

**ANALISIS PERCEPATAN TANAH MAKSIMUM DAN
INTENSITAS GEMPA PADA GUNUNG ARJUNO-WELIRANG –
LUMPUR SIDOARJO**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Oleh:

MARETA KARTIKASARI

0910930057



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2013

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PENGESAHAN TUGAS AKHIR

ANALISIS PERCEPATAN TANAH MAKSIMUM DAN INTENSITAS GEMPA PADA GUNUNG ARJUNO- WELIRANG – LUMPUR SIDOARJO

Oleh:
MARETA KARTIKASARI
0910930057

Telah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal [REDACTED]
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang Fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

Sukir Maryanto, Ph.D
NIP. 19710621 199802 1 001

Dwi Wahyudi, S.Si
NIP. 19790224 200003 1 002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Adi Susilo, Ph.D
NIP. 19631227 199103 1 002

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : MARETA KARTIKASARI

NIM : 0910930057

Jurusan : FISIKA

Penulisan Tugas Akhir berjudul :

**ANALISIS PERCEPATAN TANAH MAKSIMUM DAN
INTENSITAS GEMPA PADA GUNUNG ARJUNO-
WELIRANG – LUMPUR SIDOARJO**

Dengan ini menyatakan bahwa:

1. Isi dari Tugas Akhir yang saya buat adalah benar-benar karya sendiri dan tidak menjiplak karya orang lain, selain nama-nama yang termaktub di isi dan tertulis di daftar pustaka dalam Tugas Akhir ini.
2. Apabila di kemudian hari ternyata Tugas Akhir yang saya tulis terbukti hasil jiplakan, maka saya bersedia menanggung segala resiko yang akan saya terima.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang, April 2013

Yang menyatakan,

(Mareta Kartikasari)

NIM. 0910930057

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



ANALISIS PERCEPATAN TANAH MAKSIMUM DAN INTENSITAS GEMPA PADA GUNUNG ARJUNO-WELIRANG – LUMPUR SIDOARJO

ABSTRAK

Telah dilakukan analisis nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa di daerah penelitian berdasarkan data historis gempa Jawa Timur dan sekitarnya selama 60 tahun terakhir. Berdasarkan hasil perhitungan secara empiris dengan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka (1990) diperoleh nilai PGA (*Peak Ground Acceleration*) maksimum di daerah penelitian berkisar 13.95 gal – 20.85 gal dan intensitas gempa (MMI) berkisar III – IV. Di lokasi lumpur Sidoarjo (LUSI) mempunyai nilai PGA maksimum sebesar 15.10 gal. Di stasiun BMKG kelas II Tretes mempunyai nilai PGA maksimum sebesar 18.10 gal. Di Gunung Welirang mempunyai nilai PGA maksimum sebesar 19.11 gal. Di Gunung Arjuno mempunyai nilai PGA maksimum sebesar 19.44 gal.

Berdasarkan hasil rekaman gempa bumi pada TDS (*Tide Digital Seismograph*) Stasioner 5.0, 4 dari 5 peristiwa gempa bumi lokal terjadi di daerah penelitian yang tidak jauh dari orientasi sesar watakosek. Salah satu gempa yang terjadi di Gunung Arjuno-Welirang dengan magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km, menghasilkan percepatan tanah di daerah penelitian berkisar 5.07 gal – 27.15 gal dan intensitas gempa berkisar III-IV.

Kata kunci: gempa bumi, percepatan tanah, intensitas gempa, Gunung Arjuno-Welirang, lumpur Sidoarjo

ANALYZE OF MAXIMUM GROUND ACCELERATION AND EARTHQUAKE INTENSITY IN THE VOLCANO ARJUNO-WELIRANG TO SIDOARJO MUD

ABSTRACT

The maximum ground acceleration and intensity of earthquake values in the study area has been analyzed based on historical data of East Java earthquake and its surrounding for the last 60 years. Based on the empirical calculation with attenuation function Fukushima and Tanaka (1990) obtained the maximum PGA (Peak Ground Acceleration) values in the study area ranging from 13.95 gal to 20.85 gal and the earthquake intensity (MMI) ranging from III to IV. In the Sidoarjo mud (LUSI) has a value of maximum PGA at 15.10 gal. In the class II Tretes BMKG station has a value of maximum PGA at 18.10 gal. In the Volcano Welirang has a value of maximum PGA at 19.11 gal. In the Volcano Arjuno has a value of maximum PGA at 19.44 gal.

Based on the result recorded earthquakes at the TDS (Tide Digital Seismograph) Stasioner 5.0, 4 of 5 local earthquake events occurred in the study area that is not far from the orientation of the watakosek fault. One of the earthquakes that occurred in Volcano Arjuno-Welirang with magnitude 2.9 Ms and depth 10 km, resulting ground acceleration in the study area ranging from 5.07 gal - 27.15 gal and earthquake intensity ranging from III-IV.

Keywords: *earthquake, PGA, earthquake intensity, Volcano Arjuno-Welirang, Sidoarjo mud*

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim, Alhamdulillahirobbil'alamiin. Puji syukur kepada Allah SWT, Tuhan semesta alam yang telah mencurahkan karunia dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul *Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Gempa pada Gunung Arjuno-Welirang – Lumpur Sidoarjo* sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya.

Penulis mendapatkan bantuan dari berbagai pihak dalam penulisan dan proses pengambilan data. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT. yang telah memberikan petunjuk dan rahmat-Nya kepada penulis.
2. Orangtua tercinta (Sumiyatin, Hairul Nizham, dan Heru Supriyanto), suami (Fahny Maryulasa), adik (Raviqa dan Surya), nenek dan kakek serta seluruh keluarga besar yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan untuk penulis.
3. Bapak Adi Susilo, Ph.D selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Brawijaya yang telah memberikan arahan selama penulis menyelesaikan masa sarjananya.
4. Bapak Sukir Maryanto, Ph.D selaku pembimbing I yang telah bersedia meluangkan waktunya untuk memberi masukan dan tambahan ilmu.
5. Bapak Dwi Wahyudi, S.Si selaku pembimbing II yang telah meluangkan waktu membimbing penulis selama melakukan penelitian di BMKG.
6. Bapak Sipollo Benny selaku Kepala Stasiun BMKG Tingkat II Tretes yang telah memberikan izin kepada penulis untuk melaksanakan penelitian.
7. Bapak Nugroho selaku Wakil Kepala Stasiun BMKG Tingkat II Tretes yang telah memberikan arahan kepada penulis selama penelitian.
8. Seluruh staf dan karyawan BMKG Tingkat II Tretes yang telah membantu dan menemani penulis dalam melaksanakan penelitian.
9. Seluruh dosen Jurusan Fisika khususnya dan Fakultas MIPA umumnya yang telah memberi banyak ilmu selama penulis menempuh pendidikan.

10. Seluruh karyawan Jurusan Fisika dan Fakultas MIPA yang telah memberikan pelayanan akademik kepada penulis.
11. Mas Muhajir, mas Deni, mbak Ana, mbak Eny, dan mas Afandi yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan masukan kepada penulis serta bersedia menjadi teman diskusi dalam menyelesaikan penelitian.
12. M. Shoufie Ukhtary, Ali Masduki, Nella Fernania, Agus Salim, Laelah Hilaliyah, Delfi, Sasmita, Ibnu, Yoppie, Rouf, Dwi Febriana, Yesika, Hasib, Muslihudin, Devita, Atok, Dahlia, Violetta, Nella Fahma, Robby, Shofyan, dan teman-teman seperjuangan di Jurusan Fisika angkatan 2009 serta adik tingkat maupun kakak tingkat yang telah membantu selama studi.
13. Semua pihak yang telah membantu, masing-masing mempunyai peran dalam penulisan karya ini walaupun tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam skripsi ini masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi kemajuan ilmu pengetahuan. Amin.

Malang, April 2013

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
KATA PENGANTAR	ix
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xviii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Tektonika Indonesia	5
2.2 Tektonika Jawa Timur	7
2.3 Sejarah Kegempaan di Jawa Timur dan Sekitarnya	9
2.4 Daerah Tinjauan G. Arjuno-Welirang – Lumpur Sidoarjo	10
2.4.1 Letak Geografis dan Luas Wilayah Sidoarjo	10
2.4.2 Letak Geografis dan Luas Wilayah Malang	11
2.4.3 Keadaan Geologi G. Arjuno-Welirang sampai LUSI	11
2.5 Gempa Bumi	13

2.5.1	Gempa Bumi Berdasarkan Faktor Penyebabnya	13
2.5.2	Gempa Bumi Berdasarkan Intensitas Gempanya	14
2.5.3	Gempa Bumi Berdasarkan Magnitudonya.....	17
2.5.4	Gempa Bumi Berdasarkan Kedalaman Hiposentrum.....	19
2.6	Faktor-faktor Penyebab Terjadinya Gempa Bumi.....	20
2.6.1	Teori Tektonik Lempeng	20
2.6.2	Teori Elastisitas Pegas	22
2.7	Gelombang Seismik.....	23
2.8	Parameter Gempa Bumi.....	26
2.9	Perekaman Gelombang Seismik pada Seismometer Tiga Komponen	26
2.10	TDS Stasioner 5.0.....	29
2.11	Parameter Gerakan Tanah (<i>Ground Motion Parameters</i>)	30
2.11.1	Amplitudo Percepatan Puncak.....	30
2.11.2	Amplitudo Kecepatan Puncak	31
2.11.3	Amplitudo Perpindahan Puncak	31
2.12	Percepatan Tanah.....	32
2.13	Pengaruh Percepatan Tanah terhadap Bangunan.....	32
2.14	Fungsi Atenuasi dan Faktor yang Mempengaruhinya	33
2.15	Fungsi Atenuasi	34
2.15.1	Fungsi Atenuasi Percepatan Tanah.....	34
2.15.2	Fungsi Atenuasi Intensitas	37
2.16	<i>Root Mean Square Error</i> (RMSE).....	37
2.17	Penentuan Episenter.....	38
2.18	Penentuan Hiposenter	39
BAB III METODE PENELITIAN		41
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	41

3.2	Alat dan Data Penelitian	41
3.2.1	Alat	41
3.2.2	Data Penelitian	41
3.3	Langkah Penelitian	44
3.4	Pengolahan Data Percepatan Tanah	47
3.4.1	Pengumpulan Data	47
3.4.2	Konversi Magnitudo Gempa	48
3.4.3	Perhitungan Episenter Gempa	49
3.4.4	Perhitungan Hiposenter Gempa	49
3.4.5	Pemilihan Fungsi Atenuasi	49
3.4.6	Perhitungan Percepatan Tanah Maksimum	50
3.4.7	Perhitungan Intensitas Gempa (MMI)	51
3.5	Pengolahan Data dengan TDS Stasioner 5.0	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1	Hasil Perhitungan	55
4.2	Pembahasan	66
BAB V PENUTUP		73
5.1	Kesimpulan	73
5.2	Saran	73
DAFTAR PUSTAKA		75
LAMPIRAN		79

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Peta tektonik dan sesar aktif di Indonesia.....	5
Gambar 2.2 Episenter gempa utama di Indonesia dan sekitarnya untuk $M \geq 5.0$ dalam rentang waktu tahun 1900-2009..	6
Gambar 2.3 Skema penampang melintang Jawa.....	8
Gambar 2.4 Peta daerah penelitian pada G. Arjuno-Welirang sampai LUSI.....	10
Gambar 2.5 Peta geologi G. Arjuno-Welirang sampai LUSI.....	12
Gambar 2.6 Tatanan geologi regional Jawa Timur.....	12
Gambar 2.7 Interrelasi antara bubungan melebar, zona subduksi, dan batas patahan lempeng.....	21
Gambar 2.8 Tipe-tipe dasar persesaran a. <i>Left-lateral strike-slip fault</i> , b. <i>Right-lateral strike-slip fault</i> , c. <i>Normal dip-slip fault</i> , d. <i>Reverse dip-slip fault</i>	22
Gambar 2.9 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang P...	24
Gambar 2.10 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang S..	24
Gambar 2.11 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang <i>Rayleigh</i>	25
Gambar 2.12 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang <i>Love</i>	25
Gambar 2.13 Arah polarisasi komponen radial dan transversal di suatu stasiun.....	26
Gambar 2.14 Ilustrasi gerak partikel gelombang P (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas	27
Gambar 2.15 Ilustrasi gerak partikel gelombang SV (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas.....	27
Gambar 2.16 Ilustrasi gerak partikel gelombang SH (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas.....	27
Gambar 2.17 Ilustrasi gerak partikel gelombang <i>Love</i> (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas.....	28
Gambar 2.18 Ilustrasi gerak partikel gelombang <i>Rayleigh</i> (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas.....	28
Gambar 2.19 Segitiga bola ABC menghubungkan titik A (episenter gempa), titik B (lokasi tinjauan), dan titik	

