



**ANALISIS SPEKTRUM SINYAL GEMPA
VULKANO-TEKTONIK (VT-A dan VT-B) di
GUNUNG KELUD**

Pembimbing :

OLEH:

LAILATUL HUSNA BR LUBIS

NIP. 19900527 201903 2 020

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUMATERA UTARA
MEDAN
2020**

**Judul : ANALISIS SPEKTRUM SINYAL GEMPA
VULKANO-TEKTONIK (VT-A DAN VT-B)
DI GUNUNG KELUD**

Nama : Lailatul Husna Br Lubis

NIP : 19900527 201903 2 020

**FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
PROGRAM STUDI FISIKA**

**LAILATUL HUSNA Br LUBIS
Analisis Spektrum Sinyal Gempa Vulkano-Tektonik
(VT-A Dan VT-B) Di Gunung Kelud**

x + 47 halaman, 3 tabel, 2 lampiran

ABSTRAK

Gempa vulkanik merupakan salah satu indikator yang menggambarkan proses naiknya magma ke puncak gunung api. Dalam istilah kegunungapian, gempa tektonik yang terjadi di sekitar gunung api disebut sebagai gempa vulkano-tektonik. Jika dilihat dari bentuk sinyalnya, maka bentuk sinyal vulkano tektonik A dan B memiliki kemiripan, dan hanya bisa dibedakan ketika sinyal dipotong dalam rentang waktu yang pendek, yaitu kurang dari 150 detik. Kemiripan bentuk sinyal ini menggambarkan proses perjalanan gelombang Primer dan skunder yang melewati medium bumi.

Sinyal gempa vulkano tektonik (VT-A dan VT-B) dapat digunakan sebagai analisis awal dalam pengolahan sinyal. Klasifikasi sinyal gempa vulkano tektonik di gunung kelud mulai tanggal 16 sampai 27 oktober menunjukkan jumlah gempa VT-A yang terjadi sebanyak 38 kejadian, dan jumlah VT-B sebanyak 132 kejadian. Spektrum sinyal VT-A berkisar antara 6 sampai 9 Hz, dan spektrum sinyal VT-B berkisar antara 5 sampai 7 Hz

Kata Kunci : *gempa vulkanik, gempa vulkano tektonik A, gempa vulkano tektonik B, spektrum*

**SCIENCE AND TECHNOLOGY FAKULTY
DEPARTMENT OF PHYSICS**

LAILATUL HUSNA BR LUBIS

**Spectrum Analysis of Vulcano-Tectonic Signal
(VT-A And VT-B) In Mount Kelud**

x + 47 pages, 3 tables, 2 attachments

ABSTRACT

Volcanic earthquakes are one of the indicators that describe the process of rising magma to the top of a volcano. In terms of volcanoes, tectonic earthquakes that occur around volcanoes are referred to as volcanic-tectonic earthquakes. If viewed from the signal form, then the tectonic volcanic signal form A and B have similarities, and can only be distinguished when the signal is cut in a short span of time, which is less than 150 seconds. The similarity of these signal forms describes the process of travel of the Primary and secondary waves that pass through the earth medium.

The tectonic volcanic earthquake signal form (VT-A and VT-B) is the initial analysis for subsequent analysis. The classification of tectonic volcanic earthquake signals in Mount Kelud from October 16 to 27 shows the number of VT-A earthquakes that occurred as many as 27 events, and the number of VT-B earthquakes as many as 25 incidents. The VT-A signal spectrum ranges from 6 to 9 Hz, and the VT-B signal spectrum ranges from 5 to 7 Hz

Keywords : vulcano earthquake, vulcano-tectonic A, Vulcano-tectonic B, spectrum

Judul : Analisis Spektrum Sinyal Gempa Vulkano-Tektonik (VT-A Dan VT-B) Di Gunung Kelud

SURAT REKOMENDASI


Saya yang bertanda tangan di bawah ini, menyatakan bahwa penelitian saudara :

Nama : **Lailatul Husna Br Lubis**
NIP : 19900527 201903 2 020
Tempat/tanggal lahir : Kisaran, 27 Mei 1990
Jenis Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Pangkat/Gol : Penata Muda TK.I (III/b)
Unit Kerja : Fakultas Sains dan
Teknologi UIN Sumatera Utara
Medan
Judul Penelitian : Analisis Spektrum Sinyal
Gempa Vulkano-Tektonik
(Vt-A Dan Vt-B) Di Gunung
Kelud

Telah memenuhi syarat sebagai suatu karya ilmiah, setelah membaca dan memberikan masukan saran-saran terlebih dahulu.

Demikian surat rekomendasi ini diberikan untuk dapat dipergunakan seperlunya.

Medan, 09 September 2020
Konsultan I,



Dr. Abdul Halim Daulay, S.T.,M.Si
NIP. 19811106 200501 1 003

SURAT REKOMENDASI

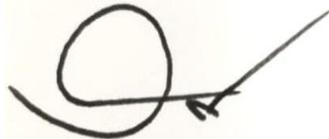
Saya yang bertanda tangan di bawah ini, menyatakan bahwa penelitian saudara :

Nama : **Lailatul Husna Br Lubis**
NIP : 19900527 201903 2 020
Tempat/tanggal lahir : Kisaran, 27 Mei 1990
Jenis Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Pangkat/Gol : Penata Muda TK.I (III/b)
Unit Kerja : Fakultas Sains dan
Teknologi UIN Sumatera
Utara Medan
Judul Penelitian : Analisis Spektrum Sinyal
Gempa Vulkano-Tektonik
(Vt-A Dan Vt-B) Di Gunung
Kelud

Telah memenuhi syarat sebagai suatu karya ilmiah, setelah membaca dan memberikan masukan saran-saran terlebih dahulu.

Demikian surat rekomendasi ini diberikan untuk dapat dipergunakan seperlunya.

Medan, 09 September 2020
Konsultan II,



Muhammad Nuh, S.Pd., M.Pd
NIP. 19750324 200710 1 001

KATA PENGANTAR

Alhamdulillahirabbila'lamin, Puji syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga laporan penelitian ini dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Penelitian ini berjudul "Analisis Spektrum Sinyal Gempa Vulkano-Tektonik (Vt-A Dan Vt-B) Di Gunung Kelud". Proses penyusunan laporan ini tidak terlepas dari bantuan dan dorongan dari berbagai pihak, baik moril maupun materiil. Karena itu penulis mengucapkan terimakasih kepada rekan-rekan yang telah membantu dan terutama kepada Kedua Konsultan yang memberi masukan-masukan positif untuk membuat laporan ini menjadi lebih baik.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan masukan berupa kritik dan saran demi kesempurnaan penelitian ini. Akhirnya penulis berharap semoga laporan penelitian ini dapat bermanfaat.

Medan, 09 september 2020

DAFTAR ISI

ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
SURAT REKOMENDASI	iv
SURAT REKOMENDASI	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR TABEL	ix
DAFTAR GAMBAR	x
BAB I PENDAHULUAN	14
1.1 Latar Belakang	14
1.2 Rumusan Masalah	16
1.3 Batasan Masalah	16
1.4. Tujuan Penelitian	16
1.5. Manfaat Penelitian	16
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	17
2.1 <i>Gunung Kelud</i>	17
2.2. Proses terbentuknya Gunung Api	19
2.3. Gempa vulkanik	21
2.4. Klasifikasi gempa vulkanik	21
2.4.1. Sinyal gempa vulkanik - tektonik tipe A (VT-A)	21
2.4.2 Sinyal gempa vulkanik - tektonik tipe B (VT-B)	22
2.4.3. Sinyal gempa <i>low-frequency</i> (LF)	23
2.4.4. Sinyal gempa <i>multhi-phase</i> (MP)	24

2.4.5. Sinyal gempa tremor	24
BAB III METODE PENELITIAN	26
3.1 Lokasi Penelitian dan Waktu Penelitian	26
3.2 Peralatan Penelitian.....	26
3.3 Pengumpulan Data	26
3.4 Metode Pengolahan Data	28
3.4.1. Pembacaan data	28
3.4.2. Pengeditan header data	29
3.4.3 Koreksi garis dasar (<i>baseline correction</i>).....	29
3.4.4 Pemilihan <i>Event</i> Seismik.....	31
3.4.5 Pemotongan <i>event</i> seismik	32
3.4.6 Pengklasifikasian <i>event</i> seismik.....	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	35
4.1 Hasil karakterisasi sinyal gempa vulkanik.....	35
4.2 Sinyal gempa vulkanik-tektonik tipe a.....	35
4.3 Sinyal gempa vukanik - tektonik tipe B (VT-B)	41
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	46
5.1 Kesimpulan.....	46
5.2 Saran.....	46
DAFTAR PUSTAKA.....	47

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Posisi Stasiun seismik Gunung Kelud 2007 (PVMBG, 2014).....	27
Tabel L. 1 Event gempa vulkano-tektunik A dan nilai spectrum dari masing-masing event gempa di stasiun yang berbeda	49
Tabel L. 2 Event gempa vulkano-tektunik A dan nilai spektrum dari masing-masing event gempa di stasiun yang berbeda ...	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Gunung kelud sebelum erupsi 2007	17
Gambar 2. 2 Batas Lempeng	20
Gambar 2. 3 Gempa vulkanik VT-A yang terekam di Gunung Merapi dengan waktu tiba gelombang P dan S yang terlihat jelas. (Wasserman, 2002).	22
Gambar 2. 4 Gempa vulkanik VT-B yang terekam pada Gunung Merapi dengan waktu tiba gelombang P terlihat jelas dan gelombang S tidak terlihat jelas (Wasserman, 2002).	23
Gambar 2. 5 Gempa vulkanik <i>low - frequency</i> yang terekam pada Gunung Merapi dengan frekuensi sekitar 1 Hz (Wasserman, 2002).	23
Gambar 2. 6 Gempa vulkanik <i>multi - phase</i> yang terekam pada Gunung Merapi dengan frekuensi sekitar 3 - 8 Hz dengan amplitudo yang lebih kecil dari sinyal VT - B (Wasserman, 2002).	24
Gambar 2. 7 Sinyal gempa tremor di Gunung Merapi (Wasserman, 2002).	25
Gambar 3. 1 Peta posisi stasiun seismik Gunung Kelud saat erupsi tahun 2007.	27
Gambar 3. 2 Contoh data gempa vulkanik pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 02:22 WIB yang dibuka menggunakan <i>Software Ls7_WVE</i>	28

Gambar 3. 3 Proses pengeditan data kedalam format mseed menggunakan aplikasi geopsy.....	29
Gambar 3. 4 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang belum dikoreksi garis dasar pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 03:00 WIB.....	30
Gambar 3. 5 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang sudah dikoreksi garis dasar pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 03:00 WIB.....	31
Gambar 3. 6 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang sudah dikoreksi garis dasar dan kemudian di cek event seismik yang terjadi dalam setiap hari nya untuk dilakukan pemotongan masing event seismiknya.....	32
Gambar 3. 7 Pemotongan <i>event</i> seismik pada tanggal 17 Oktober 2007 dari pukul 03:03:30 – 03:04:30 WIB.....	33
Gambar 3. 8 Diagram alir pengolahan data seismik Gunung Kelud.....	34
Gambar 4. 1 Event gempa yang terekam di stasiun KLD, GMK, SMB, KWH pada tanggal 18 Oktober 2007 selama 1 jam.....	36
Gambar 4. 2 Event gempa yang terekam di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36.....	36
Gambar 4. 3 Spektrum dari rekaman gempa di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36.....	37

Gambar 4. 4 Event gempa yang terekam di stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36	37
Gambar 4. 5 Spektrum dari rekaman gempa stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36	38
Gambar 4. 6 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36	38
Gambar 4. 7 Spektrum dari rekaman gempa di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36	39
Gambar 4. 8 Event gempa yang terekam di stasiun KWH pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36	39
Gambar 4. 9 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36	40
Gambar 4.10 Event gempa yang terekam di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	41
Gambar 4.11 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	41
Gambar 4.12 Event gempa yang terekam di stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	42
Gambar 4.13 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	42
Gambar 4.14 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	43
Gambar 4.15 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	43

Gambar 4.16 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	44
Gambar 4.17 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42	44

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Ilmu pengetahuan dan teknologi yang semakin berkembang menuntut peneliti untuk meningkatkan kualitas dalam setiap output penelitiannya. Salah satu penelitian yang tetap ditunggu adalah penelitian terkait kegempaan dan gunung api. Permasalahan gempa bumi dan gunung api sangat erat hubungannya dengan kehidupan manusia, sebagai upaya mitigasi bencana dalam melindungi masyarakat.

