semblance* ( $\delta S$ ) and nilai SNR.

$$\delta S = 0.062 SNR^{-1.54} \quad (5)$$

Hasil dari persamaan (5) menunjukkan akurasi dari nilai koefisien *semblance* yang dihasilkan dari perhitungan sebelumnya.



**Gambar 3.** Nilai koefisien *semblance*, *epicentral distance*, dan azimuth dari HTB90.

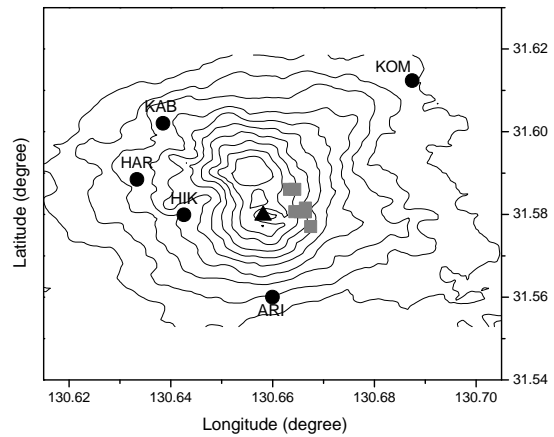
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini digunakan seismogram tremor vulkanik yang memiliki durasi rendah, yaitu 100 s. Hal ini disebabkan oleh sifat penelitian ini yang merupakan studi pendahuluan. Digunakannya metode *semblance* pada tremor vulkanik berdurasi rendah dilakukan untuk mengamati performa metode tersebut dalam penentuan episenter tremor vulkanik, sebelum dilakukannya aplikasi lebih lanjut pada tremor vulkanik dengan durasi yang lebih panjang.

Perhitungan yang telah dilakukan, menghasilkan koefisien *semblance* maksimum tiap *long window* dengan rentang nilai 0,2522 hingga 0,4231. *Epicentral distance* yang dihasilkan dari perhitungan juga bervariasi antara 707,11 hingga 948,68 m dari kawah aktif Minamidake, dengan azimuth  $-18,66^{\circ}$ - $54,10^{\circ}$  dihitung dari arah Timur. Nilai koefisien *semblance*, *epicentral distance*, dan azimuth yang dihasilkan pada tiap *long window* disajikan pada Gambar 3, sedangkan distribusi episenter tremor vulkanik HTB90 yang dihasilkan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 4.

Dalam penelitian mengenai performa metode *semblance* dalam penentuan sumber tremor vulkanik, disebutkan bahwa nilai koefisien *semblance* minimum yang diperlukan adalah 0,7 pada kondisi ideal [8]. Nilai koefisien *semblance* yang dihasilkan dalam penelitian ini tergolong rendah jika dibandingkan dengan nilai tersebut. Rendahnya nilai koefisien *semblance* yang dihasilkan dalam penelitian ini disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor pertama adalah digunakannya seismogram hasil perekaman stasiun tunggal dan bukan seismogram yang dihasilkan oleh *seismic array*. Jarak masing-masing sensor yang jauh pada sistem stasiun tunggal menyebabkan adanya pengaruh *path effect* yang besar baik pada amplitudo maupun *waveform* gelombang seismik yang terekam. Dengan demikian, seismogram yang dihasilkan sebuah stasiun akan banyak berbeda dengan seismogram yang dihasilkan stasiun lainnya. Faktor yang kedua adalah beda elevasi kelima stasiun yang digunakan yang memiliki variasi dari 121 hingga 409 m di atas permukaan laut.

Perhitungan SNR menghasilkan nilai sebesar 6,02. Perhitungan nilai error menghasilkan deviasi koefisien *semblance* sebesar 0,37%. Nilai deviasi koefisien *semblance* yang rendah menunjukkan bahwa metode *semblance* memiliki performa yang baik dalam penentuan episenter tremor vulkanik. Dengan demikian, metode ini sangat cocok digunakan untuk menentukan episenter tremor vulkanik berdurasi lebih panjang. Performa metode *semblance* dalam penentuan episenter tremor vulkanik yang diamati dengan stasiun tunggal dapat ditingkatkan dengan menggunakan seismogram yang memiliki nilai SNR tinggi.