C (kutub utara).....	38
Gambar 2.20 Potongan bumi yang diasumsikan sebagai bola.....	39
Gambar 2.21 Garis hubung hiposenter, episenter, dan titik pengamatan.....	40
Gambar 3.1 Sinyal gempa bumi tanggal 13 Januari 2013 (a) arah N-S, (b) arah E-W.....	42
Gambar 3.2 Sinyal gempa bumi tanggal 17 Februari 2013 pukul 10:51:50.6 WIB.....	43
Gambar 3.3 Diagram alur dalam menentukan PGA dan intensitas gempa.....	45
Gambar 3.4 Diagram alur dalam menentukan hiposenter gempa bumi lokal.....	46
Gambar 3.5 Peta seismisitas tahun 1952-2012 berdasarkan data IRIS.....	48
Gambar 3.6 Peta daerah penelitian.....	50
Gambar 3.7 Cara untuk menganalisis <i>content</i> frekuensi sinyal gempa.....	52
Gambar 3.8 <i>Box spectrum</i> untuk melihat frekuensi sinyal gempa... ..	52
Gambar 3.9 Proses pemfilteran dengan menentukan frekuensi yang akan diloloskan.....	53
Gambar 3.10 Penentuan fase gelombang P/S pada <i>software</i> data pro.....	53
Gambar 3.11 Cara untuk mengetahui parameter gempa dan posisi gempa.....	54
Gambar 3.12 Hasil analisis data dengan TDS Stasioner 5.0.....	54
Gambar 4.1 Kontur percepatan tanah maksimum daerah penelitian menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990.....	56
Gambar 4.2 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988.....	57
Gambar 4.3 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Crouse tahun 1991.....	58
Gambar 4.4 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997.....	59
Gambar 4.5 Kontur intensitas gempa (MMI) menggunakan fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011).....	60
Gambar 4.6 Peta sebaran gempa bumi lokal yang terekam di TDS Stasioner 5.0.....	61
Gambar 4.7 Hiposenter gempa bumi lokal dalam irisan penampang melintang Barat-Timur.....	62

Gambar 4.8 Hiposenter gempa bumi lokal dalam irisan penampang melintang Utara-Selatan.....	63
Gambar 4.9 Kontur PGA maksimum berdasarkan data gempa bumi lokal.....	64
Gambar 4.10 Kontur intensitas gempa (MMI) berdasarkan data gempa bumi lokal.....	65
Gambar 4.11 Peta seismisitas di wilayah Jawa Timur dan sekitarnya tahun 1952-2012.....	68
Gambar 4.12 Peta geologi daerah penelitian.....	68



DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Karakteristik zona <i>Benioff</i> pada Busur Banda.....	8
Tabel 2.2 Skala <i>Modified Mercalli Intensity</i>	14
Tabel 2.3 Deskripsi tipe bangunan.....	16
Tabel 2.4 Korelasi konversi skala magnitudo untuk wilayah Indonesia.....	19
Tabel 3.1 Daftar gempa bumi yang tercatat di GFZ Postdam.....	43



DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1 <i>Waveform Accelerogram</i> yang Difilter dengan Menggunakan <i>Software</i> Dimas.....	79
Lampiran 2 Data Historis Gempa Bumi Berdasarkan Hasil Pencatatan IRIS.....	86
Lampiran 3 Sinyal Gempa Bumi yang telah Ditentukan Fase Gelombang P dan S.....	90
Lampiran 4 Spesifikasi <i>Accelerograph Type</i> TSA-100S.....	92
Lampiran 5 Konversi Data PGA aktual dengan Menggunakan <i>Software</i> Matlab.....	94
Lampiran 6 Spesifikasi TDS (<i>Tide Digital Seismograph</i>) Stasioner 5.0.....	95
Lampiran 7 Hasil Perhitungan Nilai PGA dan RMSE.....	98
Lampiran 8 Daftar parameter gempa bumi lokal.....	99



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia menempati zona tektonik yang sangat aktif atau termasuk daerah Sabuk Api Pasifik karena sebagai tempat pertemuan tiga lempeng besar dunia dan sembilan lempeng kecil lainnya (Bird, 2003). Keadaan ini mengakibatkan munculnya banyak gunung api di sekitar batas antar lempeng (*subduction zone*). Adapun daerah aktif tersebut terjadi di sepanjang pertemuan lempeng, yaitu lempeng tektonik Eurasia dengan Indo-Australia (membentuk busur dari Sumatera, Jawa, Bali, Nusa Tenggara sampai Maluku) dan lempeng samudra Pasifik dengan lempeng benua Australia (di bagian utara Irian) serta beberapa sesar lokal. Interaksi antar lempeng-lempeng ini menjadikan wilayah Indonesia sebagai wilayah yang rawan gempa bumi (Milsom dkk. (1992) dalam Irsyam dkk., 2010).

Tingginya aktivitas kegempaan ini terlihat dari hasil pencatatan IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) tentang gempa bumi yang terjadi di wilayah Jawa Timur dan sekitarnya. Pada rentang tahun 1952 - 2012 telah terjadi 120 kejadian gempa dengan magnitudo $M > 5$. Efek yang ditimbulkan dari gempa-gempa tersebut, antara lain: adanya korban jiwa, kerusakan infrastruktur, dan kerusakan bangunan. Selain itu, gempa bumi juga dapat menimbulkan efek yang sangat kompleks.

Salah satu contohnya adalah gempa bumi Yogyakarta yang terjadi tanggal 27 Mei 2006. Menurut Mazzini dkk. (2007), gempa bumi tersebut diperkirakan memicu terjadinya semburan lumpur Sidoarjo (LUSI) dan meningkatkan aktivitas gunung api di Pulau Jawa, tidak terkecuali Gunung Arjuno-Welirang. Hingga saat ini hubungan antara gempa bumi dengan aktivitas LUSI masih diteliti oleh para ahli kebumihan dan ahli pemboran, sehingga lokasi tersebut sangat menarik untuk dikaji terutama pada daerah Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI karena keberadaan sesar watakosek yg melewati daerah Porong sepanjang arah Timur Laut – Barat Daya. Pada daerah ini juga termasuk daerah yang padat penduduknya dan banyak terdapat bangunan-bangunan bertingkat. Keadaan yang demikian, menempatkan daerah Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI sebagai daerah rawan terjadi bencana akibat gempa bumi.

Mayoritas korban jiwa gempa bumi bukan disebabkan oleh gempa bumi yang terjadi, melainkan akibat runtuhnya bangunan di sekitar lokasi gempa. Kerusakan maupun dampak negatif dari gempa bumi dapat berbeda-beda bergantung pada jarak suatu tempat dari lokasi sumber gempa serta kekuatan gempanya. Semakin jauh jaraknya maka gelombang gempa bumi akan mengalami atenuasi (penurunan energi gempa), sehingga lokasi yang dekat dengan sumber gempa akan mengalami kerusakan infrastruktur dan bangunan yang lebih parah. Salah satu cara untuk meminimalisir jumlah korban jiwa akibat gempa, yaitu dengan menentukan nilai kebutuhan beban gempa dalam rangka membuat desain bangunan tahan gempa. Untuk keperluan desain bangunan tersebut diperlukan informasi mengenai nilai percepatan tanah maksimum atau PGA (*Peak Ground Acceleration*) maksimum yang dialami di suatu tempat. Nilai PGA ini dapat diperoleh berdasarkan data kekuatan gempa, jarak fokus gempa terhadap lokasi pengamatan, dan kedalaman sumber gempa. Adapun intensitas atau tingkat kerusakan akibat gempa bumi juga dapat ditentukan dari nilai PGA-nya. Besar atau kecilnya nilai intensitas gempa akan sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi, percepatan tanah akibat gempa, kualitas bangunan, dan geotektonik lokasi bangunan (Haris, 2012).

Pada penelitian ini akan dihitung nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa bumi pada Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI dengan menggunakan fungsi atenuasi yang sudah ada, karena keterbatasan data gempa aktual pada *accelerograph* di tempat penelitian. Penelitian tentang nilai percepatan tanah di daerah penelitian pernah dilakukan sebelumnya. Berdasarkan SNI 03-1726-2002 pada peta gempa Indonesia dengan periode ulang 500 tahun diperoleh nilai PGA di daerah penelitian sebesar 0,10 g - 0,15 g (SNI, 2002). Sementara itu, revisi peta gempa Indonesia yang diusulkan oleh Irsyam dkk. (2010) menunjukkan nilai PGA di batuan dasar pada daerah tersebut dengan periode ulang 50 tahun sebesar 0,05 g - 0,10 g, sedangkan dengan periode ulang 200 tahun sebesar 0,10 g - 0,20 g. Meskipun hasil penelitian tersebut cukup untuk memberikan gambaran tentang nilai PGA pada daerah penelitian, namun belum menunjukkan secara detail nilai PGA pada daerah penelitian. Implikasi dari kekurangan-kekurangan tersebut dapat mengakibatkan kerusakan serius ketika terjadi gempa yang jaraknya dekat dengan daerah penelitian dan memiliki magnitudo

yang besar ($M > 5$). Hal tersebut mendorong penulis untuk melakukan penelitian ini.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah berapakah nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa (MMI) pada daerah Gunung Arjuno-Welirang sampai lumpur Sidoarjo.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini, antara lain:

1. Data gempa bumi yang digunakan adalah data gempa bumi yang terjadi pada koordinat $6.00^{\circ}\text{LS} - 9.00^{\circ}\text{LS}$ dan $110.00^{\circ}\text{BT} - 114.00^{\circ}\text{BT}$ dalam periode 60 tahun dari tanggal 1 Januari 1952 – 31 Desember 2012.
2. Kriteria data gempa bumi, yaitu $5 < M < 9$ dan $0 < \text{depth (km)} < 300$.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, yaitu menentukan percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa (MMI) pada daerah Gunung Arjuno-Welirang sampai lumpur Sidoarjo.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah untuk memberikan informasi nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa pada Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI sebagai bahan pertimbangan dalam desain bangunan tahan gempa. serta bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

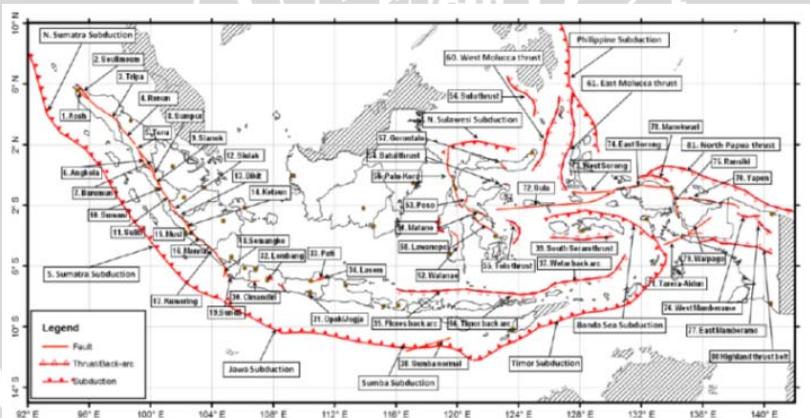


Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tektonika Indonesia

Kepulauan Indonesia mempunyai fisiografi yang unik berupa cekungan depan busur (*arc-trench gaps*), anomali-anomali gravitasi (*gravity anomalies*), palung-palung (*trenches*), busur vulkanik, dan rangkaian pegunungan muda sepanjang zona penunjaman. Fisiografi unik tersebut diakibatkan oleh kondisi tektonik di Indonesia. Di bagian barat laut dan bagian tenggara terjadi interaksi lempeng Eurasia (Papan Sunda) dan lempeng Indo-Australia, sehingga keduanya membentuk daerah stabil. Di bagian timur laut dan barat daya terjadi interaksi lempeng Samudera Pasifik dan Samudera Hindia, sedangkan di bagian tengah didominasi oleh keratan-keratan benua dan samudera serta oleh *intermediate crust*. Keratan-keratan benua tersebut menunjukkan bahwa keratan kerak bumi telah bergerak ratusan kilometer dari posisi awalnya sejak jutaan tahun lalu dan terus bergerak sampai sekarang. Contohnya adalah pulau Sulawesi sebagai pusat tumbukan ketiga lempeng bumi sehingga terdapat berbagai sesar (*faulting*) dan sesar anjak (*thrusting*) (Irsyam dkk., 2010).

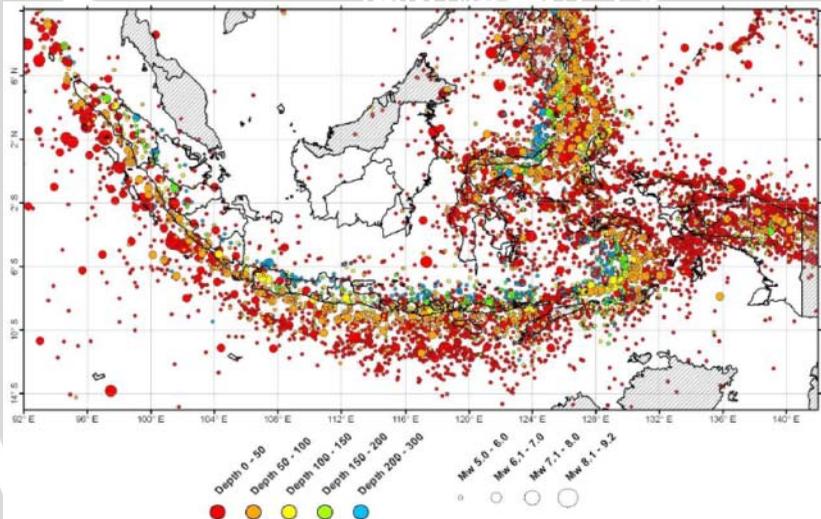


Gambar 2.1 Peta tektonik dan sesar aktif di Indonesia (Irsyam dkk., 2010)

Dampak dari interaksi antar lempeng bumi tersebut mengakibatkan adanya penimbunan energi (*stress energy*) yang akan dilepaskan secara tiba-tiba dalam kurun waktu tertentu dengan nilai

besaran gempa yang berbeda-beda. Di sepanjang batas lempeng bumi tersebut mempunyai potensi gempa bumi yang besar (> 7.5) (Ruff dan Kanamori, 1980).