Indonesia mempunyai gunungapi aktif lebih kurang 129 buah gunung api yang tersebar dari sabang hingga marauke. Keaktifan gunungapi tersebut dapat dilihat dari posisi wilayah Indonesia yang masuk pada zona penunjaman. Zona penunjaman tersebut muncul akibat aktivitas pergeseran lempeng tektonik, sehingga membuat gunungapi di wilayah Indonesia banyak yang aktif. Karena itu pemantauan dari pemerintah terhadap gunungapi di Indonesia dilakukan secara kontiniu khususnya pada gunung api yang rutin terjadi erupsi.

Kejadian gempa bumi di gunung api merupakan salah satu indikator untuk mengantisipasi terjadinya erupsi yang dapat membahayakan masyarakat. Pada dasarnya penentuan sinyal gempa vulkanik bisa dijadikan acuan untuk upaya mitigasi bencana yang selalu dibicarakan oleh lembaga pemerintahan yang menaungi hal tersebut. Geofisika merupakan salah satu cabang ilmu yang mempelajari tentang ilmu bumi berdasarkan konsep fisika. Sebagian besar metode geofisika sudah mengarah ke teknologi yang mengharuskan analisis parameternya secara real time ¹

¹ Wulandari, H.T. 2010. Analisis Sinyal Seismik Gunungapi Merapi Berdasarkan Identifikasi Gempa Multiphase Sebelum Dan Sesudah Letusan 14 Juni 2006. *Skripsi*. FMIPA. Universitas Sebelas Maret, Surakarta

Jika ditinjau berdasarkan penyebab kejadiannya, maka kegempaan dibagi menjadi dua yaitu gempa tektonik dan gempa vulkanik, dimana Gempa vulkanik adalah gempa yang diperoleh dari aktivitas gunungapi dan tercatat secara visualisasi oleh seismogram². Parameter yang digunakan untuk menganalisis gempa vulkanik adalah bentuk sinyalnya (waveform). Bentuk sinyal gempa vulkanik menggambarkan proses perjalanan magma dari dapur magma yang berada di dalam bumi hingga menuju puncak gunung api³. Perjalanan magma menuju permukaan gunungapi ditandai dengan perubahan bentuk sinyal gempa yang dihasilkan dari rekaman seismograf.

Penelitian terkait bentuk sinyal gempa vulkanik sudah dilakukan oleh Wassermann⁴ di gunung api Merapi Yogyakarta. Penelitiannya menunjukkan bentuk sinyal yang berbeda-beda dari aktivitas kegempaan gunung api yang terjadi akibat pengaruh pergerakan lempeng tektonik, dimana jenis sinyal yang diperoleh disebut sebagai sinyal gempa vulkano tektonik. Sinyal yang terekam pada seismogram ini dapat terjadi akibat pengaruh pergerakan magma dari lempeng bumi menuju ke permukaan gunung api.

Gunung Kelud yang terletak di provinsi Jawa Timur merupakan salah satu gunung yang sangat aktif, dilihat dari peristiwa erupsi yang sudah terjadi sejak tahun 1901, 1919, 1951, 1966, 1990, 2007, hingga yang terakhir tahun 2014. Karena itu pemantauan aktivitas kegempaan di gunung ini cukup menjadi acuan untuk gunung lain seperti layaknya gunung Merapi. Penelitian ini akan membahas spektrum sinyal gempa vulkano-tektonik (VT-A dan VT-B)

² Syahra, V., Maryanto, S, Triastuty, H. 2014. Analisis Spektral Dan Distribusi Hiposenter Gempa Vulkanik A Dan Vulkanik B Gunungapi Ijen Jawa Timur. Universitas Brawijaya

³ Zobin, V.M., 2003, *Introduction to Volcanic Seismology. Developments in volcanology*;6. Elsevier Science. B.V.

⁴ Wassermann, J., 2002, *Volcano Seismology. IASPEI, New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP) Volume 1*. GeoForschungsZentrum Potsdam, Jerman.

yang terekam sebelum dan sesudah erupsi di Gunung Kelud.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana bentuk sinyal gempa vulkano tektonik (VT-A dan VT-B) yang terekam pada seismogram.
2. Bagaimana perbedaan bentuk sinyal yang terekam pada seismogram sebelum dan sesudah erupsi

1.3 Batasan Masalah

Permasalahan yang akan dibatasi dalam penelitian ini adalah :

- 1 Data yang digunakan adalah data mulai tanggal 15 sampai 27 oktober 2007
- 2 Sinyal gempa vulkanik yang dianalisis hanya gempa vulkano-tektonik A dan B.

1.4. Tujuan Penelitian

Mengetahui spektrum sinyal gempa vulkano tektonik yang terjadi ketika letusan kelud tahun 2007.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan untuk penelitian berikutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Gunung Kelud

Gunung Kelud adalah salah satu gunung api aktif yang terletak di provinsi Jawa Timur, dan berbatasan dengan beberapa kabupaten yaitu Kediri, Malang dan Blitar. Dalam istilah kegunungpian, gunung Kelud termasuk salah satu gunung dengan tipe stratovulcano, dengan tipe letusan adalah letusan eksplosif, dimana pada tahun 2014 tercatat bahwa hasil letusan gunung Kelud berupa abu vulkanik hampir menutupi sebagian besar wilayah Yogyakarta⁵.

Gunung Kelud merupakan salah satu aset pariwisata yang ada di daerah Kediri, Blitar dan Malang, dimana kawahnya yang sangat indah dapat dilihat dari beberapa kabupaten dan menjadi aset pemasukan pariwisata bagi setiap daerah yang meliputinya.



Gambar 2. 1 Gunung Kelud sebelum erupsi 2007

⁵ Syiko, S.F., Rachmawati, T.A., Rachmansyah, A., 2014. Analisis Resiko Bencana Sebelum dan Setelah Letusan Gunung Kelud Tahun 2014 (Studi kasus di Kecamatan Ngantang, Malang). *Jurnal Pembangunan dan Alam Lestari*. Vol 5.No.2.

Gambaran tersebut dapat dilihat dari ramainya pengunjung obyek wisata G. Kelud dari tahun ke tahun (Gambar 1.1). Infrastruktur dan aset pariwisata terus dibangun di kawasan rawan bencana, sehingga masyarakat lupa akan kekuatan erupsi dari G. Kelud⁶. Aktivitas vulkanik gunung kelud sudah menjadi pantauan dari banyak peneliti, Lesage dan Surono (1994) melakukan penelitian terkait tanda-tanda terjadinya erupsi Gunung Kelud 10 Februari 1990 melalui rekaman gempa yang diperoleh dari PVMBG (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi)⁷.

Aktivitas seismik mengalami peningkatan sejak November 1989, tepatnya tiga bulan sebelum erupsi. Dalam sehari terjadi rata-rata delapan kali gempa VT (*Vulcano-tectonic*) sejak November 1989 sampai Februari 1990 dan pelepasan energi yang terjadi sebesar $5,6 \times 10^8$ joule⁸. Nilai ini sangat rendah untuk gunungapi andesit seperti Gunung Kelud. Pelepasan energi yang rendah menunjukkan bahwa penyumbat magma tidak memberikan hambatan yang besar terhadap aliran magma yang naik menuju permukaan, sehingga magma dengan mudah naik ke permukaan.

Tahun 2007 gunung kelud kembali mengalami erupsi dengan jenis letusan yang berbeda dari biasanya, jika dilihat dari sejarah letusannya, maka letusan gunung ini bersifat eksplosif, namun khusus pada tahun 2007, aktivitas kegempaan yang sudah meningkat sejak pertengahan oktober hingga akhir oktober dan mengalami puncaknya ketika tanggal 4 november, ternyata tidak mengalami letusan apapun, hanya membentuk kubah lava yang menutupi danau kawah yang sudah terbentuk dari

⁶ Balai Pelestarian Cagar Budaya DIY, 2014. Dampak Abu Vulkanik Gunung Kelud di Kota Yogyakarta. https://kebudayaan.kemdikbud.go.id/bpcbyogyakarta/dampak-abu-vulkanik-gunung-kelud-di-kota_yogyakarta/ (19 februari 2014). [Diakses 15 Agustus 2020]

⁷ Lesage, Ph. dan Surono, 1994. Seismic Precursors of the february 10, 1990 eruption of Kelud volcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 65. 135-146.

⁸ Kirbani, S.R., dan Wahyudi., 2007, Eruption of The Kelud Volcano and B-Value of its Surrounding Earthquakes, *Jurnal Geofisika UGM*, Yogyakarta.

letusan sebelumnya. Fenomena ini dalam istilah vulkanologi disebut sebagai letusan epusif.

Penelitian terkait sinyal seismik di Gunung Kelud dilakukan oleh Arisalwadi (2012)⁹, yang membahas secara khusus tentang karakteristik sinyal gempa vulkanik untuk periode 1 sampai 9 November 2007 tepatnya setelah aktivitas vulkanik Gunung Kelud mulai menurun. Analisis yang dilakukan adalah analisis terhadap kandungan frekuensi sinyal gempa yang dihasilkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan karakteristik gempa vulkanik yang terjadi pada Gunung Kelud didominasi oleh *multiphase event* dengan frekuensi 2 - 10 Hz, Vulkanik - tektonik B dengan kandungan frekuensi 2 - 8 Hz, dan tremor vulkanik dengan kandungan frekuensi 2 - 8 Hz.

Letusan Gunung Kelud tahun 2007 diperkirakan eksplosif, namun letusan yang terjadi bersifat efusif dengan pembentukan kubah lava yang baru. Hal ini mengakibatkan adanya deformasi pada Gunung Kelud yang kemudian diteliti oleh Haerani, dkk., (2010)¹⁰ dengan melakukan pemantauan berdasarkan GPS. Pemantauan dilakukan selama April hingga Oktober 2008 dimana Gunung Kelud masih mengalami inflasi (penggembungan). Hal ini menunjukkan bahwa aktivitas magma masih terjadi, namun bersifat semu karena tidak didukung oleh manifestasi di permukaan.