**Gambar 4.** Distribusi episenter HTB90 yang ditentukan dengan metode *semblance* (persegi abu-abu). Episenter HTB90 cenderung tersebar pada bagian Timur kawah aktif Minamidake.

## KESIMPULAN

Nilai koefisien *semblance* maksimum yang dihasilkan dalam penelitian ini berkisar antara 0,2522 hingga 0,4231, dengan variasi *epicentral distance* antara 707,11 hingga 948,68, dan nilai *azimuth*  $-18,66^{\circ}$ - $54,10^{\circ}$  dihitung dari arah Timur. Episenter HTB90 cenderung bergerak secara dinamis. Hal tersebut diperlihatkan oleh perubahan nilai *epicentral distance* dan *azimuth* yang dihasilkan tiap *long window* pada seismogram yang diamati.

Dari hasil studi pendahuluan ini, dapat disimpulkan bahwa penggunaan metode *semblance* untuk menentukan episenter tremor vulkanik memiliki performa yang baik. Hal ini terlihat dari rendahnya nilai deviasi koefisien *semblance* yang dihasilkan dari perhitungan nilai error. Untuk memastikan bahwa penggunaan metode *semblance* dengan stasiun tunggal memberikan hasil yang baik, harus digunakan seismogram dengan SNR yang tinggi. Penggunaan *seismic array* juga patut dipertimbangkan apabila dibutuhkan nilai koefisien *semblance* yang tinggi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterimakasih pada seluruh pihak yang terlibat dalam penelitian ini, khususnya Laboratorium Geofisika, Jurusan

Fisika, Universitas Brawijaya dan Sakurajima Volcanological Research Center (SVRC), Kyoto University.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Kawakatsu, S. Kaneshima, H. Matsubayashi, T. Ohminato, Y. Sudo, T. Tsutsui, K. Uhira, H. Yamasato, H. Ito, and D. Legrand (2000), Aso Seismic Observation with Broadband Instrument, *Volcanology and Geothermal Research* **101**, pp 129-154.
- [2] N. Takagi, S. Kaneshima, H. Kawakatsu, M. Yamamoto, Y. Sudo, T. Ohkura, S. Yoshikawa, and T. Mori (2006), Apparent Migration of Tremor Source Synchronized with the Change in the Tremor Amplitude Observed at Aso Volcano, Japan, *Volcanology and Geothermal Research* **154**, pp 181-200.
- [3] K. Tsuruga, K. Yomogida, S. Honda, H. Ito, T. Ohminato, and H. Kawakatsu (1997), Spatial and Temporal Variation of Volcanic Earthquakes at Sakurajima Volcano, Japan, *Volcanology and Geothermal Research* **75**, pp 337-358.
- [4] T. Tameguri, S. Maryanto and M. Iguchi (2007), Source Mechanism of Harmonic Tremors at Sakurajima Volcano, *Bull. Volcanol. Soc. Japan* **52**, pp 273-279.
- [5] K. Ishihara and M. Iguchi (1989), The Relationship Between Micro-earthquake Swarms and Volcanic Activity at Sakurajima Volcano, *Disaster Prevention Research Institute Annuals*.
- [6] S. Maryanto, M. Iguchi, and T. Tameguri (2008), Constraint on The Source Mechanism of Harmonic Tremors Based on Seismological, Ground Deformation, and Visual Observations at Sakurajima Volcano, *Volcanology and Geothermal Research* **170**, pp 198-217.
- [7] N. Neidell, S., and T. Tarner (1971), Semblance and Other Coherency Measures for Multichannel Data, *Geophysics* **36 No.3**, pp 263-278.
- [8] J. Almendros and B. Chouet (2003), Performance of Radial Semblance Method for the Location of Very Long Period Volcanic Signals, *Bulletin of Seismological Society of America*, **93 No. 5**, pp 1890-1903.
- [9] Lay, T and Wallace (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press. California.
- [10] Chouet, B (1989), Resonance of a fluid-driven crack : Radiation properties and implications for the source of long period-events and harmonic tremor, *J. Geophys. Res.*, **93**, pp 4373-4400.
- [11] Minakami, T (1960). Fundamental Research for Predicting Volcanic Eruptions, *Bulletin of The Earthquake Research Institut* **38**, pp 497-544.