Gambar 2.1 menunjukkan tumbukan (*collision*) antara busur Sunda Timur (busur Banda) dengan lempeng Indo-Australia yang membentuk mosaik elemen–elemen tektonik kompleks. Hal tersebut menyebabkan di tepian timur Paparan Sunda tersebar cekungan tarikan Makasar (*Makasar Extensional Basin*), palung Doang, tepian Sulawesi, palung Spermonde, punggung Selayar dan cekungan Bone. Adapun di bagian selatan terdapat cekungan belakang busur yang terdiri atas cekungan Bali, palung Lombok, cekungan Flores, dan sub-cekungan Wetar. Selain itu, juga terdapat beberapa sesar di Sulawesi, Kalimantan Timur, di bagian utara Nusa Tenggara Timur, dan struktur belakang busur.



Gambar 2.2 Episenter gempa utama di Indonesia dan sekitarnya untuk $M \geq 5.0$ dalam rentang waktu tahun 1900-2009 (Irsyam dkk., 2010)

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa tingginya aktivitas kegempaan yang diperoleh dari berbagai sumber dalam rentang waktu 1900-2009 terdapat lebih dari 8.000 kejadian gempa utama (*main shocks*) dengan magnitudo $M \geq 5.0$. Selama enam tahun terakhir telah tercatat berbagai aktifitas gempa besar di Indonesia, yaitu Gempa Aceh disertai tsunami tahun 2004 ($M_w = 9,2$), Gempa Nias

tahun 2005 ($M_w = 8,7$), Gempa Jogja tahun 2006 ($M_w = 6,3$), Gempa Tasik tahun 2009 ($M_w = 7,4$) dan terakhir Gempa Padang tahun 2009 ($M_w = 7,6$). Gempa-gempa tersebut telah menyebabkan adanya korban jiwa, keruntuhan dan kerusakan infrastruktur dan bangunan, serta dana trilyunan rupiah untuk rehabilitasi dan rekonstruksi (Irsyam dkk., 2010).

Sumber gempa di bagian selatan wilayah Indonesia merupakan zona subduksi yang membentang dari bagian barat pulau Andaman sampai pulau Banda di bagian timur. Di bagian timur wilayah Indonesia merupakan pertemuan antara sumber gempa dari barat dan jalur gempa busur Banda dengan jalur gempa akibat pertemuan lempeng Indo-Australia dengan lempeng Pasifik. Zona-zona subduksi utama wilayah Indonesia tersebut mempengaruhi kejadian gempa yang telah lalu dan yang akan datang (Irsyam dkk., 2010).

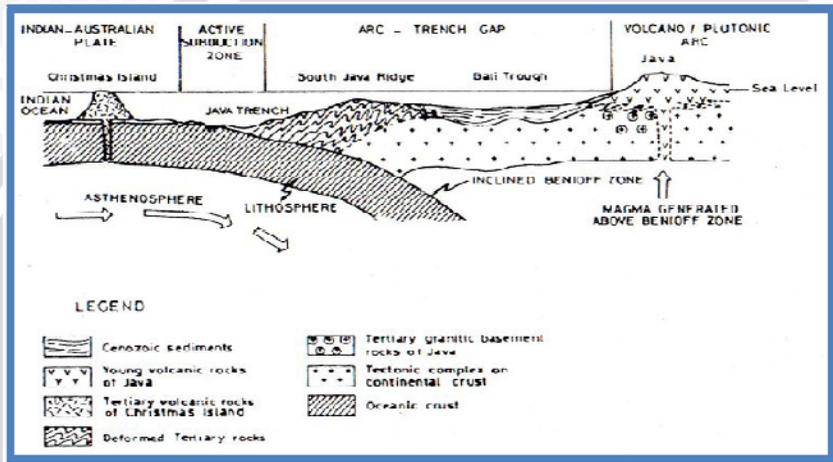
Sesar aktif (*fault*) di lempeng tektonik akan mengalami pergerakan sehingga akan mempengaruhi kejadian gempa. Mekanisme pergerakan sesar aktif berupa geser (*strike-slip*), naik (*reverse*) dan turun (*normal*) bergantung pada luas bidang sesar yang saling mengunci (*asperity area*). Semakin luas area *asperity*-nya maka kemungkinan kejadian gempanya juga semakin besar (Irsyam dkk., 2010).

2.2 Tektonika Jawa Timur

Secara umum Pulau Jawa merupakan bagian dari busur kepulauan (*island arc*) yang terletak pada zona subduksi. Sistem subduksi Pulau Jawa dibentuk oleh subduksi lempeng samudra yang menunjam di bawah lempeng benua. Lempeng samudranya adalah lempeng Indo-Australia, sedangkan lempeng benuanya adalah lempeng Eurasia yang diwakili oleh paparan Sunda (Mazzini dkk., 2007). Lempeng ini berumur muda dan seluruhnya hampir terdiri atas batuan *volkano-plutonic* berumur Tersier. Lempeng samudra di selatan subduksi tertutup sedimen pelagis dengan ketebalan 200 m (gambar 2.3) (Katili (1975) dalam Indriana, 2008).

Kenampakan tektonik paling penting di Pulau Jawa adalah palung Jawa yang berarah barat laut di depan Sumatra dan berarah timur di kepulauan Sunda Lesser. Palung Jawa merepresentasikan suatu batas konvergen yang berhubungan dengan zona *Benioff*. Kedalaman zona *Benioff* berubah dari Sumatra menuju Jawa dan sudutnya perlahan-lahan naik dari kepulauan Sunda Lesser menuju

ke Busur Banda. Sudut penunjaman zona *Benioff* bergantung pada kecepatan penunjaman lempeng samudra. Karakteristik zona *Benioff* pada Busur Banda yang disusun oleh Fitch dkk. (1970), Hamilton (1974), Karig dkk. (1976), dan Yoshii (1977) dalam Indriana (2008) dapat dilihat pada tabel 2.1.



Gambar 2.3 Skema penampang melintang Jawa (Katili (1975) dalam Indriana, 2008)

Tabel 2.1 Karakteristik zona *Benioff* pada Busur Banda

Fitur	Sumatra	Jawa & Lesser Sunda	Banda Arc	Northeast Japan
<i>Depth of trench (m)</i>	3500	7400	3500	10.800
<i>Trench-volcanic front spacing (km)</i>	300	250-300		170 – 320
<i>Depth of Benioff under volcanic front (km)</i>		120		90
<i>Dip of Benioff zone (degree)</i>	60	65	75	40
<i>Maximum depth of Benioff zone (km)</i>	200	700	700	600
<i>Province of volcanic rocks *)</i>		H - A		T - H - A

*) T = Tholeitic magma, H = High alumina basaltik magma, A = Alkali basaltik magma.

Jawa Timur berada di bagian timur Pulau Jawa sehingga cekungan Jawa Timur diperkirakan sebuah cekungan busur belakang yang terletak pada tepi benua Sunda yang stabil. Cekungan busur belakang Jawa Timur terdapat pada kerak intermediet dan dikelilingi oleh busur Karimun Jawa dan Tinggian Meratus di bagian barat dan utara. Secara fisik dapat di bedakan menjadi tiga struktur utama yaitu *Platform* Utara, *Central High* dan Cekungan Selatan. Jawa Timur laut (Kujung)-Madura-Kangean-Tinggian Lombok merupakan kelompok central high (Noviyanti, 2012).

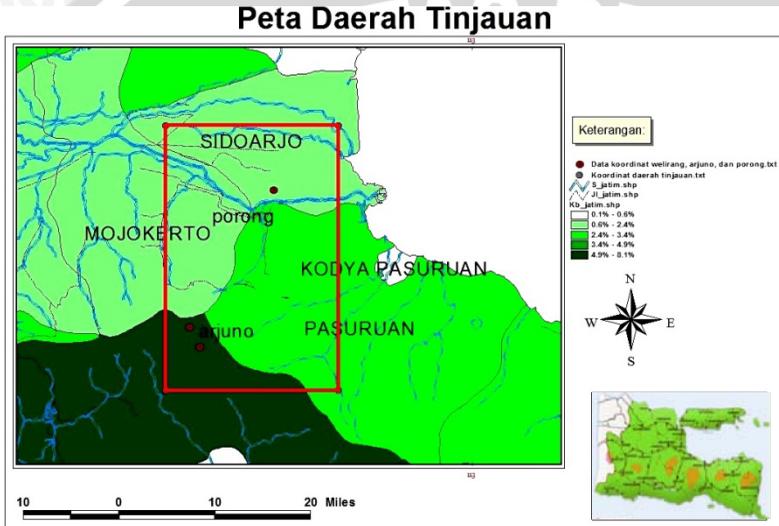
Keadaan tektonik Jawa Timur pada skala regional mempunyai dua pola patahan utama dalam cekungan Jawa Timur, yaitu patahan yang berorientasi NE-SW dan mayoritas ditemukan di sebelah utara dari bagian barat cekungan Jawa Timur serta mengalami perubahan arah E-W di sebelah selatan. Selain itu, keadaan tektonik Jawa Timur juga dipengaruhi oleh interaksi antar lempeng di zona subduksi. Hal tersebut diperkuat oleh adanya rangkaian pegunungan vulkanik di daerah pantai selatan Jawa Timur.

2.3 Sejarah Kegempaan di Jawa Timur dan Sekitarnya

Jika mengacu pada tatanan tektonik dan kondisi geologi di Jawa Timur, maka propinsi ini merupakan wilayah rawan gempa dengan kurun waktu yang berbeda. Di Jawa Timur beberapa kali terjadi gempa besar, bahkan menimbulkan tsunami. Contohnya adalah gempa yang terjadi di Malang pada tanggal 19 Februari 1967 dengan skala intensitas gempa sebesar VII - IX MMI. Dampak yang ditimbulkan gempa tersebut, yaitu kerusakan di Dampit (1.539 rumah rusak, 14 orang tewas, dan 72 orang luka-luka), di Gondanglegi (9 orang tewas, 49 orang luka-luka, 119 bangunan roboh, 402 retak, 5 masjid rusak), dan di Trenggalek (33 rumah bambu retak) (Susanto, 2009). Selain itu, pada tanggal 27 Mei 2006 terjadi gempa bumi dengan kekuatan 6,3 skala Richter yang telah mengguncangkan bagian selatan dari Pulau Jawa. Episentrum gempa berada pada jarak 25 km barat laut Yogyakarta sehingga menyebabkan lebih dari 6000 orang meninggal dunia dan sekitar 1,5 juta orang kehilangan rumah. Berdasarkan pengamatan Mazzini dkk. (2007) gempa tersebut diperkirakan memicu terjadinya semburan lumpur (*triggering mud eruption*) Sidoarjo atau LUSI dan meningkatkan aktivitas gunung api di Pulau Jawa.

2.4 Daerah Tinjauan G. Arjuno-Welirang – Lumpur Sidoarjo

Lokasi yang ditinjau adalah di sepanjang jalur Gunung Arjuno-Welirang yang berada di Malang sampai lumpur Sidoarjo (LUSI) yang berada di Porong, Sidoarjo. Daerah tinjauan tersebut berisi tentang kondisi wilayah yang berupa letak kedudukan, luas wilayah, ketinggian wilayah, dan geologi wilayah. Daerah yang ditinjau dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4 Peta daerah penelitian pada G. Arjuno-Welirang sampai LUSI

2.4.1 Letak Geografis dan Luas Wilayah Sidoarjo

Secara geografis Kabupaten Sidoarjo terletak pada 112,5°-112,9°BT dan 7,3°-7,5° LS. Kabupaten Sidoarjo dibatasi oleh Kotamadya Surabaya dan Kabupaten Gresik di sebelah utara, Kabupaten Pasuruan di sebelah selatan, Kabupaten Mojokerto di sebelah barat, dan Selat Madura di sebelah timur. Di wilayah bagian timur Kabupaten Sidoarjo merupakan daerah pantai dan pertambangan yang memiliki ketinggian 0-3 meter dari permukaan laut dengan luas 22.99%. Di wilayah bagian tengah Kabupaten Sidoarjo merupakan daerah pemukiman, perdagangan, dan pemerintahan yang memiliki ketinggian 3-10 meter dengan luas 40.81%. Di wilayah bagian barat Kabupaten Sidoarjo merupakan daerah pertanian yang memiliki ketinggian 10-25 meter dengan luas 29.20%. Luas wilayah

Kabupaten Sidoarjo ± 71.424,25 Ha atau ± 714,24 km² yang berada di antara sungai Mas (± 32,5 km) dan sungai Porong (± 47 km) (Dharma dkk., 2011).

Lumpur Sidoarjo (LUSI) berada di Porong, kabupaten Sidoarjo. Erupsi gunung lumpur merupakan fenomena geologi yang dihasilkan oleh adanya aliran fluida secara vertikal dan semburan lumpur. Fenomena tersebut terjadi pada cekungan sedimentasi di busur belakang (*backarc sedimentary basin*) Indonesia dan berdekatan dengan kompleks magmatik yang termasuk bagian dari busur muka (*forearc region*) (Mazzini dkk., 2007).

2.4.2 Letak Geografis dan Luas Wilayah Malang

Secara geografis Malang terletak pada 07°59'LS dan 112°36'BT. Malang terletak di bagian tengah Provinsi Jawa Timur dengan luas sekitar 3.534,86 km² (353.486 hektar). Di Malang terdapat DAS (Daerah Aliran Sungai) sumber brantas. Wilayah DAS ini sebagian besar berada di Kota Madya Batu dan sebagian kecil berada di Kabupaten Malang (Kecamatan Pujon dan Karangploso), sedangkan bagian hulu termasuk kawasan Taman Hutan Raya (Tahura Surya). DAS Sumber Brantas ini dikelilingi oleh pegunungan vulkanik, yaitu Gunung Arjuno-Welirang, Gunung Anjasmara, dan Gunung Kawi-Butak (Arif, 2012).