2.2. Proses terbentuknya Gunung Api

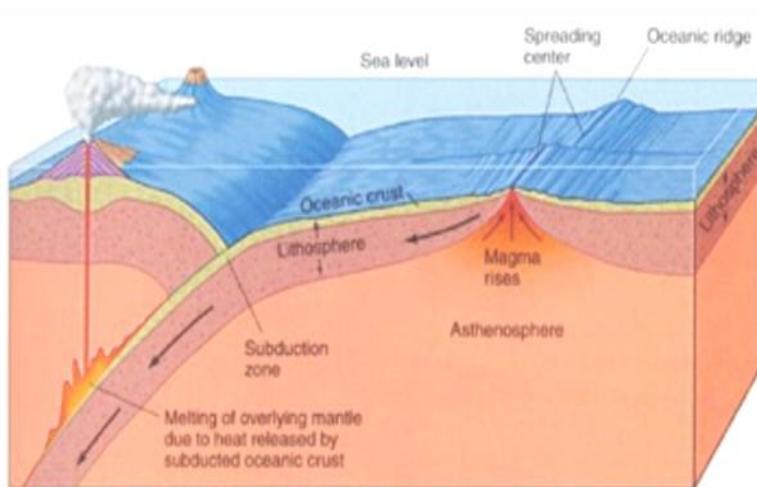
Sebagian besar gunungapi berada di dekat batas lempeng di mana lempeng-lempeng bertabrakan dan satu lempeng turun di bawah lempeng lain. Lempeng yang turun mulai mencair dan membentuk magma. Magma

⁹ Arisalwadi, M., 2012, Karakteristik Sinyal Gempa Vulkanik Gunung Kelud Setelah Erupsi Tahun 2007, *Skripsi*, FMIPA Universitas Mataram. Mataram.

¹⁰ Haerani, N., Hendrasto, M., dan Abidin, H.Z., 2010. **Deformasi Gunung Kelud Pasca Pembentukan Kubah Lava November 2007**. *Jurnal Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*, Badan Geologi, Bandung.

mengandung air dan endapan-endapan. Magma yang baru terbentuk naik melalui retakan dan meletus pada permukaan membentuk gunung berapi pada lempeng utama. Retakan disebabkan oleh pergerakan lempeng. Sebagian besar magma memadat pada sisi lempeng tetapi sebagian naik melalui retakan dan mencapai permukaan membentuk gunung berapi. Saat membeku magma mengeras dan membentuk batuan vulkanis seperti basal.

Ada gunung berapi yang terbentuk letaknya jauh dari batas-batas lempeng. Gunung berapi ini terbentuk karena ada daerah ekstra panas yang terisolasi, dikenal sebagai 'bintik panas'. Arus panas diperkirakan naik melalui mantel di dalam bintik panas. Magma terbentuk dan naik melintasi litosfer untuk membentuk gunung berapi (Gambar 2.1).



Gambar 2. 2 Batas Lempeng

Dapur magma membesar saat magma panas meresap ke dalam ke dalam retakan-retakan kecil di sekeliling batuan, mencairkan batuan yang dilaluinya. Retakan yang membesar dikenal dengan pipa. Tempat sebuah pipa terbuka di permukaan disebut diatrema. Saat letusan

terjadi magma mengalir di sepanjang pipa dari dapur magma dan keluar melalui diatrema di permukaan bumi.

2.3. Gempa vulkanik

Istilah kegempaan jika ditinjau dari penyebabnya, dibagi menjadi dua bagian yaitu gempa vulkanik dan gempa tektonik. Gempa tektonik adalah gempa yang disebabkan karena adanya pergerakan lempeng tektonik, sementara gempa vulkanik adalah gempa yang disebabkan karena aktivitas gunungapi¹¹. Gempa vulkanik menunjukkan adanya aktivitas magma dari dapur magma menuju ke puncak gunung api.

2.4. Klasifikasi gempa vulkanik

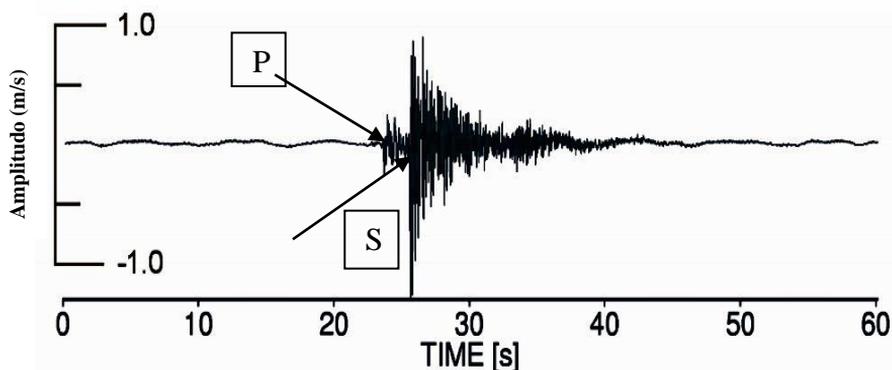
Gempa vulkanik dapat terjadi karena adanya peningkatan aktivitas gunungapi yang disebabkan oleh pergerakan magma, rekahan maupun tekanan gas atau fluida yang berasal dari gunungapi tersebut. Menurut Wasserman (2002), sinyal gempa vulkanik diklasifikasikan berdasarkan kenampakan sinyal secara visual, kandungan frekuensi serta mekanisme sumbernya. Klasifikasi sinyal tersebut akan diuraikan dalam penjelasan berikutnya.

2.4.1. Sinyal gempa vulkanik - tektonik tipe A (VT-A)

Gempa bumi vulkanik – tektonik tipe A atau biasa disebut dengan VT-A terjadi pada kedalaman > 2 km. Gempa ini terjadi karena adanya pergeseran pada batuan di bawah gunungapi yang disebabkan oleh peningkatan stress (tegangan) yang berasal dari pengaruh gaya gravitasi serta gerakan lempeng tektonik. Sinyal gempa ini ditandai dengan waktu tiba gelombang P dan S yang terlihat jelas, dengan kandungan frekuensi > 5 Hz.

¹¹ Husein, S., 2009. *Handout Geologi Dasar*. Jurusan Teknik Geologi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada.

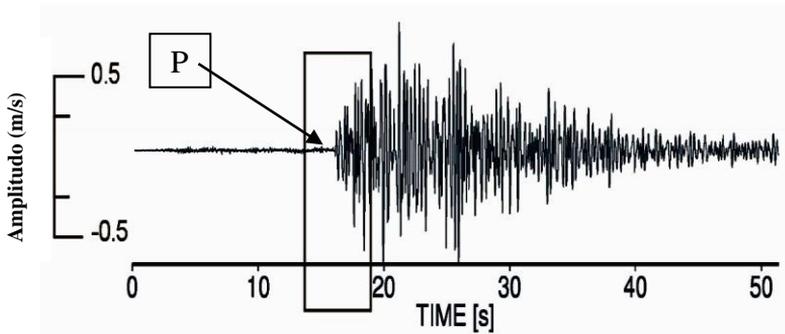
Gempa ini dapat dikategorikan dalam jenis gelombang frekuensi tinggi (*high Frequency - HF*). Secara visual bentuk sinyal gempa VT - A ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 2. 3 Gempa vulkanik VT-A yang terekam di Gunung Merapi dengan waktu tiba gelombang P dan S yang terlihat jelas. (Wasserman, 2002).

2.4.2 Sinyal gempa vulkanik - tektonik tipe B (VT-B)

Gempa bumi vulkanik tektonik tipe B atau biasa disebut dengan VT-B, terjadi pada kedalaman 1 sampai 2 km dan berasal dari kawah yang masih aktif. Sinyal gempa VT - B ditandai dengan waktu tiba gelombang P yang terlihat jelas, namun gelombang S tidak terlihat jelas. Frekuensi pada sinyal ini rendah yaitu sekitar 1 - 5 Hz. Jika dilihat secara visual bentuk sinyal gempa VT-B seperti yang terlihat pada Gambar 2.3.

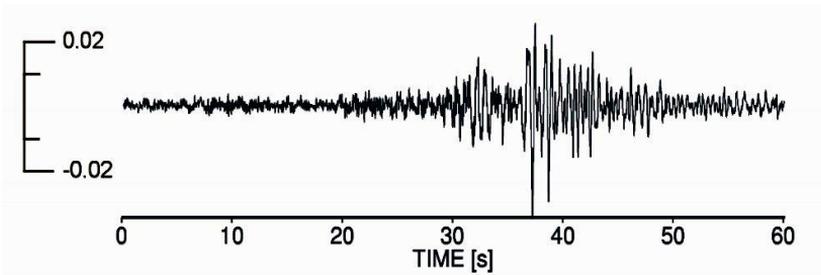


3.2

Gambar 2. 4 Gempa vulkanik VT-B yang terekam pada Gunung Merapi dengan waktu tiba gelombang P terlihat jelas dan gelombang S tidak terlihat jelas (Wasserman, 2002).

2.4.3. Sinyal gempa *low-frequency* (LF)

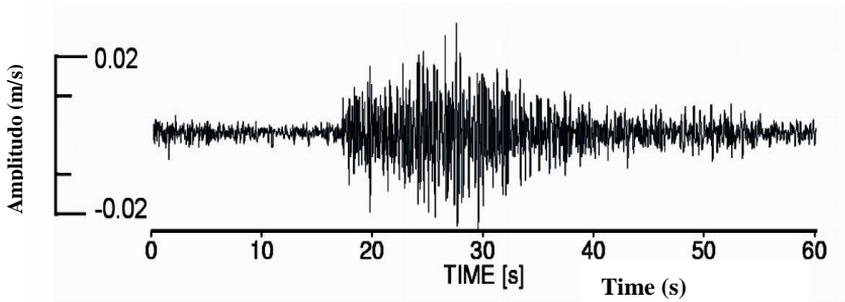
Gempa ini sering dihubungkan dengan gempa VT-B (dangkal) karena frekuensinya berkisar antara 1 - 3 Hz. Gempa ini tidak menunjukkan adanya kedatangan gelombang S, serta terjadi pada kedalaman dangkal (lebih kecil dari 2 km). Gempa LF dapat terjadi karena adanya resonansi *crack* ketika magma naik ke permukaan (Chouet, 1996a). Bentuk sinyal gempa ini ditunjukkan oleh Gambar 2.4.



Gambar 2. 5 Gempa vulkanik *low - frequency* yang terekam pada Gunung Merapi dengan frekuensi sekitar 1 Hz (Wasserman, 2002).

2.4.4. Sinyal gempa *multhi-phase* (MP)

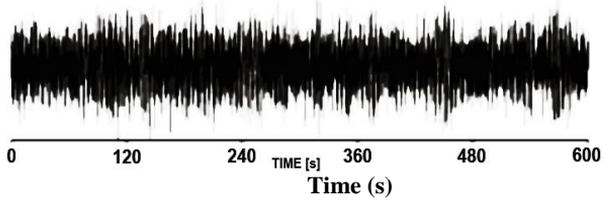
Gempa ini sering disebut sebagai gempa banyak fase dan memiliki frekuensi yang berkisar antara 3 - 8 Hz (Gambar 2.5). Gempa ini biasanya terjadi pada lokasi yang sangat dangkal dan mengindikasikan adanya pembentukan kubah lava pada gunungapi.



Gambar 2. 6 Gempa vulkanik *multi - phase* yang terekam pada Gunung Merapi dengan frekuensi sekitar 3 - 8 Hz dengan amplitudo yang lebih kecil dari sinyal VT - B (Wasserman, 2002).

2.4.5. Sinyal gempa tremor

Gempa tremor merupakan gempa yang terjadi secara terus menerus selama masih ada aktivitas pada gunungapi. Durasi sinyal tremor dapat terjadi dalam kurun waktu beberapa menit hingga beberapa jam. Sinyal tremor pada suatu rekaman gempa menggambarkan adanya pergerakan magma yang menuju ke permukaan. Sinyal ini secara visual tidak dapat menunjukkan perbedaan antara gelombang P dan gelombang S. Contoh bentuk sinyal tremor pada Gunung Merapi yang terekam pada seismogram seperti Gambar 3.5.