Gunung Arjuno-Welirang merupakan gunungapi kembar yang membujur dari SE (*South-East*) dan berakhir di NW (*North-West*). Gunung api tersebut tergolong jenis *stratovolcano* dan *pyroclastic cones* yang memiliki elevasi puncak 3339 m. Gunung ini berada pada koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT. Di sekitar puncak gunung ini tidak terdapat tumbuhan yang hidup.

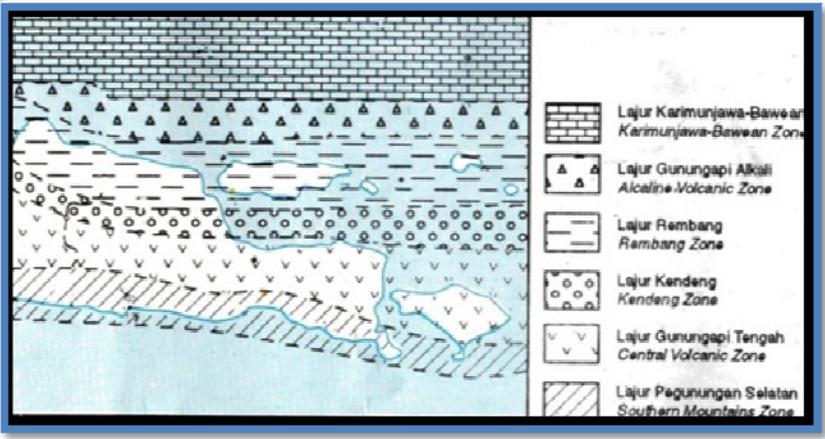
2.4.3 Keadaan Geologi G. Arjuno-Welirang sampai LUSI

Gambar 2.5 di atas menunjukkan bahwa kabupaten Sidoarjo merupakan dataran rendah dengan topografi seragam dan tanahnya berupa endapan aluvium dan batuan sedimen. Struktur geologi daerah tersebut terdapat batuan kuartar bawah yang cenderung tersier. Keadaan yang demikian menunjukkan bahwa kabupaten Sidoarjo pernah oleh aktivitas tektonik berupa pengangkatan dan pelipatan bergelombang dari lapisan batuan sedimen tersier di bagian utara Mojokerto yang penyebarannya menerus hingga daerah Surabaya. Lipatan-lipatan tersebut membentuk struktur antiklin dan sinklin. Sementara itu, di bagian selatan ke arah kabupaten Pasuruan

berubah menjadi daerah perbukitan yang terdiri atas batuan vulkanik muda dan batuan sedimen bersifat lempungan berumur kuartar (Santosa dan Suwarti (1992) dalam Chaerunnisa, 2010).



Gambar 2.5 Peta geologi G. Arjuno-Welirang sampai LUSI (Gafoer dan Ratman, 1999)



Gambar 2.6 Tatanan geologi regional Jawa Timur (Gafoer dan Ratman, 1999)

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa pada daerah tinjauan jalur Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI berada pada lajur Kendeng dan lajur Gunungapi tengah. Tatanan stratigrafi pada lajur kendeng terdiri atas Qa (aluvium), Qps (sedimen plistosen), Qpv (lahar Gunungapi plistosen), Qpvs (endapan Gunungapi plistosen), QTs

(sedimen plio-plistosen), QTv (endapan Gunungapi plio-plistosen), Tnsk (sedimen mio-pliosen), Tplk (batugamping mio-pliosen), dan Tmsk (sedimen miosen). Adapun tatanan stratigrafi pada lajur Gunungapi tengah terdiri atas Qa (aluvium), Qhv (batuan Gunungapi holosen), Qhvl (lava holosen), Qs (sedimen holosen awal), Ql (batugamping koral), Qpvt (tuf plistosen), Qpvl (lava plistosen), dan Qpv (batuan Gunungapi plistosen tidak terurai). Pada umumnya, jalur Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI berupa endapan aluvium yang terdiri atas kerakal, kerikil, pasir, lanau, dan lumpur (Gafoer dan Ratman, 1999).

2.5 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah suatu gejala fisik yang ditandai dengan bergetarnya bumi akibat pelepasan energi dari dalam bumi. Energi tersebut dirambatkan sebagai gelombang gempa yang melalui berbagai batuan di dalam bumi. Model kejadian gempa bumi awalnya dikembangkan oleh seorang ahli geologi Andrew C. Lawson dan insinyur sipil Harry F. Reid pada tahun 1908 yang berdasarkan sesar San Andreas. Pada model ini, gempa terjadi jika litosfer terpatahkan pada suatu retakan yang diskrit (sesar) dan terjadi penambahan regangan (*strain*) secara perlahan pada bagian yang tersesarkan, sehingga saat gempa bumi berlangsung akan terjadi pelepasan regangan yang ada pada dua bagian yang tersesarkan (Santoso, 2002).

2.5.1 Gempa Bumi Berdasarkan Faktor Penyebabnya

Kejadian gempa bumi secara umum diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu tektonik (meliputi *elastic rebound*, robekan secara tiba-tiba, dan perlipatan), gunungapi (meliputi letusan karena tekanan di bawah permukaan, proses kristalisasi, retakan tarikan, intrusi magma, dan *stopping flow*), dan benturan (meliputi ledakan di permukaan, meteor, runtuh gua, longsoran) (Howell, 1959). Gempa bumi diklasifikasikan berdasarkan proses terjadinya, yaitu:

1. Gempa Bumi Tektonik

Gempa bumi tektonik merupakan gempa bumi yang disebabkan oleh gejala tektonik. Gempa bumi tektonik dihasilkan dari interaksi antar lempeng benua, antar lempeng samudra, atau antara lempeng benua dengan lempeng samudra. Lempeng tektonik ini adalah bagian litosfer yang padat dan terapung di atas astenosfer.

2. Gempa Bumi Vulkanik

Gempa bumi vulkanik merupakan gempa bumi yang disebabkan oleh adanya aktivitas gunung berapi berupa desakan magma menuju ke permukaan bumi. Gempa bumi ini hanya dirasakan di sekitar gunung berapi tersebut. Jika keaktifannya tinggi, maka dapat menimbulkan ledakan dan terjadi gempa bumi.

3. Gempa Bumi Buatan

Gempa bumi buatan adalah gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas manusia, seperti peledakan dinamit, nuklir, dan palu yang dipukul ke permukaan bumi.

4. Gempa Bumi Runtuhan

Gempa bumi runtuh adalah gempa bumi yang biasa terjadi di daerah pertambangan akibat aktifitas pertambangan. Gempa ini bersifat lokal sehingga hanya dirasakan di sekitar daerah runtuh (Nurrofiq, 2009).

2.5.2 Gempa Bumi Berdasarkan Intensitas Gempanya

Intensitas adalah suatu ukuran deskriptif akibat guncangan selama terjadi gempa bumi. Intensitas gempa diperoleh berdasarkan penilaian dan klasifikasi dari kerusakan yang ditimbulkan oleh gempa di lokasi tertentu. Pada umumnya intensitas gempa diperoleh dari wawancara setelah terjadinya suatu gempa. Salah satu skala intensitas yang digunakan secara luas adalah skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) (Afnimar, 2009).

Tabel 2.2 Skala *Modified Mercalli Intensity* (Musson dan Cecic, 2011)

Skala MMI	Efek terhadap infrastruktur, lingkungan, dan manusia
I	Gempa tidak terasa. Gelombang seismik yang sampai pada suatu tempat hanya efek marjinal dan periode panjang dari gempa besar.
II	Gempa terasa oleh orang-orang yang sedang istirahat, pada lantai atas atau tempat yang menyenangkan
III	Gempa terasa di dalam ruangan. Benda-benda yang tergantung berayun. Getaran seperti truk-truk ringan yang sedang lewat. Durasi getaran dapat terestimasi. Mungkin goncangannya tidak dikenal sebagai sebuah gempa.
IV	Benda yang tergantung berayun. Getaran seperti truk-truk berat yang sedang lewat atau sensasi suatu pukulan seperti bola berat yang menabrak dinding. Mobil yang parkir

Lanjutan tabel 2.2

	mengalami guncangan. Jendela, benda seperti piring, pintu mengeluarkan bunyi berderak-derak. Gelas-gelas berdentingan. Barang-barang tembikar bisa berdentum. Di atas kisaran IV, dinding kayu dan bingkai mengeluarkan bunyi.
V	Gempa terasa di luar ruangan, terestimasi langsung. Orang-orang tidur bisa terbangun. Bahan-bahan cair tergoncang, ada yang meluap/tertumpah. Benda-benda yang tidak begitu stabil bisa tergeser atau terbalik. Pintu berayun, terbuka, dan tertutup. Daun penutup jendela dan lukisan bergerak. Jam pendulum berhenti, bergerak, kecepatannya berubah.
VI	Gempa terasa oleh semua orang. Banyak yang ketakutan dan lari keluar rumah. Orang berjalan tidak stabil. Jendela, piring, alat-alat gelas pecah. Perhiasan kecil, buku-buku, dan lain-lain jatuh dari rak. Lukisan-lukisan lepas dari dinding. Perabot bergeser atau berputar. Plaster lemah dan bangunan tipe D retak. Lonceng kecil berdentang. Pohon-pohon, semak-semak terdengar bergerisik atau berdesau.
VII	Orang-orang susah berdiri. Ada peringatan oleh pengemudi bahwa terjadi gempa. Benda yang tergantung bergetar. Perabot pecah. Kerusakan pada tipe bangunan D, seperti retak. Cerobong asap yang lemah akan lepas. Plaster, bata, batu, genteng, dan ornament arsitektur terjatuh. Beberapa retakan terjadi pada tipe bangunan C, muncul gelombang di atas kolam dan terjadi turbulensi air dengan lumpur. Terjadi longoran kecil sepanjang pasir atau tumpukan kerikil. Lonceng besar berdentang. Beton selokan irigasi rusak.
VIII	Kemudi mobil dapat rusak. Kerusakan pada tipe bangunan C, sebagian roboh. Beberapa kerusakan pada tipe bangunan B; tidak ada sama sekali kerusakan pada tipe bangunan A. Plester semen beberapa dinding bangunan, cerobong asap, monumen, tower, dan tangki yang terletak pada tempat yang tinggi jatuh. Rangka rumah bergerak di atas pondasi jika tidak terkunci ke pondasinya; dinding-dinding panel lepas terlempar. Tumpukan hancuran berserakan. Cabang-cabang lepas dari pohon. Perubahan aliran atau suhu sumber mata air dan sumur. Tanah basah dan lereng curam mengalami retak.
IX	Orang-orang umumnya panik. Tipe bangunan D hancur; tipe bangunan C rusak berat, kadang-kadang runtuh total; tipe bangunan B rusak serius. Umumnya rusak sampai pondasi.

Lanjutan tabel 2.2

	Struktur rangka jika tidak terkunci ke pondasi, terlepas dari pondasi. Kerusakan serius pada reservoir. Pipa bawah tanah pecah. Retak-retak yang mencolok di tanah. Di area aluvial, pasir, dan lumpur dapat keluar, bisa terdapat air mancur dan terdapat lubang-lubang pasir.
X	Kebanyakan bangunan dan struktur rangka hancur dengan pondasinya. Beberapa struktur kayu yang bagus dan jembatan hancur. Kerusakan serius pada tanggul dan tambak. Terjadi erosi besar. Air keluar dari kanal, sungai, dan danau. Pasir dan lumpur bergeser secara horizontal di pantai dan tanah yang datar. Rel kereta api sedikit bengkok.
XI	Rel kereta api bengkok hebat. Jaringan pipa bawah tanah total tidak bisa digunakan.
XII	Kerusakan hampir total. Batu-batu besar bergeser. Barisan pemandangan dan dataran terdistorsi. Benda-benda berhamburan ke udara.

Tabel 2.3 Deskripsi tipe bangunan (Musson dan Cecic, 2011)

Tipe Bangunan	Deskripsi cara pengerjaan dan bahan
Tipe bangunan A	Cara pengerjaan, pemakaian adukan semen dan rancangan yang bagus; pemakaian struktur bertulang, khususnya secara lateral, dan terikat dengan memakai logam, beton, dan lain-lain; dirancang untuk tahan terhadap gaya lateral.
Tipe bangunan B	Cara pengerjaan dan pemakaian adukan semen yang bagus; pemakaian struktur bertulang tetapi tidak dirancang secara rinci untuk tahan terhadap gaya lateral.
Tipe bangunan C	Cara pengerjaan dan pemakaian adukan semen yang biasa; tidak ada kelemahan ekstrim seperti bagian yang bisa jatuh, tidak ada beton bertulang, dan tidak ada juga rancangan untuk melawan gaya horizontal.
Tipe bangunan D	Pemakaian material yang lemah, seperti semi batako dan bata jemuran; pemakaian adukan semen yang buruk; cara pengerjaan dengan standar rendah; lemah secara horizontal.

Tabel 2.2 menunjukkan pengamatan intensitas gempa berdasarkan efek yang ditimbulkan gempa bumi dan persepsi

manusia terhadap guncangan. Pengamatan intensitas tersebut dapat digunakan untuk mengetahui penyebaran guncangan tanah pada suatu area. Adapun besarnya intensitas tergantung pada energi yang diradiasikan dan dinyatakan dalam bentuk magnitudo. Semakin jauh jarak suatu tempat dari episenter gempa maka energinya akan semakin kecil, sehingga intensitas gempanya juga semakin kecil. Selain itu, besarnya intensitas juga tergantung pada bangunannya, seperti rancangan, tinggi, dan bahan bangunan. Berdasarkan cara pengerjaan dan bahan bangunannya, perincian tipe-tipe bangunan yang disebutkan dalam tabel 2.2 dapat dilihat dalam tabel 2.3 (Afnimar, 2009).

2.5.3 Gempa Bumi Berdasarkan Magnitudonya

Magnitudo merupakan suatu besaran skala secara kuantitatif yang merepresentasikan besarnya energi seismik yang dilepaskan oleh suatu gempa. Nilai magnitudo ditentukan berdasarkan besar kecilnya amplitudo gelombang gempa yang terekam pada seismogram. Persamaan umum magnitudo sebagai berikut (Santoso, 2002):

$$M = \log \frac{A}{T_w} + f(d, h) + C_s + C_r \quad (2.1)$$

Keterangan:

M = magnitudo

A = amplitudo dalam mikron

T_w = periode dalam detik

d = jarak episentrum dalam derajat

h = kedalaman dalam kilometer

C_s = koreksi stasiun

C_r = koreksi regional

Data kejadian gempa dari berbagai sumber biasanya menggunakan skala magnitudo yang berbeda-beda. Skala magnitudo tersebut antara lain: *surface wave* magnitudo (M_s), *Richter local magnitude* (M_L), magnitudo durasi (M_D), *body wave magnitude* (m_b), dan *moment magnitude* (M_w). Ada 5 jenis magnitudo, yaitu (Sukanta dkk., 2010):

1. Magnitudo lokal (M_L)

M_L merupakan magnitudo gempa yang dikembangkan oleh Richter (1935) untuk gempa lokal di daerah California dengan jarak episenter $30 < \Delta < 600$ km. Richter mengukur magnitudo gempa berdasarkan nilai amplitudo maksimum gerakan tanah pada jarak 100 km dari episenter gempa. Besarnya gelombang ini tercatat pada seismograf *Woods-Anderson* yang dapat mendeteksi gerakan tanah mulai dari $0,00001$ mm (1×10^{-5} mm) hingga 1 m. Untuk menyederhanakan rentang angka yang terlalu besar tersebut, Richter menggunakan bilangan logaritma berbasis 10. Artinya, setiap kenaikan 1 angka pada skala Richter menunjukkan amplitudo 10 kali lebih besar.

2. Magnitudo durasi (M_D)

M_D merupakan magnitudo gempa untuk tipe gempa lokal sebagai pengembangan dari M_L , karena keterbatasan kertas analog dalam merekam gempa lokal yang kuat sehingga sering terpotongnya rekaman kejadian gempa. Magnitudo ini ditentukan berdasarkan pada durasi sinyal setiap kejadian gempa. Saat ini telah digunakan pengubah 24 bit A-D dengan jangkauan dinamik ≈ 140 dB sehingga berguna pada kasus sinyal yang amplitudonya sangat besar (*off scale*).

3. Magnitudo gelombang permukaan (M_s)

M_s merupakan magnitudo gempa untuk gempa jauh (tele) yang dangkal. Skala magnitudo gelombang permukaan diperoleh sebagai hasil pengukuran terhadap gelombang permukaan (*surface waves*) dengan jarak episenter (Δ) > 600 km.

4. Magnitudo gelombang badan periode pendek (m_b)

m_b merupakan magnitudo untuk gempa jauh, baik gempa dangkal maupun dalam. Magnitudo ini ditentukan berdasarkan amplituda gelombang badan (P atau S).

5. Magnitudo momen (M_w)

M_w merupakan magnitudo gempa yang berdasarkan momen seismik. Momen seismik (M_0) dapat diestimasi dari dimensi pergeseran bidang sesar atau dari analisis karakteristik gelombang gempa bumi yang direkam di stasiun pencatat khususnya dengan seismograf periode bebas (*broadband seismograph*). M_0 adalah parameter dasar yang dapat digunakan untuk mengukur kekuatan suatu gempa akibat slip atau pergelinciran sesar. Magnitudo momen dapat menyatakan jumlah energi yang dilepaskan di fokus gempa

dengan lebih akurat dan pengukurannya lebih kompleks dibandingkan pengukuran pada M_L , M_s , dan m_b .

Sebelum dilakukan pengolahan data gempa, maka terlebih dahulu dilakukan konversi skala-skala magnitudo menjadi satu skala magnitudo yang sama. Untuk mendapatkan korelasi konversi magnitudo di wilayah Indonesia, maka dilakukan analisis regresi berdasarkan data gempa (katalog gempa) wilayah Indonesia. Rumusan korelasi konversi magnitudo untuk wilayah Indonesia dapat dilihat dalam tabel 2.4 (Irsyam dkk., 2010).

Tabel 2.4 Korelasi konversi skala magnitudo untuk wilayah Indonesia (Irsyam dkk., 2010)

Korelasi Konversi	Jumlah Data	Range Data	Kesesuaian (R^2)
$M_w = 0.143M_s^2 - 1.051M_s + 7.285$	3.173	$4.5 \leq M_s \leq 8.6$	93.9%
$M_w = 0.114m_b^2 - 0.556m_b + 5.560$	978	$4.9 \leq m_b \leq 8.2$	72.0%
$M_w = 0.787M_E + 1.513$	154	$5.2 \leq M_E \leq 7.3$	71.2%
$m_b = 0.125M_L^2 - 0.389M_L + 3.513$	722	$3.0 \leq M_L \leq 6.2$	56.1%
$M_L = 0.717M_D + 1.003$	384	$3.0 \leq M_D \leq 5.8$	29.1%

2.5.4 Gempa Bumi Berdasarkan Kedalaman Hiposentrum

Gempa bumi yang terjadi biasanya berupa serangkaian getaran dari beberapa fokus gempa (hiposenter). Hiposenter adalah lokasi pusat gempa bumi sebagai tempat pelepasan energi yang merambat gelombang, sedangkan proyeksi hiposenter ke permukaan bumi dinamakan episenter. Berdasarkan kedalaman hiposentrumnya, gempa bumi diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu (Santoso, 2002):

1. Gempa bumi dalam

Gempa bumi dalam adalah gempa bumi yang hiposentrumnya lebih dari 300 km di bawah permukaan bumi. Gempa bumi ini tidak terlalu berbahaya.

2. Gempa bumi menengah

Gempa bumi menengah adalah gempa bumi yang hiposentrumnya antara 70 km sampai 300 km di bawah permukaan

bumi. Gempa bumi ini dapat menimbulkan kerusakan ringan dan getarannya lebih terasa.

3. Gempa bumi dangkal

Gempa bumi dangkal adalah gempa bumi yang hiposentrumnya kurang dari 70 km dari permukaan bumi. Gempa bumi ini dapat menimbulkan kerusakan besar.

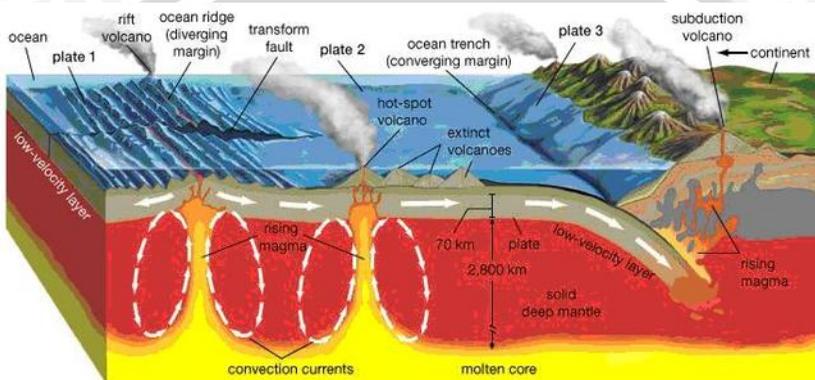
2.6 Faktor-faktor Penyebab Terjadinya Gempa Bumi

2.6.1 Teori Tektonik Lempeng

Teori lempeng tektonik merupakan teori kinematika yang menjelaskan pergerakan gempa bumi dengan tidak membahas penyebab dari pergerakannya. Hipotesis dasar dari teori lempeng tektonik bahwa permukaan bumi terdiri atas beberapa lempengan kaku (litosfer) yang saling bergerak satu dengan lainnya. Pergerakan tersebut terjadi karena lempengan ini seolah-olah mengambang pada bahan yang plastis (astenosfer) (Santoso, 2002). Berdasarkan teori tersebut, kulit bumi dibagi atas enam lempeng yang seukuran benua (Afrika, Amerika, Antartika, Australia, Eurasia, dan Pasifik) dan empat belas lempeng sub-benua (Caribbean, Cocos, Nazca, Phillipine, dan lain-lain). Selain itu, terdapat lempeng yang lebih kecil di sekitar lempeng yang lebih besar. Deformasi antar lempeng-lempeng hanya terjadi di sekitar tepian atau batas antar lempeng. Deformasi ini terdiri atas *aseismic deformation* dan *seismic deformation*. *Aseismic deformation* terjadi secara lambat dan terus-menerus, sedangkan *seismic deformation* terjadi secara tidak teratur dalam bentuk gempa bumi. Apabila deformasi terjadi di batas antar lempeng, maka lokasi-lokasi gempa terletak di sekitar batas lempeng (Kramer (1996) dalam Razali, 2008).

Hukum keseimbangan termomekanika material bumi menjelaskan tentang sumber pergerakan lempeng. Berdasarkan hukum tersebut, lapisan teratas dari kulit bumi bersinggungan dengan kerak bumi yang relatif dingin sedangkan lapisan terbawah bersinggungan dengan lapisan terluar inti bumi yang panas. Keadaan yang demikian menyebabkan peningkatan temperatur pada lapisan kulit bumi dan terjadi proses konveksi. Proses konveksi dipengaruhi oleh perbedaan kepadatan lapisan dan temperatur antara material tebal yang lebih dingin dengan material tipis yang lebih panas, sehingga menghasilkan keadaan tidak stabil. Material tebal yang lebih dingin tenggelam akibat pengaruh gravitasi dan pemanasan sedangkan material tipis yang lebih panas naik ke atas. Material yang

tenggelam tersebut akan meleleh dan menjadi lebih tipis, sehingga material tersebut bergerak naik dan mengalami penurunan suhu. Material yang didinginkan akan tenggelam lagi dan terbentuk arus konveksi (Kramer (1996) dalam Razali, 2008).



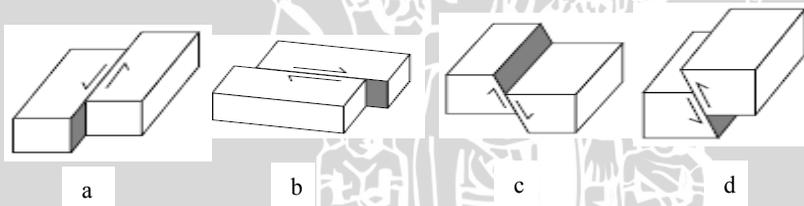
Gambar 2.7 Interrelasi antara bubungan melebar, zona subduksi, dan batas patahan lempeng (Priyanto, 2011)

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa arus konveksi pada batuan setengah lebur menimbulkan tegangan geser di bawah lempeng. Akibat tegangan geser tersebut dapat menggeser lempeng ke arah yang berbeda-beda. Selain itu, pergerakan lempeng dapat disebabkan oleh tarikan bubungan atau tarikan irisan. Di bubungan melebar atau celah melebar menunjukkan bahwa lempeng bergerak menjauh satu dengan lainnya pada batas lempeng. Bubungan melebar ini mengakibatkan batuan lebur dari lapisan dasar muncul ke permukaan dan mendingin, sehingga menjadi bagian lempeng yang merenggang dengan tingkat pelebaran berkisar dari 2 hingga 18 cm/tahun. Tingkat pelebaran tertinggi ditemukan di lautan Pasifik sedangkan tingkat pelebaran terendah ditemukan di sepanjang bubungan *Mid-Atlantic*. Kerak bumi yang berusia muda terbentuk tipis di sekitar bubungan yang melebar karena pergerakan magma ke atas yang relatif lambat atau dapat pula pergerakan magma yang cepat saat terjadi gempa. Pembentukan material lempeng baru pada bubungan melebar harus seimbang dengan berkurangnya material lempeng di lokasi lain karena ukuran bumi tidak berubah. Pengurangan material lempeng menyebabkan adanya pergerakan relatif dari dua lempeng yang saling menjunam satu dengan lainnya. Jika lempeng benua bersinggungan dengan lempeng samudra, maka lempeng samudra

akan menyusup ke bawah lempeng benua karena lempeng samudra lebih dingin dan tebal dibandingkan dengan lempeng benua. Dengan demikian, zona subduksi sering ditemukan di sekitar pinggiran benua. Jika antar lempeng benua saling bertumbukan, maka akan terbentuk jajaran pegunungan. Contohnya adalah pegunungan Himalaya akibat tumbukan lempeng Australia dengan lempeng Eurasia (Kramer (1996) dalam Razali, 2008).

2.6.2 Teori Elastisitas Pegas

Berdasarkan teori elastisitas pegas (*Elastic Rebound Theory*) yang dikemukakan oleh Harry F. Reid, gempa bumi biasanya terjadi di area yang mengalami deformasi atau sesar. Sesar (*fault*) merupakan jalur patahan yang telah mengalami pergeseran. Material pada sisi sesar saling bergerak secara relatif dan terdeformasi sebagai respon terhadap tegangan. Meskipun demikian, gesekan pada bidang sesar terkunci dan terhindar dari slip. Keadaan tersebut menyebabkan akumulasi regangan pada batuan melebihi gaya pada batuan untuk bertahan, sehingga terjadi gempa bumi. Berdasarkan geometri sesar dasar dengan sudut slip tertentu, tipe-tipe dasar persesaran dapat diklasifikasikan sebagai berikut (Afnimar, 2009):



Gambar 2.8 Tipe-tipe dasar persesaran a. *Left-lateral strike-slip fault*, b. *Right-lateral strike-slip fault*, c. *Normal dip-slip fault*, d. *Reverse dip-slip fault* (Shearer, 2009)

Gambar 2.8 menunjukkan bahwa *strike-slip* murni akan terjadi jika dua sisi sesar bergerak secara horizontal. Jika $\lambda = 0^\circ$ *hanging wall* bergerak ke arah kiri yang disebut *left-lateral*, dan jika $\lambda = 180^\circ$ *hanging wall* bergerak ke arah kanan yang disebut *right-lateral*. Dua geometri sesar dasar yang lain adalah *dip-slip*. Jika $\lambda = 270^\circ$ *hanging wall* bergerak turun ke bawah yang disebut persesaran normal (*normal faulting*), dan jika $\lambda = 90^\circ$ *hanging wall* bergerak naik ke atas yang disebut persesaran naik (*trust or reverse*

faulting). Gempa bumi yang terjadi umumnya berada pada kombinasi tipe-tipe sesar dasar tersebut (Afnimar, 2009).