Gambar 2. 7 Sinyal gempa tremor di Gunung Merapi (Wasserman, 2002).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juni 2014 – Oktober 2015 di Laboratorium Geofisika, Fakultas MIPA, Universitas Gadjah Mada (UGM). Data yang digunakan dalam penelitian ini direkam oleh empat buah stasiun vulkanologi Gunung Kelud pada bulan Oktober tahun 2007.

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak, antara lain :

1. Laptop yang digunakan untuk menjalankan program.
2. Perangkat lunak *Google earth* dan *Arc Gis 10.1* yang digunakan untuk membuat peta lokasi gunungapi dan posisi stasiun seismik.
3. Perangkat lunak *Ls - 7 WVE* yang digunakan untuk mengkonversi data kedalam bentuk ASCII.
4. Perangkat lunak *Geopsy* yang digunakan untuk mengubah header data.
5. Perangkat lunak *ObsPy 0.9.2* yang digunakan untuk mengolah data sinyal gempa vulkanik.

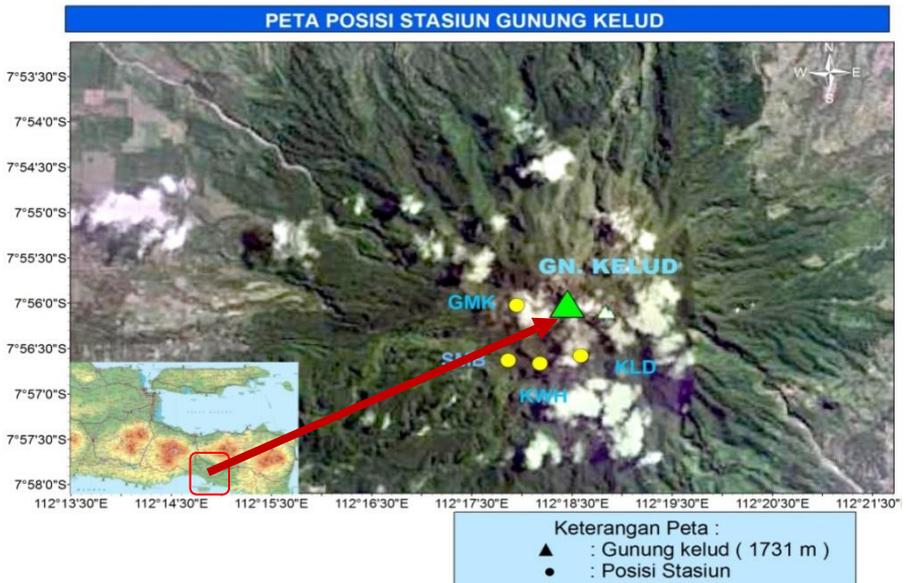
3.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data rekaman seismik yang diperoleh dari empat stasiun seismik yang berada di sekitar wilayah Gunung Kelud yaitu Stasiun Kelud, Sumbing, Gajah Mungkur dan Kawah (Gambar 4.1). Data seismik yang digunakan adalah data pada tanggal 16 sampai 30 Oktober 2007 dengan jumlah data yang dianalisis sebanyak 392 data. Setiap data berisi informasi rekaman empat stasiun seismik.

Data tersebut diperoleh dari sensor *Mark Products* tipe L - 4C. Sensor ini merupakan sensor komponen vertikal yang ditempatkan pada empat stasiun di sekitar Gunung Kelud dengan posisi seperti tertera pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Posisi Stasiun seismik Gunung Kelud 2007 (PVMBG, 2014)

Stasiun	Channel	Latitude (LS)	Longitude (BT)	Ketinggian
Kelud (KLD)	0001h	07°56'36"	112°18'37.3"	1429 m
Sumbing (SMB)	0002h	07°56'41.7"	112°17'55.6"	1350 m
Gajah Mungkur(GMK)	0003h	07°56'4.38"	112°17'58.8"	1329 m
Kawah (KWH)	0004h	07°56'32.8"	112°18'13.9"	1257 m



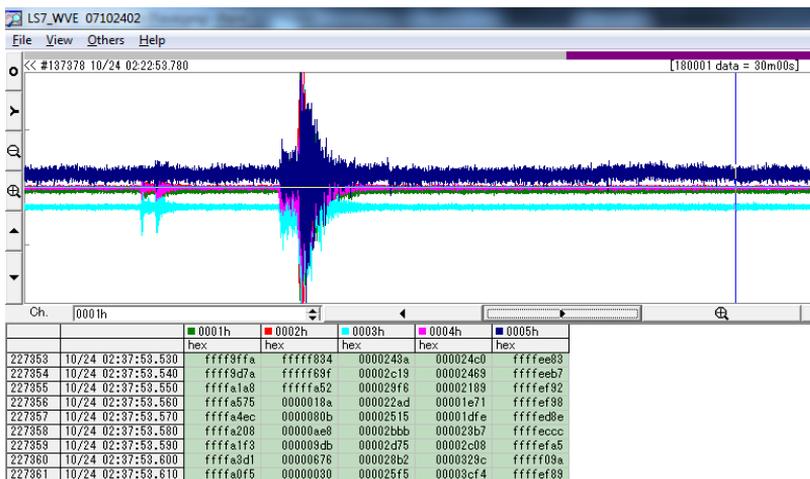
Gambar 3. 1 Peta posisi stasiun seismik Gunung Kelud saat erupsi tahun 2007.

3.4 Metode Pengolahan Data

Tahapan pengolahan data yang dilakukan dalam penelitian ini sebagai berikut :

3.4.1. Pembacaan data

Data hasil rekaman seismik yang diperoleh berupa data dalam bentuk heksadesimal yang direkam secara terus menerus selama 24 jam. Data ini terpisah dalam beberapa folder sesuai dengan tanggal, bulan dan tahun saat data tersebut direkam. Setiap rekaman data berisi 24 file yang merupakan rekaman dalam satu hari (24 jam) dengan ekstensi file *.00, *.01, *.02,... Data yang telah terpisah menjadi 24 file ini merupakan data rekaman digital dalam bentuk heksadesimal, sehingga tidak dapat terbaca oleh perangkat lunak yang standar digunakan dalam *Microsoft Windows*. Data ini harus terlebih dahulu dibaca dengan perangkat lunak tertentu yaitu *Datamark Assist LS-7000 series ver. 3.066.1447 (Ls7_WVE)* (Gambar 3.2). *Software* ini yang digunakan untuk membaca data seismik dalam bentuk heksadesimal, sehingga diterjemahkan dalam bentuk *raw data*.



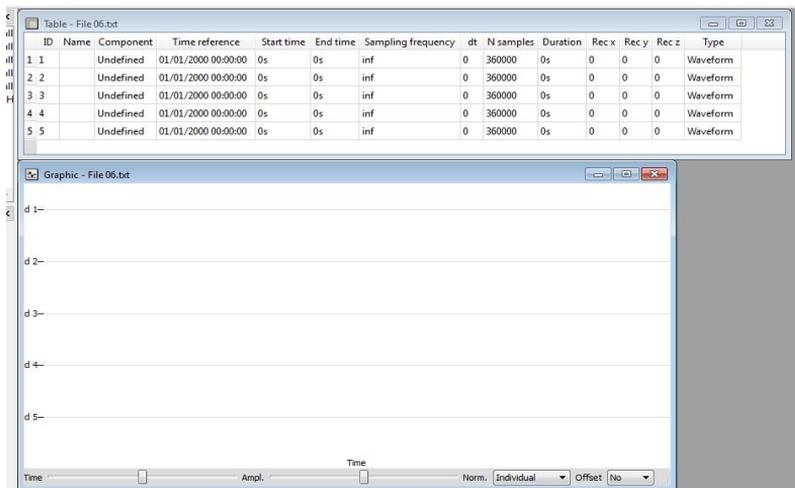
Gambar 3. 2 Contoh data gempa vulkanik pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 02:22 WIB yang dibuka menggunakan *Software* Ls7_WVE.

Data yang sudah dikonversi dalam bentuk *raw* data selanjutnya di simpan dalam format ASCII, sehingga data ini sudah dapat dibuka dengan menggunakan perangkat lunak *Geopsy* dan *Obspy*.

3.4.2. Pengeditan header data

Pengeditan *header* data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Geopsy*. Adapun *header* data yang diperbaharui adalah

1. Pemberian nama pada setiap stasiun yaitu stasiun 1 KLD, stasiun 2 SMB, stasiun 3 GMK dan stasiun 4 KWH.
2. Pengaturan tanggal perekaman serta waktu awal perekaman.
3. Pengisian data frekuensi sampling yang ada dalam sinyal tersebut.
4. Penyimpanan data dalam format *.mseed.

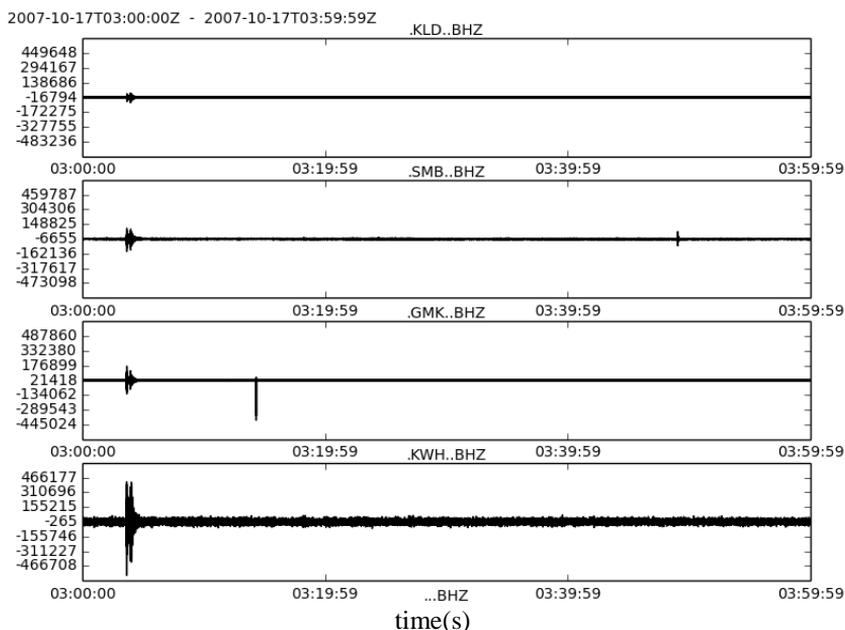


Gambar 3. 3 Proses pengeditan data kedalam format mseed menggunakan aplikasi geopsy.