2.7 Gelombang Seismik

Gelombang adalah getaran yang merambat. Berdasarkan medium perambatannya, gelombang dibedakan menjadi dua, yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gelombang mekanik adalah gelombang yang memerlukan medium dalam perambatannya. Gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang tidak memerlukan medium dalam perambatannya. Jika gelombang mekanik melewati suatu medium elastis, maka bagian-bagian dari medium akan mengalami pergeseran dari kedudukan normalnya. Hal yang demikian disebabkan oleh sifat elastis medium, sehingga gangguan yang mengenai medium akan diteruskan dari lapisan satu ke lapisan berikutnya. Gelombang mekanik yang menjalar dalam medium bumi disebut gelombang seismik atau gelombang elastik. Interaksi gaya gangguan (*gradien stress*) dari perambatan gelombang seismik yang melawan gaya-gaya elastik medium menyebabkan osilasi partikel-partikel medium (Kearey dkk., 2002).

Gelombang seismik dibedakan menjadi 2 berdasarkan penjaralannya, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan adalah gelombang yang merambat dalam medium bumi dengan arah perambatan ke seluruh bagian di dalam bumi. Gelombang permukaan (*surface wave*) adalah gelombang yang merambat di permukaan medium bumi. Gelombang permukaan mempunyai frekuensi yang rendah dan amplitudo besar. Selain itu, Gelombang permukaan dihasilkan dari interferensi gelombang badan yang berinteraksi dengan permukaan bebas.

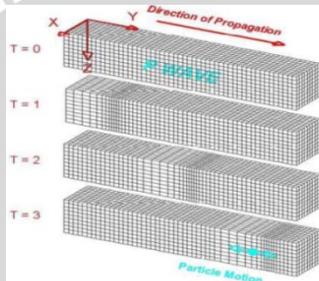
Berdasarkan sifat gerakan partikel, gelombang badan dibedakan menjadi 2 jenis:

1. Gelombang P (*P wave*)

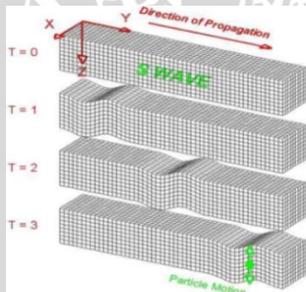
Gelombang P merupakan gelombang yang arah osilasi partikel-partikel mediumnya searah dengan arah penjaralannya (gambar 2.9). Gelombang P disebut juga gelombang longitudinal, gelombang dilatasi, gelombang irotasional, atau gelombang kompresi (*compresional wave*). Gelombang ini memiliki kecepatan paling tinggi dibandingkan gelombang yang lain, yaitu sekitar 6 - 7 km/s (Kearey dkk., 2002).

2. Gelombang S (*S wave*)

Gelombang S merupakan gelombang yang arah osilasi partikel-partikel mediumnya tegak lurus dengan arah penjaralannya (gambar 2.10). Gelombang S disebut juga gelombang *shear*, gelombang transversal, atau gelombang rotasi. Gelombang ini memiliki kecepatan lebih kecil dibandingkan gelombang P. Gelombang S terdiri atas gelombang *Shear Vertical* (SV) yang arah getarannya terpolarisasi pada bidang vertikal dan gelombang *Shear Horizontal* (SH) yang arah getarannya terpolarisasi pada bidang horisontal (Kearey dkk., 2002).



Gambar 2.9 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang P



Gambar 2.10 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang S

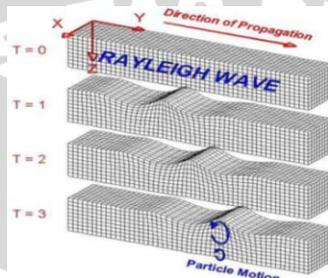
Berdasarkan sifat gerakan partikel, gelombang permukaan dibedakan menjadi 2 jenis:

1. Gelombang *Rayleigh*

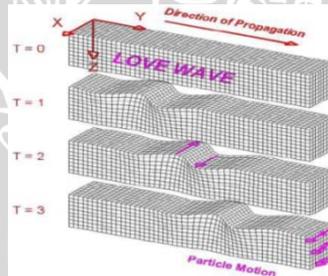
Gelombang *Rayleigh* merupakan gelombang yang gerakan partikel mediumnya akibat interferensi gelombang pantul P dan gelombang SV. Gerak partikel medium yang dilewati gelombang ini berbentuk *ellips* (gambar 2.11). Gelombang ini memiliki amplitudo yang berkurang terhadap kedalaman (Afnimar, 2009).

2. Gelombang *Love*

Gelombang *Love* merupakan gelombang yang gerakan partikel mediumnya akibat interferensi gelombang P dan gelombang SH. Gerakan partikel medium berbentuk *ellips* pada bidang horisontal, sedangkan penjalarannya ke arah lateral (gambar 2.12). Gelombang ini memiliki amplitudo yang berkurang terhadap kedalaman dan kecepatan $V_R < V_L < V_S$ (Afnimar, 2009).



Gambar 2.11 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang *Rayleigh*



Gambar 2.12 Osilasi partikel medium yang dilewati gelombang *Love*

2.8 Parameter Gempa Bumi

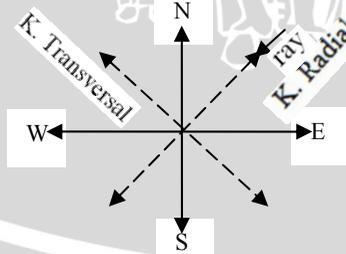
Sinyal gelombang seismik pada setiap gempa bumi yang dianalisis dapat digunakan untuk mengetahui parameter gempa bumi. Parameter gempa bumi merupakan acuan nilai besaran dan letak kejadian suatu gempa. Parameter-parameter gempa bumi terdiri atas (Ony, 2007):

1. Waktu terjadinya gempa bumi (*origin time*) adalah waktu terlepasnya energi tegangan (*stress*) yang disertai penjalaran gelombang gempa bumi.

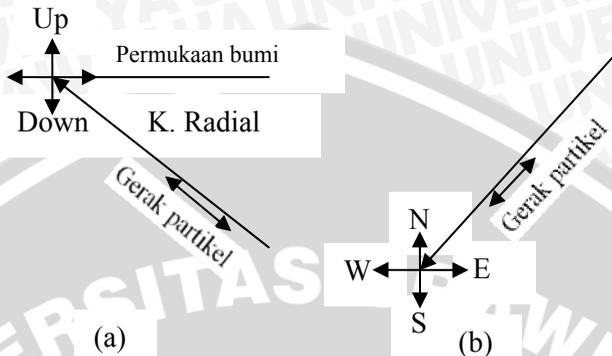
2. Hiposenter adalah suatu titik yang menjadi tempat terlepasnya energi elastik dalam bentuk gelombang gempa atau lokasi dari pusat terjadinya gempa.
3. Episenter adalah suatu titik hasil proyeksi dari hiposenter di permukaan bumi yang dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur.
4. Kedalaman sumber gempa bumi (*depth*) adalah jarak hiposenter yang dihitung tegak lurus dari permukaan bumi.
5. Kekuatan gempa bumi atau *magnitude* adalah ukuran kekuatan gempa bumi yang menggambarkan besarnya energi gempa bumi.
6. Intensitas gempa bumi adalah tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempa bumi berdasarkan efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan, dan lingkungan pada tempat tertentu.

2.9 Perekaman Gelombang Seismik pada Seismometer Tiga Komponen

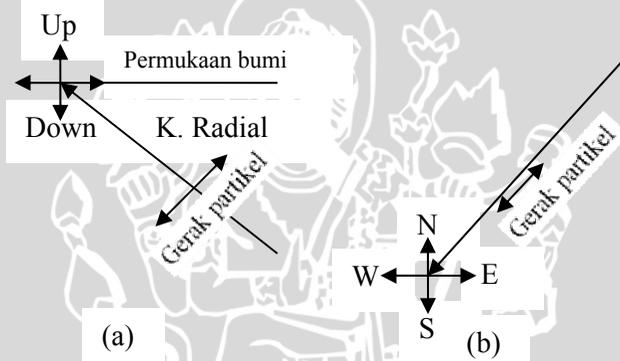
Seismometer tiga komponen merupakan seismometer yang mempunyai tiga buah sensor. Sensor tersebut terdiri atas sensor yang merekam gelombang seismik pada komponen vertikal (*up-down*, UD) dan dua sensor yang merekam pada komponen horizontal (*north-south* (NS) dan *east-west* (EW)). Selain ketiga komponen tersebut, didefinisikan dua komponen untuk komponen horizontal, yaitu komponen radial dan transversal. Komponen radial merupakan komponen horizontal yang searah dengan arah rambat gelombang, sedangkan komponen transversal merupakan komponen horizontal yang tegak lurus terhadap arah rambat gelombang (gambar 2.13). Untuk mengetahui pada komponen mana saja suatu tipe gelombang akan terekam, maka diperlukan penjelasan mengenai masing-masing tipe gelombangnya (Afnimar, 2009).



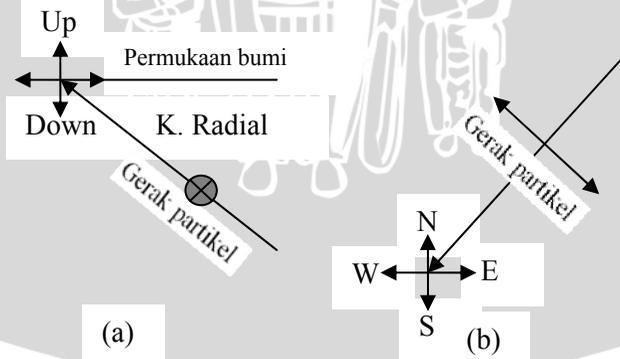
Gambar 2.13 Arah polarisasi komponen radial dan transversal di suatu stasiun



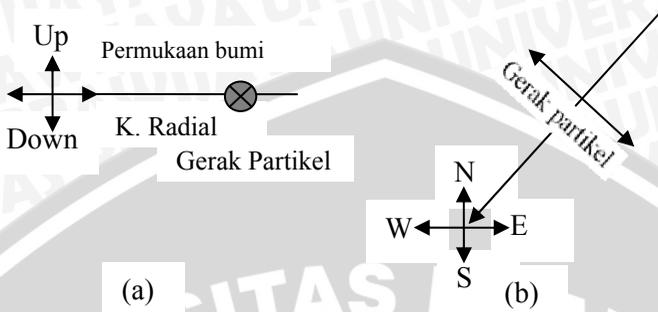
Gambar 2.14 Ilustrasi gerak partikel gelombang P (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas



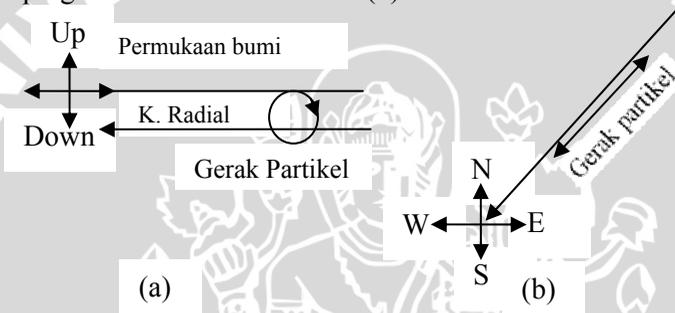
Gambar 2.15 Ilustrasi gerak partikel gelombang SV (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas



Gambar 2.16 Ilustrasi gerak partikel gelombang SH (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas



Gambar 2.17 Ilustrasi gerak partikel gelombang *Love* (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas



Gambar 2.18 Ilustrasi gerak partikel gelombang *Rayleigh* (a) terlihat dari samping atau secara vertikal dan (b) terlihat dari atas

Komponen-komponen yang mungkin merekam gelombang P dapat dilihat pada gambar 2.14. Gerak partikel yang dilewati gelombang P akan terekam pada komponen vertikal dan radial (NS dan EW). Untuk kasus gelombang SV dapat diilustrasikan pada gambar 2.15. Gerak partikel yang dilewati gelombang SV akan terekam pada komponen yang sama dengan kasus gelombang P. Untuk kasus gelombang SH dapat diilustrasikan pada gambar 2.16. Gerak partikel ketika dilewati gelombang SH yang sejajar dengan permukaan bumi, tidak akan ada pada komponen vertikal dan radial. Gerak partikelnya hanya pada komponen transversal dan terekam pada komponen NS dan EW tergantung pada sudut datang azimutnya. Untuk gelombang *Love* yang menjalar sejajar dengan permukaan bumi diilustrasikan pada gambar 2.17 ketika sampai pada suatu stasiun. Gerak partikel yang dilewati gelombang *Love* akan terekam pada komponen yang sama dengan kasus gelombang SH. Untuk gelombang *Rayleigh* diilustrasikan pada gambar 2.18 ketika

sampai pada suatu stasiun. Gerak partikel yang dilewati gelombang *Rayleigh* berupa *ellips* dan akan terekam pada komponen vertikal dan radial (NS dan EW) (Afnimar, 2009).

2.10 TDS Stasioner 5.0

TDS (*Tide Digital Seismograph*) Stasioner 5.0 adalah suatu sistem digital 3 komponen untuk mengolah sinyal gempa bumi yang dilengkapi dengan tiga *software* penganalisis. Tiga *software* penganalisis ini mampu menganalisis secara otomatis parameter gempa bumi. Sedangkan perangkat dasar dari TDS stasioner 5.0 terdiri atas sensor *broadband* 3 komponen, digitizer, *software* pengolah sinyal, PC/laptop pengolah sinyal, perangkat kabel, *Accu*/Panel surya, dan Inverter (Adnan, 2012).

Tiga *software* penganalisis tersebut, antara lain (Adnan, 2012):

1. *Monost* digunakan untuk menampilkan sinyal hasil rekaman sensor TDS stasioner 5.0 secara *real – time* serta dapat digunakan untuk kalibrasi TDS stasioner 5.0.
2. *Data pro* digunakan untuk mengolah sinyal gempa bumi yang terekam oleh sensor TDS stasioner 5.0 serta dapat digunakan untuk filter sampai analisis sinyal sehingga diperoleh parameter gempa bumi.
3. *Netrec* digunakan untuk mendownload data yang tersimpan di dalam digitizer.

TDS stasioner 5.0 termasuk alat digital. Sinyal yang terekam oleh sensor pada TDS dikirimkan ke perangkat komputer (PC) penganalisis tanpa menggunakan kabel, melainkan dengan menggunakan *microtic*. Data sinyal gelombang seismik yang diterima oleh sensor akan dicatat dalam bentuk seismogram pada SPS-1 (analog) dan juga akan dicatat dalam komputer (digital) pada *software* TDS yang secara otomatis tersimpan dalam data pro. Setelah itu, sinyal gelombang gempa bumi tersebut akan dianalisis dengan membuka *file* data pro untuk mencari data *event* gempa. Nama data *event* gempa sesuai dengan waktu terjadinya gempa, yaitu tertulis ddmmhhhh dan hh:mm:dd misalnya 26072009 19:50:48. Sinyal gelombang gempa yang telah dianalisis dapat memberikan informasi berupa waktu tiba gelombang gempa bumi dan perkiraan jarak sumber getaran dari stasiun pengamatan (Adnan, 2012).

2.11 Parameter Gerakan Tanah (*Ground Motion Parameters*)

Parameter gerakan tanah digunakan untuk mendeskripsikan karakteristik pergerakan tanah. Salah satu parameter pergerakan tanah adalah parameter amplitudo yang menggambarkan pergerakan tanah melalui riwayat waktu (*time history*). Parameter-parameter pergerakannya berupa percepatan, kecepatan, dan perpindahan (*displacement*). Biasanya hanya satu parameter yang diukur secara langsung, sedangkan parameter lain dihitung melalui diferensiasi atau integrasi. Pada ranah frekuensi, diperoleh $\tilde{v}(\omega) = \frac{\tilde{u}(\omega)}{\omega}$ dan $\tilde{a}(\omega) = \frac{\tilde{v}(\omega)}{\omega}$, dengan \tilde{u} , \tilde{v} , dan \tilde{a} masing-masing adalah perpindahan, kecepatan dan percepatan (Sukanta dkk., 2010).

2.11.1 Amplitudo Percepatan Puncak

Nilai yang paling sering diukur dari amplitudo pergerakan tanah adalah Percepatan Horizontal Puncak (PHP) atau *Peak Horizontal Acceleration* (PHA). PHP untuk komponen tertentu berupa nilai terbesar (absolut) dari percepatan horizontal yang diperoleh dari *accelerogram* komponen tersebut. Nilai resultan PHP maksimum diperoleh dengan menjumlahkan vektor dua komponen ortogonal horizontal (Sukanta dkk., 2010).

Pada umumnya, percepatan horizontal dimanfaatkan untuk mendeskripsikan pergerakan tanah (*ground motions*) karena berkaitan dengan gaya inersia. PHP relatif berkaitan dengan gaya dinamik terbesar yang mempengaruhi beberapa tipe struktur, seperti struktur-struktur yang sangat kaku. Selain itu, PHP juga berkorelasi dengan intensitas gempa bumi. Meskipun korelasi ini jauh dari presisi, namun sangat berguna sebagai estimasi saat hanya ada PHP sebagai informasi intensitas, seperti dalam kasus-kasus gempa bumi sebelum adanya peralatan gempa kuat (*strong motions instruments*). Selain PHP juga terdapat Percepatan Vertikal Puncak (PVP), tetapi percepatan vertikal mendapat perhatian lebih sedikit dibandingkan percepatan horizontal. Hal tersebut dikarenakan batas aman (*margins of safety*) terhadap gaya vertikal statis yang disebabkan gravitasi dalam pekerjaan konstruksi umumnya menyediakan resistansi yang cukup terhadap gaya dinamis akibat percepatan vertikal selama terjadi gempa bumi. Percepatan Vertikal Puncak (PVP) atau *Peak Vertical Acceleration* (PVA) dalam bidang rekayasa gempa sering diasumsikan senilai dua pertiga (2/3) percepatan horizontal puncak (Sukanta dkk., 2010).

Pergerakan tanah dengan percepatan puncak yang tinggi biasanya lebih merusak dibandingkan gerakan dengan percepatan puncak yang lebih rendah, kecuali pada kasus tertentu. Percepatan puncak yang tinggi dan durasi waktunya sangat pendek dapat menyebabkan kerusakan yang kecil pada berbagai tipe struktur. Sejumlah gempabumi menghasilkan percepatan puncak lebih dari 0,5 g, namun tidak menyebabkan kerusakan berarti pada bangunan karena terjadi pada frekuensi yang sangat tinggi dan durasi/lamanya gempa bumi juga tidak terlalu panjang. Percepatan puncak merupakan parameter penting dan bermanfaat, namun tidak menyediakan informasi tentang kandungan frekuensi atau durasi gerakan. Sebagai konsekuensinya harus didukung dengan informasi tambahan untuk menggambarkan karakter pergerakan gempa dengan akurat (Sukanta dkk., 2010).

2.11.2 Amplitudo Kecepatan Puncak

Kecepatan Horizontal Puncak (KHP) atau *Peak Horizontal Velocity* (PHV) adalah parameter lain yang berguna untuk mengkarakterisasi pergerakan tanah. Kecepatan kurang sensitif terhadap komponen gerakan tanah yang berfrekuensi tinggi sehingga KHP lebih akurat untuk mengkarakterisasi gerakan tanah pada frekuensi menengah. KHP akan memberikan indikasi potensi kerusakan yang lebih akurat dibandingkan PHP untuk struktur atau fasilitas yang sensitif terhadap pembebanan dalam kisaran frekuensi menengah. Misalnya pada bangunan tinggi atau fleksibel, jembatan, dan lain-lain. KHP juga telah dikorelasikan dengan intensitas gempabumi (Sukanta dkk., 2010).

2.11.3 Amplitudo Perpindahan Puncak

Perpindahan puncak umumnya dihubungkan dengan komponen frekuensi rendah dari pergerakan gempa bumi. Akan tetapi, sangat sulit menentukan perpindahan puncak ini secara akurat karena adanya kesalahan (*errors*) pemrosesan sinyal dalam pemfilteran dan integrasi *accelerogram* serta akibat *noise* periode panjang. Oleh sebab itu, perpindahan puncak sering kurang dimanfaatkan untuk mengukur pergerakan tanah dibandingkan percepatan puncak atau kecepatan puncak (Sukanta dkk., 2010).

2.12 Percepatan Tanah

Percepatan adalah parameter yang menggambarkan adanya perubahan kecepatan. Adapun percepatan tanah maksimum adalah suatu nilai percepatan getaran tanah terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat akibat gempa bumi. Nilai percepatan tanah maksimum dipengaruhi oleh kekuatan gempa bumi, jarak sumber gempa bumi terhadap titik pengamatan, dan nilai periode dominan tanah di daerah tertentu (Delfebriyadi, 2009).

Percepatan tanah di suatu tempat disebabkan oleh getaran seismik dan karakteristik lapisan tanah di tempat tersebut (Delfebriyadi, 2009). Lysmer dkk. (1975) menyatakan bahwa respon dinamis struktur tertentu pada saat terjadi gempa bumi akan dipengaruhi oleh adanya struktur lain di bawah permukaan tanah, seperti terowongan. Untuk menganalisis pengaruh gempa terhadap interaksi antara tanah dan struktur umumnya digunakan dua metode. Metode pertama menggunakan analisis dengan memperhitungkan variasi-variasi pergerakan struktur dan tanah di sekitarnya, sedangkan metode kedua menggunakan analisis kelembaman. Analisis kelembaman mengasumsikan bahwa tanah di sekitar struktur yang ditinjau akan mengalami pergerakan yang sama di setiap titiknyanya. Selain itu, juga diperhitungkan respon dari struktur tersebut saat terjadi gempa yang gerakannya bervariasi dari satu titik ke titik lainnya antara batuan dasar ke permukaan tanah. Analisis tersebut dapat digunakan dengan menganggap pergerakan tanah disebabkan oleh rambatan vertikal gelombang badan (*body wave*) dari formasi tanah yang lebih kaku. Kontrol pergerakan (*control motion*) di suatu titik dapat dijadikan acuan untuk menentukan pergerakan tanah pada suatu kedalaman (Razali, 2008).

2.13 Pengaruh Percepatan Tanah terhadap Bangunan

Gelombang gempa mempunyai spektrum lebar sehingga hanya gelombang gempa yang sama dan mempunyai periode dominan tanah pada lapisan sedimen yang akan diperkuat dan terjadi resonansi. Bangunan yang berada di atas lapisan sedimen ini juga akan bergetar dengan arah getaran terdiri atas dua komponen, yaitu komponen horizontal dan komponen vertikal. Getaran yang arahnya vertikal kurang membahayakan karena searah dengan gaya gravitasi bumi, sedangkan getaran yang arahnya horizontal dapat membahayakan dan menimbulkan kerusakan bangunan yang berada di atas lapisan sedimen. Bangunan yang tinggi diumpamakan seperti

bandul yang mengalami getaran paksa (*force vibration*), sehingga membahayakan apabila terjadi gempa bumi (Haris, 2012).

Mekanisme gaya yang mengenai bangunan menurut Sulaiman (1980), antara lain:

1. Gempa bumi terjadi akibat pelepasan energi *stress* dalam bentuk gelombang yang menjalar di permukaan tanah. Jika gelombang tersebut bersinggungan dengan pondasi bangunan, maka pondasi bangunan akan melakukan reaksi inersia berupa getaran yang arahnya berlawanan dengan getaran yang diterima pondasi tersebut.
2. Getaran yang diteruskan ke bagian atas akan diteruskan kembali ke bagian bawah, tetapi gaya horizontal yang bekerja pada bangunan tidak diimbangi oleh gaya berat bangunan.

2.14 Fungsi Atenuasi dan Faktor yang Mempengaruhinya

Suatu parameter gempa berbanding terbalik dengan jarak sumber gempa terhadap titik pengamatan, sehingga parameter gempa berkurang seiring dengan bertambahnya jarak dan menyebabkan terjadi atenuasi (peluruhan energi gempa) di suatu tempat. Fungsi atenuasi (*attenuation function*) merupakan suatu fungsi yang menunjukkan hubungan antara intensitas (*I*) gerakan tanah setempat, magnitudo (*M*), dan jarak (*R*) lokasi pengamatan dari sumber gempa. Fungsi atenuasi ini dapat digunakan untuk menentukan percepatan tanah maksimum di suatu tempat dalam memperkirakan resiko kegempaan pada perencanaan bangunan tahan gempa (Razali, 2008).

Faktor-faktor yang mempengaruhi fungsi atenuasi, antara lain (Razali, 2008):

1. Mekanisme gempa

Gempa-gempa besar biasanya terjadi karena pergeseran lempeng tektonik di daerah subduksi ataupun di daerah patahan. Gempa bumi yang berada di daerah subduksi biasanya berupa gempa dalam dan memiliki perbedaan dengan gempa dangkal. Gempa dalam memiliki respon yang lebih rendah pada periode tinggi dibandingkan dengan gempa dangkal, sehingga perumusan atenuasi untuk gempa *subduction* seharusnya berbeda dengan gempa *strike slip*.

2. Jarak episenter

Respon dari gempa yang diterima pada oleh batuan mempunyai bentuk yang berbeda. Respon tersebut bergantung pada

jarak episenternya (*near field, mid field, dan far field*). Respon dari gempa *near field* akan tinggi pada periode yang rendah dan akan berkurang seiring dengan penambahan periode. Adapun respon dari gempa *far field* pada periode rendah akan tampak konstan sampai periode sekitar satu detik. Semakin jauh suatu tempat dari episenter gempa maka akan terjadi perubahan frekuensi gempa.

3. Kondisi tanah lokal

Kondisi tanah lokal penting dalam menentukan respon suatu daerah terhadap gelombang gempa. Respon gempa yang tiba di batuan dasar dapat diperkuat, diperlemah, atau berubah frekuensinya karena tersaringnya getaran berfrekuensi tinggi.

2.15 Fungsi Atenuasi

Fungsi atenuasi telah dikembangkan oleh beberapa peneliti. Beberapa fungsi atenuasi untuk menghitung nilai percepatan tanah (PGA), antara lain: fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988, Fukushima dan Tanaka tahun 1990, Crouse tahun 1991, dan Youngs et al. tahun 1997 (Douglas, 2011). Adapun fungsi atenuasi untuk menghitung intensitas akibat gempa, yaitu fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011).