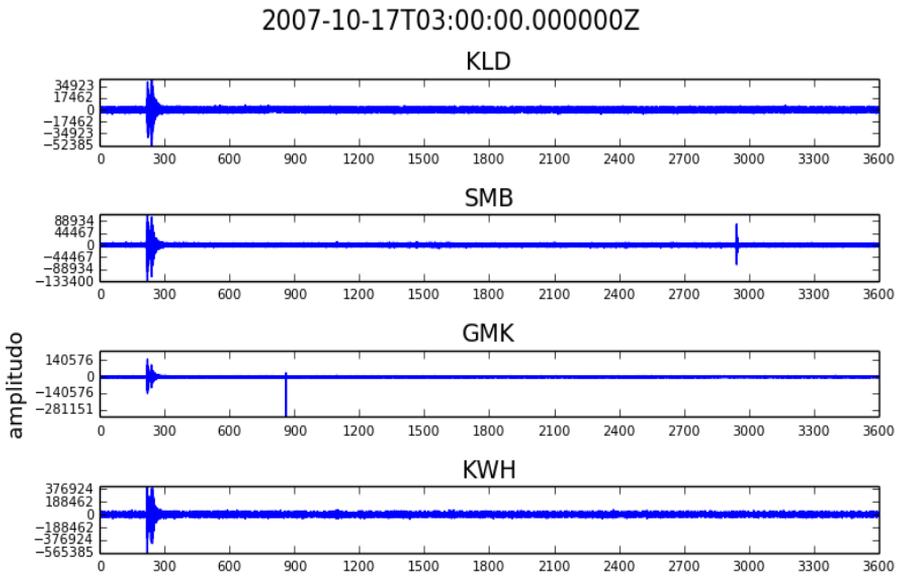
3.4.3 Koreksi garis dasar (*baseline correction*)

Sinyal seismik yang terekam pada seismogram kebanyakan tidak berada pada posisi garis dasar yang

sama atau tidak berada pada posisi 0 (Gambar 3.3), sehingga diperlukan koreksi garis dasar dari setiap sinyal yang terekam untuk menempatkan sinyal dengan posisi garis dasar yang sama. Koreksi ini dilakukan dengan menghitung selisih nilai pada data yang akan dihitung dengan nilai rata-rata data tersebut. Hasil nilai tersebut merupakan data yang sudah dikoreksi, sehingga sinyal yang terekam akan berada pada posisi garis dasar yang sama (Gambar 3.4). Koreksi garis dasar ini dilakukan menggunakan *software ObsPy* dengan perintah dapat dilihat pada Lampiran 6.



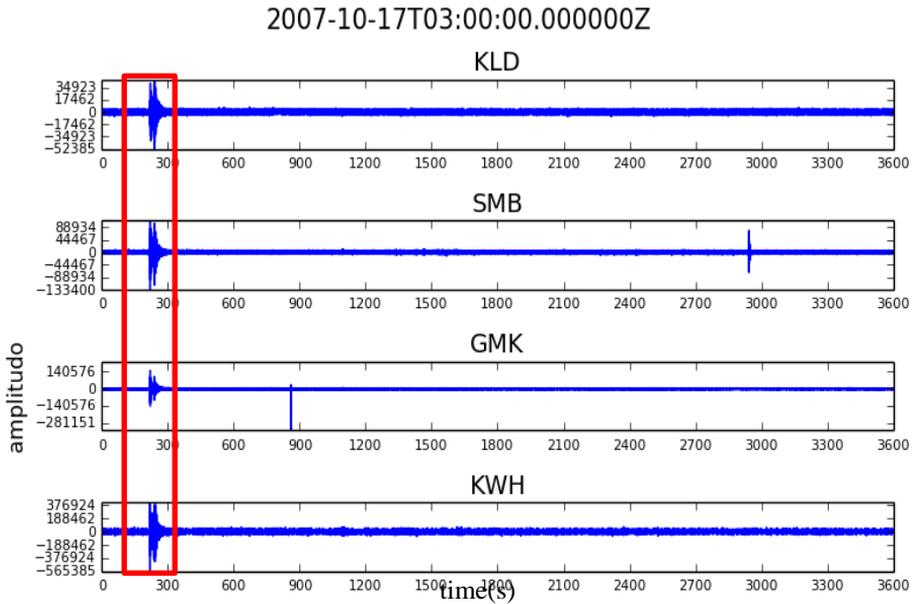
Gambar 3. 4 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang belum dikoreksi garis dasar pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 03:00 WIB.



Gambar 3. 5 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang sudah dikoreksi garis dasar pada tanggal 17 Oktober 2007 pukul 03:00 WIB.

3.4.4 Pemilihan *Event* Seismik

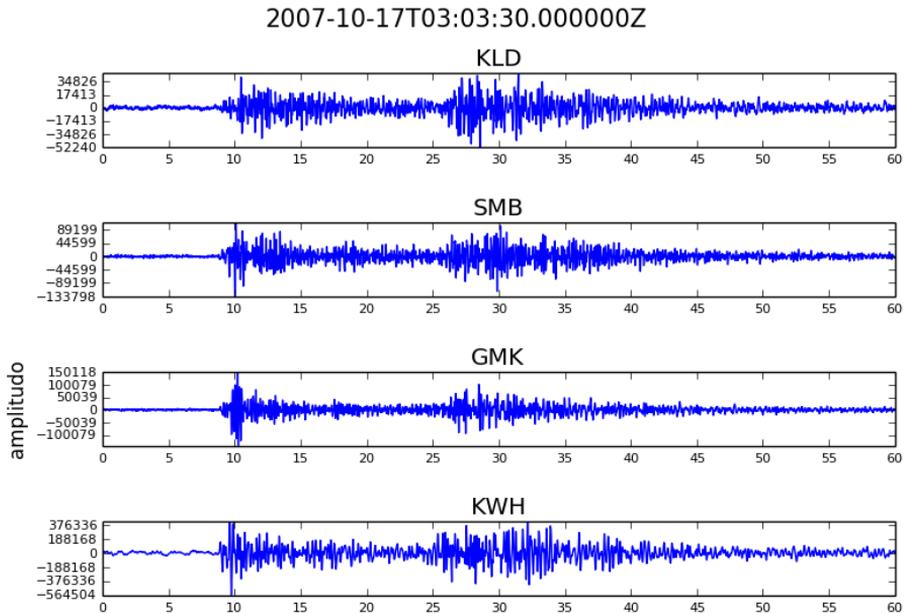
Event merupakan suatu kejadian yang terekam pada seismogram yang ditandai dengan adanya perbedaan amplitudo. Perbedaan tersebut dikatakan sebagai *event* seismik jika perbedaan itu muncul pada semua stasiun atau minimal muncul pada dua stasiun perekaman (Gambar 3.5).



Gambar 3. 6 Contoh hasil rekaman sinyal seismik yang sudah dikoreksi garis dasar dan kemudian di cek event seismik yang terjadi dalam setiap hari nya untuk dilakukan pemotongan masing event seismiknya.

3.4.5 Pemotongan *event* seismik

Pemotongan *event* seismik dilakukan pada empat stasiun yang berbeda dengan rentang waktu yang sama yaitu selama 60 detik untuk setiap *event* yang terekam (Gambar 3.6). Pemotongan dilakukan dengan mengecek setiap event seismik yang kelihatan setiap harinya. Awalnya dipotong selama satu jam, kemudian dipersingkat menjadi 60 detik, karena pada umumnya gempa vulkanik ataupun tektonik hanya terjadi berkisar antar 0 sampai 30 detik.

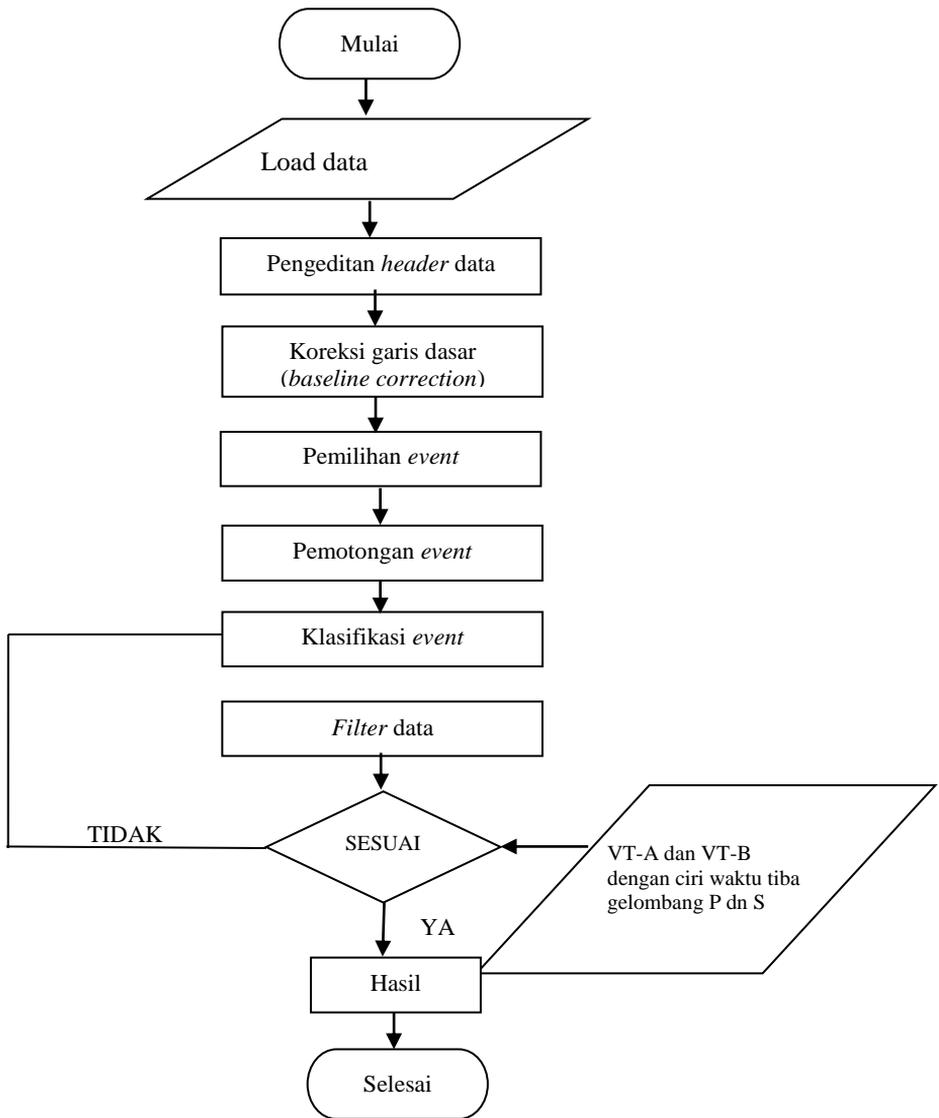


Gambar 3. 7 Pemotongan *event* seismik pada tanggal 17 Oktober 2007 dari pukul 03:03:30 – 03:04:30 WIB.

3.4.6 Pengklasifikasian *event* seismik

Dalam penelitian ini, *event* gempa vulkanik diklasifikasikan menjadi lima jenis yaitu VT-A, VT-B, MP, LF dan Tremor. Penentuan klasifikasinya mengacu pada bentuk *event* gempa vulkanik dari penelitian yang telah dilakukan oleh Minakami (1969) untuk gunungapi di Jepang, Lesage dan Surono (1994) di Gunung Kelud serta Wasserman (2002) di Gunung Merapi.

Diagram alir dari proses pengolahan data seismik Gunung Kelud dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3. 8 Diagram alir pengolahan data seismik Gunung Kelud.

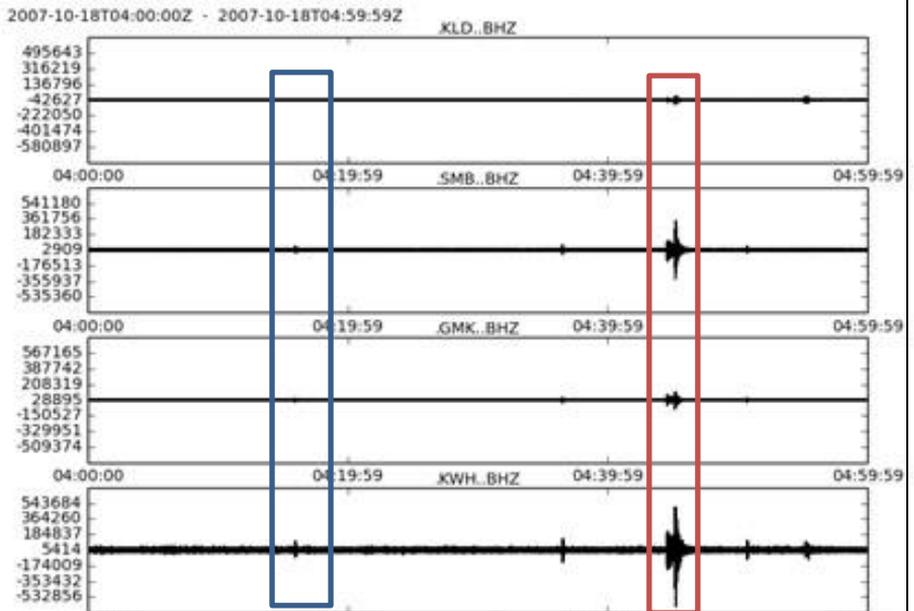
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil karakterisasi sinyal gempa vulkanik

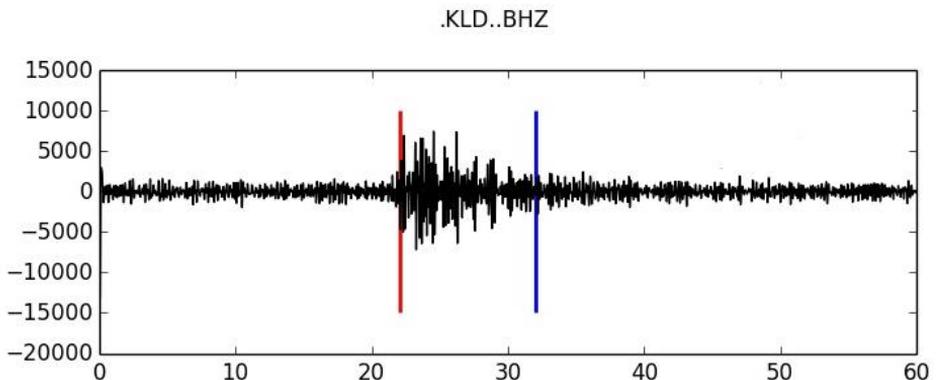
Sinyal gempa vulkanik Gunung Kelud erupsi November 2007 direkam oleh empat stasiun seismik. Data yang diperoleh menunjukkan hasil rekaman kontinyu selama 24 jam dengan jumlah 24 *file* (satu jam untuk satu *file*). Data yang direkam tersimpan dalam format "heksadesimal" kemudian dikonversi menjadi *miniseed* agar dapat dilakukan pengolahan dengan *software* lain. Selanjutnya dilakukan pengolahan data untuk melihat adanya rekaman sinyal yang dianggap sebagai *event* gempa dari Gunung Kelud. Kemudian dilakukan pengolahan analisis frekuensi sinyalnya menggunakan *software* *obspy* untuk mengetahui frekuensi dari masing-masing sinyal VT-A dan VT-B.

4.2 Sinyal gempa vulkanik-tektonik tipe a

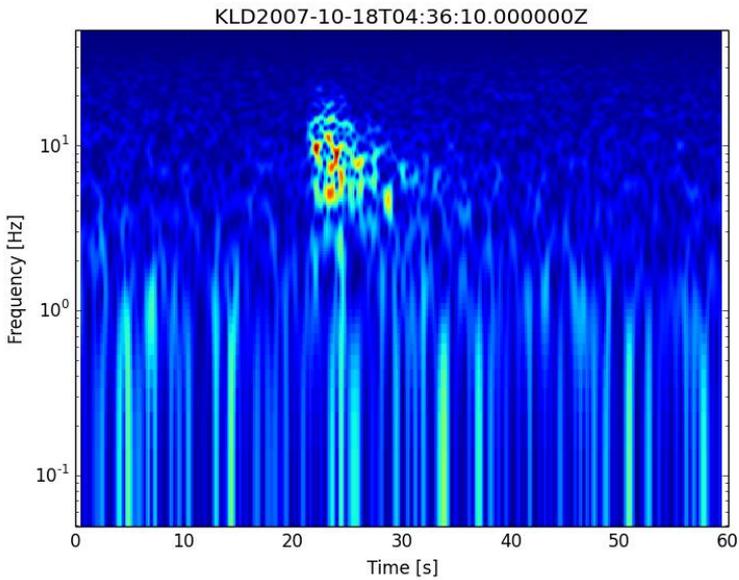
Berdasarkan hasil rekaman seismogram, sinyal gempa vulkanik Gunung Kelud terekam pada empat stasiun, yaitu KLD, SMB, GMK, dan KWH. Masing-masing stasiun dilihat bentuk kemiripan sinyalnya, apakah menunjukkan sinyal VT-A atau VT-B. Jika termasuk VT-A, maka bentuk gelombang datang P akan terlihat jelas dan kemudian dilanjutkan kedatangan gelombang berikutnya yaitu gelombang S. Hampir semua rekaman seismik yang menunjukkan kegempaan vulkanik tektonik, terjadi sebelum letusan epusif di kawah gunung kelud. Hasil rekaman sinyal seismik VT-A dapat dilihat pada lampiran 1. Beberapa bentuk sinyal VT-A yang terekam pada stasiun KLD, GMK, KWH dan KLD dapat dilihat pada Gambar 4.1. Kotak merah menunjukkan sinyal VT-A ketika dipotong sepanjang 60 detik seperti yang terlihat pada Gambar 4.2.



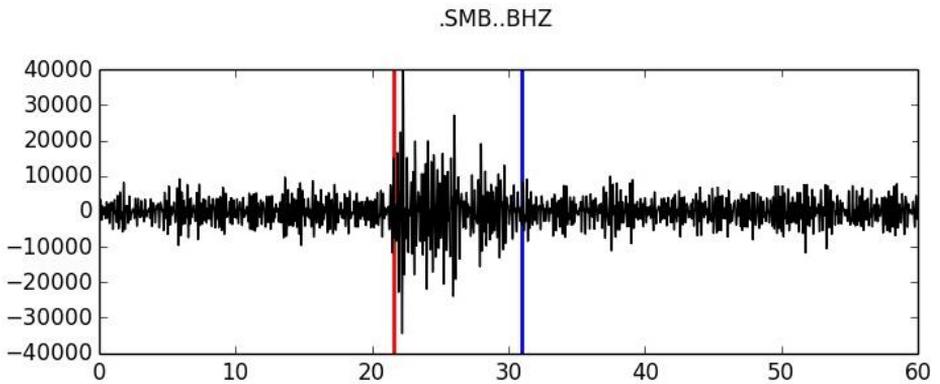
Gambar 4. 1 Event gempa yang terekam di stasiun KLD, GMK, SMB, KWH pada tanggal 18 Oktober 2007 selama 1 jam.



Gambar 4. 2 Event gempa yang terekam di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36

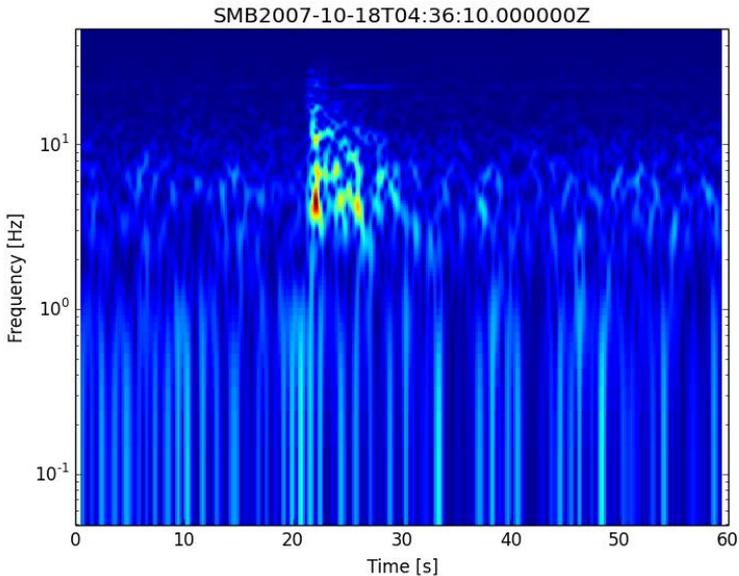


Gambar 4. 3 Spektrum dari rekaman gempa di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36

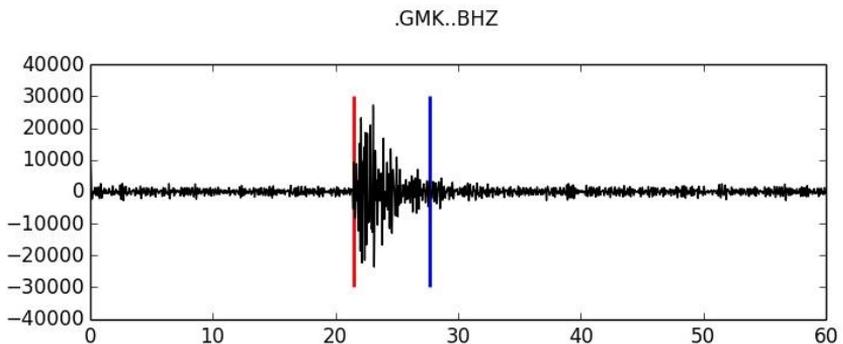


Gambar 4. 4 Event gempa yang terekam di stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36

Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun KLD dapat dilihat pada gambar 4.3, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 5 sampai 10 Hz.

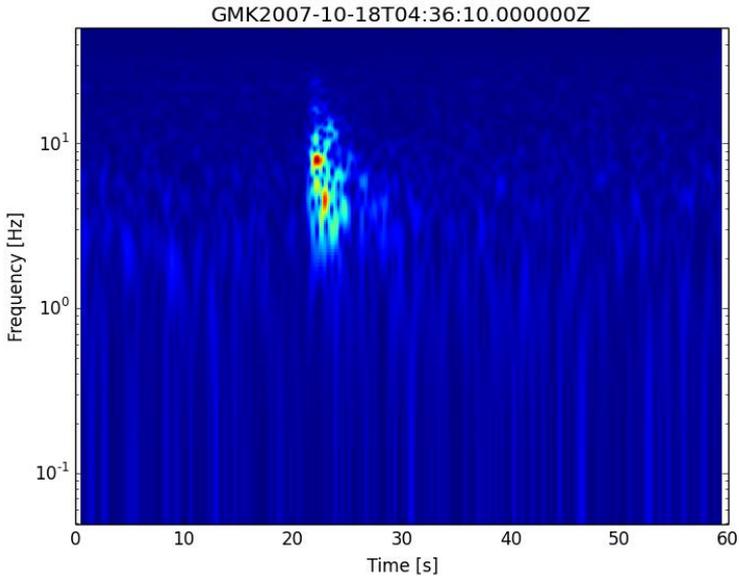


Gambar 4. 5 Spektrum dari rekaman gempa stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36

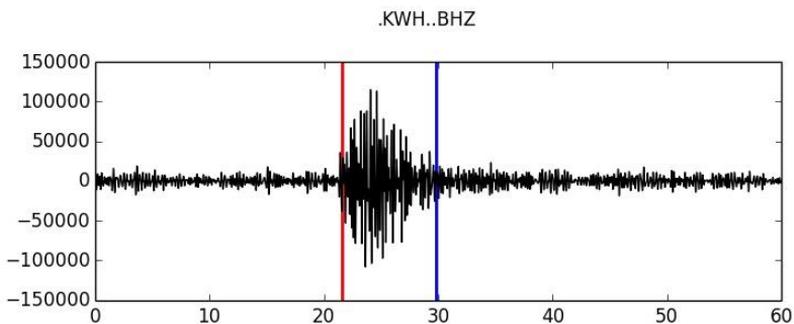


Gambar 4. 6 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36

Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun SMB dapat dilihat pada Gambar 4.5, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 6 sampai 9 Hz.

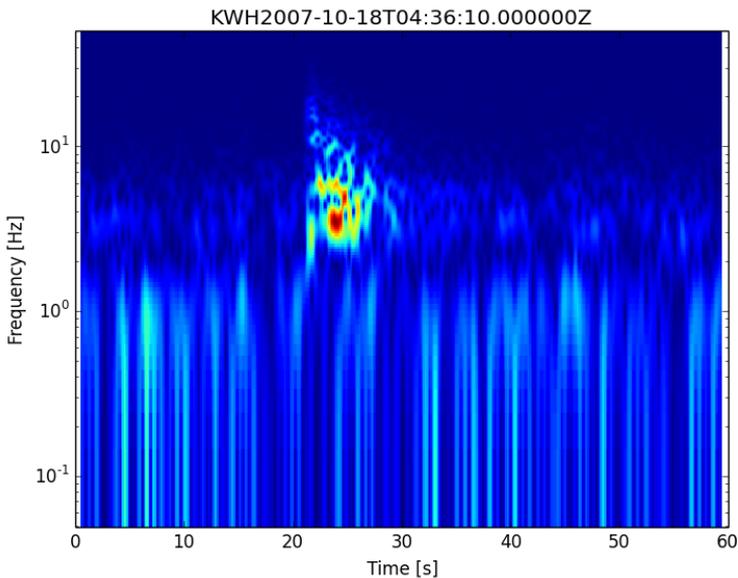


Gambar 4. 7 Spektrum dari rekaman gempa di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36



Gambar 4. 8 Event gempa yang terekam di stasiun KWH pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04.36

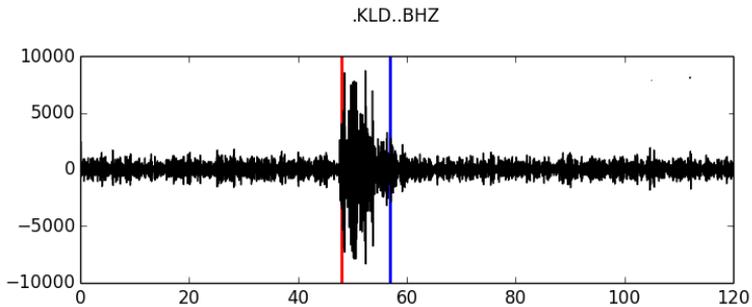
Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun KLD dapat dilihat pada Gambar 4.7, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 6 sampai 10 Hz.



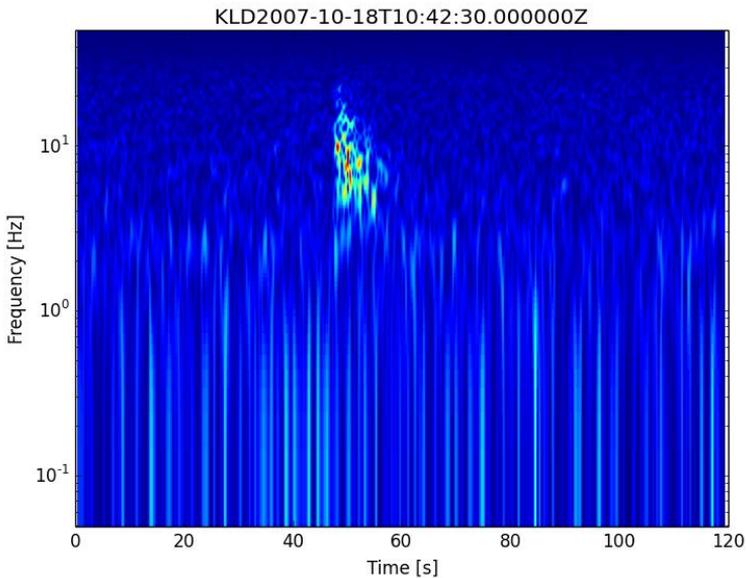
Gambar 4. 9 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 04:36

Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun KLD dapat dilihat pada gambar 4.9, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 5 sampai 7 Hz.

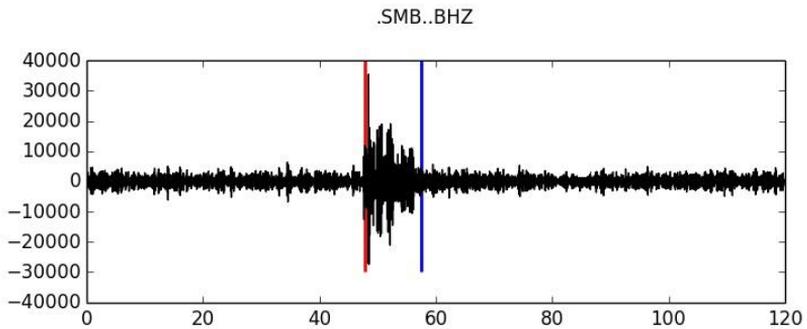
4.3 Sinyal gempa vulkanik - tektonik tipe B (VT-B)



Gambar 4. 10 Event gempa yang terekam di stasiun KLD pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

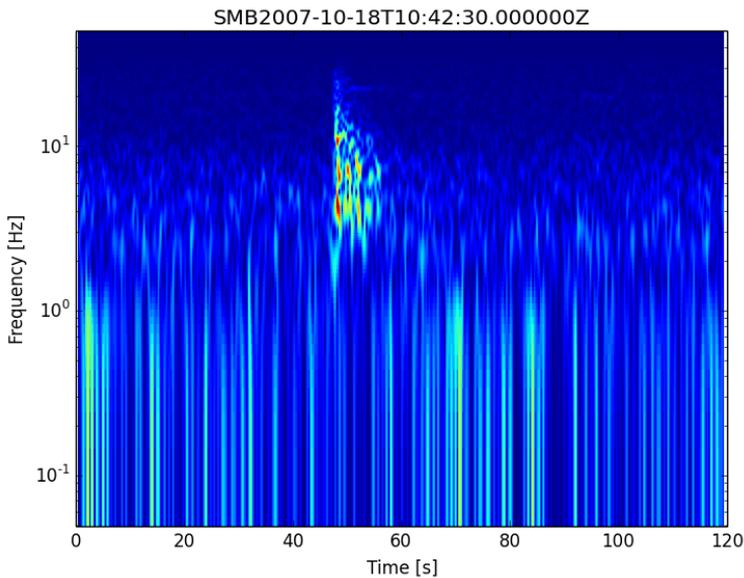


Gambar 4. 11 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

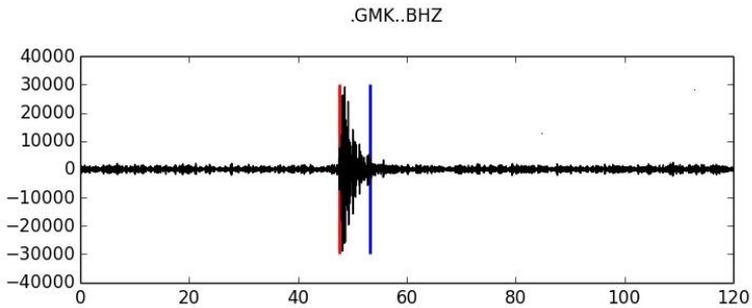


Gambar 4. 12 Event gempa yang terekam di stasiun SMB pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

Spektrum dari hasil rekaman gempa VT-B di stasiun KLD dapat dilihat pada gambar 4.11, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 6 sampai 8 Hz.

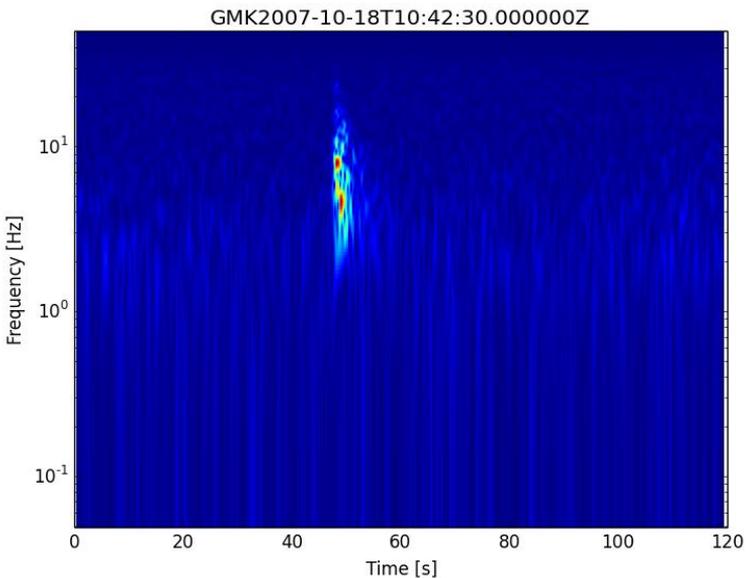


Gambar 4. 13 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

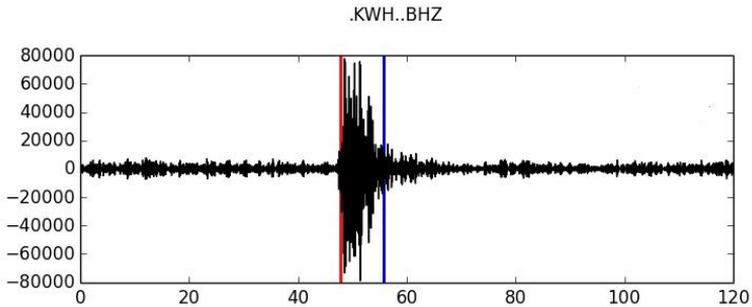


Gambar 4. 14 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

Spektrum dari hasil rekaman gempa VT-B di stasiun SMB dapat dilihat pada gambar 4.13, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 5 sampai 7 Hz.

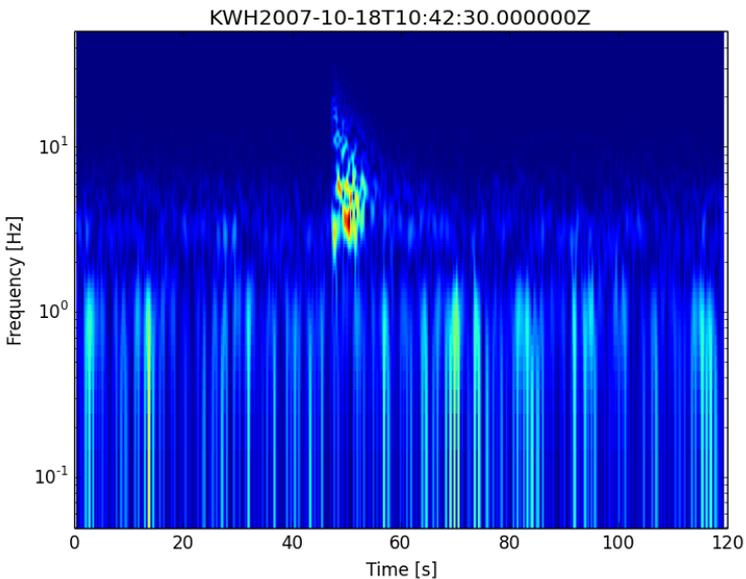


Gambar 4. 15 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42



Gambar 4. 16 Event gempa yang terekam di stasiun GMK pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun GMK dapat dilihat pada gambar 4.15, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 5 sampai 9 Hz.



Gambar 4. 17 Spektrum dari rekaman gempa pada tanggal 18 Oktober 2007 jam 10:42

Sinyal gempa vulkano tektonik B (VT-B) yang terekam di seismogram terdapat pada Lampiran 2. Beberapa bentuk sinyal VT-B dari masing-masing stasiun dapat dilihat pada Gambar 4.10, Gambar 4.12, Gambar 4.14, dan Gambar 4.16. Berdasarkan hasil yang telah diperoleh, maka hasil rekaman sinyal gempa vulkano tektonik Tipe A dan Tipe B di gunung kelud memiliki kemiripan dari bentuk sinyal nya. Dimana penentuan sinyal VT-B sering mengalami kebingungan bagi pengamat gunung api untuk membedakan sinyal VT-A dan VT-B, namun jika dilihat pada bentuk sinyal di gunung Kelud maka dapat dibedakan bentuk sinyal VT-A dan sinyal VT-B dari waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S. Spektrum dari hasil rekaman gempa di stasiun KWH dapat dilihat pada gambar 4.17, dimana frekuensi dari rekaman gempa yang terjadi berkisar antara 4 sampai 6 Hz.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Penentuan sinyal VT-A dan VT-B dapat dibedakan berdasarkan waktu kedatangan sinyalnya.
2. Bentuk sinyal VT-A dan VT-B memiliki kemiripan di setiap stasiun yang sudah terpasang di sekitar Gunung Kelud
3. Spektrum gempa vulkano tektonik Tipe A (VT-A) berkisar antara 5 sampai 10 Hz
4. Spektrum gempa vulkano tektonik Tipe B (VT-B) berkisar antara 5 sampai 8 Hz

5.2 Saran

Penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk penelitian berikutnya dalam menentynkan hiposenter dari kegempaan yang terjadi pada kurun waktu Oktober 2007 di Gunung Kelud

DAFTAR PUSTAKA

- Chouet, B., 1996a, New methods and future trends in seismological volcano monitoring, *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazard*, Eds. R. Scarpa and R.Trilling, Springer-Verlag, Berlin, New York. Pp. 23-98.
- Husein, S., 2009. *Handout Geologi Dasar*. Jurusan Teknik Geologi. Fakultas Teknik. Universitas Gadjah Mada.
- Kirbani,S.R., dan Wahyudi., 2007, Eruption of The Kelud Volcano and B-Value of its Surrounding Earthquakes, *Jurnal Geofisika UGM*, Yogyakarta.
- Kristekova,M., Kristek,J., Moczo,P., and Day,M.S., 2006, Misfit criteria for quantitative comparison of seismograms, *Bulletin of the seismological Society of America*, Vol.96, No.5,pp. 1836-1850.
- Kristekova,M., Kristek,J., and Moczo,P., 2009, Time-Frequency Misfit and Goodness of Fit Criteria for Quantitative Comparison of Time Signals, *Geophysics journal International*. 178, 813-825.
- Lesage,Ph. dan Surono, 1994. Seismic Precursors of the february 10,1990 eruption of Kelut vulcano, Java. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 65. 135-146.
- Minakami,T., Hiraga,S., Miyazaki,T., and Utibori,S., 1969, Seismometrical Surveys of Volcanoes in Japan and Volcano Sotara in Colombia, *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, Vol.47, pp.893-949.
- Muhaimin., 2008, *Studi Kegempaan Gunung Kelud Oktober 2007*, *Skripsi*, Program studi Geofisika ITB, Bandung.
- Syahra, V., Maryanto, S, Triastuty, H. 2014. Analisis Spektral Dan Distribusi Hiposenter Gempa Vulkanik A Dan Vulkanik B Gunungapi Ijen Jawa Timur. Universitas Brawijaya
- Wassermann,J., 2002, Volcano Seismology. IASPEI, *New Manual of Seismological Observatory Practice*

- (NMSOP) Volume 1. GeoForschungsZentrum Potsdam, Jerman.
- Widodo, 2012, *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan*, Pustaka Pelajar. Yogyakarta.
- Wulandari, H.T. 2010. Analisis Sinyal Seismik Gunungapi Merapi Berdasarkan Identifikasi Gempa Multiphase Sebelum Dan Sesudah Letusan 14 Juni 2006. *Skripsi*. FMIPA. Universitas Sebelas Maret, Surakarta
- Zaennudin, A, 2009, Prakiraan Bahaya Erupsi Gunung Kelud. *Bulletin Vulkanologi dan Bencana Geologi*, Volume 4 Nomor 2. 1 - 17.
- Zobin, V.M., 2003, *Introduction to Volcanic Seismology. Developments in volcanology*;6. Elsevier Science. B.V.
- Balai Pelestarian Cagar Budaya DIY, 2014. Dampak Abu Vulkanik Gunung Kelud di Kota Yogyakarta. <https://kebudayaan.kemdikbud.go.id/bpcbyogyakarta/dampak-abu-vulkanik-gunung-kelud-di-kota-yogyakarta/> (19 februari 2014). [Diakses 15 Agustus 2020]

LAMPIRAN 1

Tabel L. 1 Event gempa vulkano-tekonik A dan nilai spektrum dari masing-masing event gempa di stasiun yang berbeda

No	Stasiun	Spektrum (Hz)
	(Tanggal_Waktu)	
1	KLD_18_00	5-6
2	SMB_18_00	6-8
3	GMK_18_00	4-6
4	KWH_18_00	5-6
5	KLD_18_04	4-6
6	SMB_18_04	5-7
7	GMK_18_04	6-9
8	KWH_18_04	5-9
9	KLD_27_04	6-8
10	SMB_27_04	5-10
11	GMK_27_04	4-8
12	KWH_27_04	5-8
13	KLD_17_17	6-9
14	SMB_17_17	4-10
15	GMK_17_17	3-8
16	KWH_17_17	4-9
17	KLD_17_12	5-8
18	SMB_17_12	4-9
19	GMK_17_12	7-10
20	KWH_17_12	4-9
21	KLD_18_20	6-10
22	SMB_18_20	6-9
23	GMK_18_20	5-10
24	KWH_18_20	6-9
25	KLD_25_14	5-10
26	SMB_25_14	7-10

27	GMK_25_14	6-9
28	KWH_25_14	6-8
29	KLD_23_20	7-10
30	SMB_23_20	6-9
31	GMK_23_20	5-9
32	KWH_23_20	7-10
33	KLD_24_23	4-9
34	SMB_24_23	6-10
35	GMK_24_23	6-9
36	KWH_24_23	5-10
37	KLD_25_13	6-9
38	SMB_25_13	5-10
37	SMB_25_13	7-10
38	GMK_25_13	6-9

LAMPIRAN 2

Tabel L. 2 Event gempa vulkano-tektonik A dan nilai spektrum dari masing-masing event gempa di stasiun yang berbeda

No	Stasiun	Spektrum (Hz)
	(Tanggal_Waktu)	
1	KLD_17_17	4-9
2	SMB_17_17	4-7
3	GMK_17_17	4-8
4	KWH_17_17	5-7
5	KLD_18_10	4-8
6	SMB_18_10	4-9
7	GMK_18_10	4-8
8	KWH_18_10	4-7
9	KLD_19_09	4-8
10	SMB_19_09	4-6
11	GMK_19_09	5-8
12	KWH_19_09	5-8
13	KLD_19_22	4-6
14	SMB_19_22	4-8
15	GMK_19_22	4-9
16	KWH_19_22	4-7
17	KLD_20_06	4-8
18	SMB_20_06	5-7
19	GMK_20_06	4-8
20	KWH_20_06	4-9
21	KLD_20_19	4-8
22	SMB_20_19	4-7
23	GMK_20_19	4-8
24	KWH_20_19	4-6
25	KLD_21_00	5-8
26	SMB_21_00	5-8
27	GMK_21_00	4-6

28	KWH_21_00	4-8
29	KLD_23_00	7-10
30	SMB_23_00	4-9
31	GMK_23_00	6-10
32	KWH_23_00	6-9
33	KLD_23_02	5-10
34	SMB_23_02	6-9
35	GMK_23_02	5-10
36	KWH_23_02	7-10
37	KLD_23_12	6-9
38	SMB_23_12	4-8
39	GMK_23_12	4-7
40	KWH_23_12	5-7
41	KLD_23_12	5-8
42	SMB_23_12	5-9
43	GMK_23_12	5-9
44	KWH_23_12	4-7
45	KLD_23_17	4-8
46	SMB_23_17	4-9
47	GMK_23_17	4-9
48	KWH_23_17	3-6
49	KLD_23_19	5-8
50	SMB_23_19	5-8
51	GMK_23_19	5-9
52	KWH_23_19	4-6
53	KLD_23_20	4-8
54	SMB_23_20	4-7
55	GMK_23_20	4-9
56	KWH_23_20	7-10
57	KLD_23_23	4-9
58	SMB_23_23	6-10
59	GMK_23_23	6-9
60	KWH_23_23	5-10
61	KLD_24_00	6-9
62	SMB_24_00	5-10
63	GMK_24_00	7-10

64	KWH_24_00	6-9
65	KLD_24_03	4-7
66	SMB_24_03	4-8
67	GMK_24_03	4-9
68	KWH_24_03	4-9
69	KLD_24_06	3-6
70	SMB_24_06	5-8
71	GMK_24_06	5-8
72	KWH_24_06	5-9
73	KLD_24_07	4-6
74	SMB_24_07	4-8
75	GMK_24_07	4-7
76	KWH_24_07	4-9
77	KLD_24_10	7-10
78	SMB_24_10	4-7
79	GMK_24_10	4-9
80	KWH_24_10	7-10
81	KLD_24_11	4-9
82	SMB_24_11	6-10
83	GMK_24_11	6-9
84	KWH_24_11	5-10
85	KLD_24_12	6-9
86	SMB_24_12	5-10
87	GMK_24_12	7-10
88	KWH_24_12	4-9
89	KLD_24_15	4-8
90	SMB_24_15	4-7
91	GMK_24_15	4-8
92	KWH_24_15	4-6
93	KLD_24_17	5-8
94	SMB_24_17	5-8
95	GMK_24_17	4-6
96	KWH_24_17	4-8
97	KLD_24_19	4-9
98	SMB_24_19	4-7
99	GMK_24_19	4-8

100	KWH_24_19	5-7
101	KLD_24_22	4-8
102	SMB_24_22	4-9
103	GMK_24_22	4-8
104	KWH_24_22	4-7
105	KLD_25_01	4-8
106	SMB_25_01	4-6
107	GMK_25_01	5-8
108	KWH_25_01	5-8
109	KLD_25_04	4-6
110	SMB_25_04	4-8
111	GMK_25_04	7-10
112	KWH_25_04	4-9
113	KLD_25_06	6-10
114	SMB_25_06	5-8
115	GMK_25_06	5-9
116	KWH_25_06	5-8
117	KLD_25_11	5-9
118	SMB_25_11	4-8
119	GMK_25_11	4-9
120	KWH_25_11	4-8
121	KLD_27_06	4-7
122	SMB_27_06	4-8
123	GMK_27_06	4-6
124	KWH_27_06	5-8
125	KLD_27_10	5-8
126	SMB_27_10	4-6
127	GMK_27_10	4-8
128	KWH_27_10	4-8
129	KLD_27_18	4-9
130	SMB_27_18	4-8
131	GMK_27_18	4-7
132	KWH_27_18	4-8