2.15.1 Fungsi Atenuasi Percepatan Tanah

1. Rumusan Joyner dan Boore (1981, 1988) (Douglas, 2011)

Fungsi atenuasi yang diperoleh Joyner dan Boore menggunakan data gempa dangkal di Amerika Utara bagian barat yang kedalamannya kurang dari 20 km dengan $M > 5$. Gempa bumi tersebut didefinisikan sebagai gempa bumi sesar terutama yang kedalamannya di atas 20 km. Rekaman gempanya terbanyak dengan magnitudo kurang dari 6,6. Fungsi ini menggunakan dua kategori lokasi, yaitu batuan dan tanah. Pada lapisan batuan sebanyak 29 rekaman gempa yang dideskripsikan sebagai batuan granit, diorit, *gneiss, chert, greywacke*, batuan gamping, batuan pasir atau *siltstone* dengan ketebalan material kurang dari 4-5 m. Pada lapisan tanah sebanyak 96 rekaman yang dideskripsikan sebagai alluvium, pasir, kerikil, lempung, *silt*, lumpur, *glacial outwash* kecuali tanah yang ketebalannya kurang dari 4-5 m. Fungsi atenuasi ini pertama kali dipublikasikan pada tahun 1981 dengan persamaan (2.2) sebagai berikut (Douglas, 2011):

$$\log(PGA) = 0.249.M_W - \log R_0 - 0.00255.R_0 - 1.02 \quad (2.2)$$

Keterangan:

PGA = percepatan tanah maksimum (g)

M_W = magnitudo momen

σ = 0.26 (standar deviasi)

R_0 = $\sqrt{R^2 + 7.3^2}$ (2.3)

R = jarak terdekat dari lokasi ke proyeksi vertikal dari gempa akibat aktivitas pada permukaan tanah (km)

Persamaan (2.2) dimodifikasi oleh Joyner dan Boore pada tahun 1988 dengan menggunakan data yang sama, sehingga diperoleh persamaan (2.4) (Douglas, 2011):

$$\log(PGA) = 0.49 + 0.23(M_W - 6) - \log R - 0.0027 \cdot R_0 \quad (2.4)$$

Keterangan:

PGA = percepatan tanah maksimum (g)

M_W = magnitudo momen

R_0 = $\sqrt{R^2 + 8^2}$ (2.5)

σ = 0.28 (standar deviasi)

R = jarak terdekat dari lokasi ke proyeksi vertikal dari gempa akibat aktivitas pada permukaan tanah (km)

2. Rumusan Fukushima dan Tanaka (1990) (Douglas, 2011)

Fungsi atenuasi yang diperoleh Fukushima dan Tanaka menggunakan data percepatan tanah maksimum horizontal di Jepang dan Amerika. Kriteria seleksi data gempa Jepang: kedalaman fokus ≤ 30 km, $6.0 \leq M_{JMA} \leq 7.9$ dan prediksi $PGA \geq 0.1 \text{ m/s}^2$. Kriteria seleksi data USA: kedalaman *rupture* ≤ 50 km, menggunakan data dari Campbell tahun 1981. Beberapa peneliti dari Indonesia menganjurkan menggunakan persamaan fungsi atenuasi untuk patahan (*fault*) permukaan di Sumatera dan Jawa. Persamaan fungsi atenuasi ini sebagai berikut (Douglas, 2011):

$$\log(PGA) = 1.30 + 0.41 M_S - \log[R + 0.032 \times 10^{0.41 M_S}] - 0.0034 R \quad (2.6)$$

Keterangan:

- PGA = percepatan tanah maksimum (cm/s^2 atau gal)
 σ = 0.21 (standar deviasi)
 M_s = magnitudo gelombang permukaan
 R = jarak terdekat dari lokasi ke sumber gempa (km)

3. Rumusan Crouse (1991) (Douglas, 2011)

Fungsi atenuasi yang diperoleh oleh Crouse menggunakan data dari lokasi yang tanahnya keras (kedalaman tanah < 25 m). Data yang digunakan merupakan data gempa pada zona subduksi yang lebih muda (Jepang, Alaska, Amerika (Meksiko), Chili, Peru, Honshu utara, dan zona subduksi Kuril di Jepang) karena kurangnya data dari Cascadia. Sebagian besar data gempa ($> 70\%$) berasal dari Jepang dan memiliki kedalaman fokus gempa $0 \leq h$ (km) ≤ 238 . Perbandingan nilai PGA untuk gempa bumi Jepang dan Cascadia hampir sama. Persamaan fungsi atenuasi ini sebagai berikut (Douglas, 2011):

$$\ln(PGA) = 6.36 + 1.76 M_W - 2.73 \ln[R + 1.58 e^{0.608 M_W}] - 0.00916 H \quad (2.7)$$

Keterangan:

- PGA = percepatan tanah maksimum (gal)
 σ = 0.773 (standar deviasi)
 M_w = magnitudo momen
 R = jarak terdekat dari lokasi ke sumber gempa (km)
 H = kedalaman fokus gempa (km)

4. Rumusan Young et al. (1997) (Douglas, 2011)

Fungsi atenuasi yang dikembangkan oleh Youngs et al. menggunakan data gempa dengan mekanisme subduksi. Fungsi atenuasi ini menggunakan model yang berbeda untuk percepatan gempa di batuan dan tanah pada tingkat yang sama di dekat sumber. Data gempa bumi yang digunakan berada pada kedalaman fokus gempa $10 \leq h$ (km) ≤ 229 . Persamaan fungsi atenuasi ini sebagai berikut (Douglas, 2011):

Untuk batuan (*rock*)

$$\ln(PGA) = 0.2418 + 1.414 M_W - 2.552 \ln[r_{rup} + 1.7818 e^{0.5541 M_W}] + 0.00607 H + 0.3846 Z_t \quad (2.8)$$

Untuk tanah (*soil*)

$$\ln(PGA) = -0.6687 + 1.438 M_W - 2.329 \ln[r_{rup} + 1.097 e^{0.617M_W}] + 0.00648 H + 0.3643 Z_t \quad (2.9)$$

Keterangan:

PGA = percepatan tanah maksimum (g)

r_{rup} = jarak terdekat ke *rupture* (km), r_{rup} diganti menjadi jarak hiposenter untuk $M_W < 6.5$

H = kedalaman (km)

Z_t = tipe sumber gempa (0 untuk *interface*, dan 1 untuk *interslab*)

σ = standar deviasi, sebesar $1.45 - 0.1 M_W$

2.15.2 Fungsi Atenuasi Intensitas

Fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011) merupakan fungsi atenuasi yang dikembangkan untuk Pulau Sumatera dan sekitarnya. Fungsi tersebut diperoleh berdasarkan studi hazard seismik dengan menggunakan data katalog gempa bumi, data sesar, data subduksi, data intensitas seismik, dan data pga dari rekaman akselerograf BMKG. Hasil studi hubungan empiris antara nilai percepatan tanah maksimum (PGA) rata - rata dan data intensitas seismik (MMI) observasi diperoleh fungsi atenuasi intensitas. Persamaannya sebagai berikut (Santoso dkk., 2011):

$$MMI = 0,008 PGA (gal) + 3,159 \quad (2.10)$$

2.16 Root Mean Square Error (RMSE)

RMSE (*Root Mean Square Error*) merupakan rumus statistik yang umumnya digunakan untuk menentukan besar penyimpangan antara hasil perhitungan dengan hasil observasi. Semakin kecil nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) maka hasil perhitungannya mendekati kebenaran relatif. Adapun rumus RMSE adalah sebagai berikut (Setyono, 2011):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i cal - t_i obs)^2} \quad (2.11)$$

Keterangan:

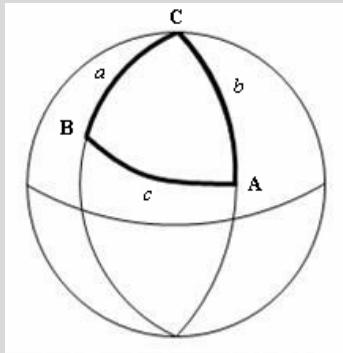
n = jumlah data

$t_{i,cal}$ = nilai data hasil perhitungan

$t_{i,obs}$ = nilai data hasil observasi (data aktual)

2.17 Penentuan Episenter

Ilmu ukur segitiga bola atau trigonometri bola (*spherical trigonometri*) adalah ilmu ukur sudut bidang datar yang diaplikasikan pada permukaan berbentuk bola, salah satunya bumi. Untuk menentukan jarak antara dua titik pada permukaan bumi dapat dilakukan dengan menganggap bahwa bumi berbentuk bulat.



Gambar 2.19 Segitiga bola ABC menghubungkan titik A (episenter gempa), titik B (lokasi tinjauan), dan titik C (kutub utara) (Lay dan Wallace, 1995)

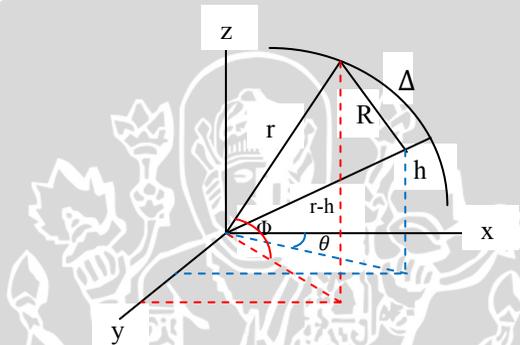
Gambar 2.19 menunjukkan bahwa untuk menghitung jarak episenter gempa diperlukan 3 variabel, yaitu titik A sebagai episenter gempa (*longitude* dan *latitude*), titik B sebagai titik tinjauan, dan titik C sebagai kutub utara. Titik A memiliki koordinat bujur B_a dan lintang L_a . Titik B memiliki koordinat bujur B_b dan lintang L_b . Titik C memiliki lintang 90 derajat. Busur a adalah panjang busur yang menghubungkan titik B dan C. Busur b adalah panjang busur yang menghubungkan titik A dan C. Busur c adalah panjang busur yang menghubungkan titik A dan B atau jarak episenter gempa (Δ). Sudut C adalah selisih antara bujur B_a dan bujur B_b ($C = B_a - B_b$). Rumus segitiga bola untuk menentukan jarak episenter gempa adalah sebagai berikut (Lay dan Wallace, 1995):

$$\Delta = c = \cos^{-1}(\cos(a) \cos(b) + \sin(a) \sin(b) \cos(C)) \quad (2.12)$$

$$b = 90 - La \text{ dan } a = 90 - Lb \quad (2.13)$$

2.18 Penentuan Hiposenter

Hiposenter merupakan representasi kejadian gempa bumi yang berada di dalam bumi. Untuk menentukan jarak hiposenter terhadap lokasi pengamatan dapat dihitung melalui hubungan geometri antara episenter, hiposenter, dan lokasi pengamatan. Hubungan geometri tersebut ditunjukkan pada gambar 2.20 (Bambang (1989) dalam Haris, 2012).



Gambar 2.20 Potongan bumi yang diasumsikan sebagai bola

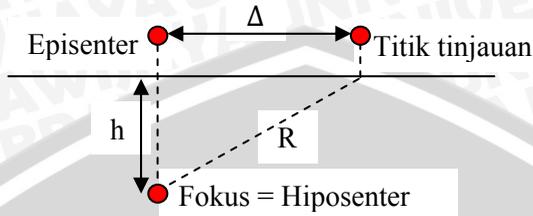
Keterangan:

- h = kedalaman sumber gempa (km)
- r = jari-jari bumi ± 6370 km
- R = jarak fokus gempa dengan lokasi yang ditinjau (km)
- Δ = jarak episenter gempa (km)
- θ = derajat bujur
- Φ = derajat lintang

Sehingga diperoleh,

$$X_s = r \cos \Phi \cos \theta; Y_s = r \cos \Phi \sin \theta; Z_s = r \sin \Phi \quad (2.14)$$

$$X_h = (r - h) \cos \Phi_h \cos \theta_h; Y_h = (r - h) \cos \Phi_h \sin \theta_h; Z_h = (r - h) \sin \Phi_h \quad (2.15)$$



Gambar 2.21 Garis hubungan hipocenter, episenter, dan titik pengamatan

Gambar 2.21 menunjukkan hubungan antara R (jarak hipocenter ke titik pengamatan (km)), h (kedalaman sumber gempa (km)), dan Δ (jarak episenter ke titik pengamatan (km)). Jika persamaan (2.14) dihubungkan dengan persamaan (2.15), maka diperoleh persamaan jarak hipocenter (R) sebagai berikut (Bambang (1989) dalam Haris, 2012):

$$R = \sqrt{(X_s - X_h)^2 + (Y_s - Y_h)^2 + (Z_s - Z_h)^2} \quad (2.16)$$

Keterangan:

- R = jarak hipocenter
- X_h, Y_h, Z_h = koordinat pusat gempa
- X_s, Y_s, Z_s = koordinat titik tinjau

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tentang Analisis Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Gempa pada Gunung Arjuno-Welirang – Lumpur Sidoarjo dilakukan pada bulan 15 Januari 2013 sampai 17 Maret 2013. Penelitian ini dilakukan di Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Kelas II Tretes, Jln. Sedap Malam No. 09 Prigen Kabupaten Pasuruan, Jawa Timur dengan ketinggian 832 dpl, koordinat geografi 07°42' 14.40" LS - 112°38' 06.00" BT, dan kode stasiun TRT dengan batuan dasar *volcanics/older quaternary*.

3.2 Alat dan Data Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam menentukan percepatan tanah dan intensitas gempa bumi daerah penelitian, antara lain:

1. *Accelerometer*
2. Komputer/laptop dengan spesifikasi: Asus A43E, Intel dual core B950 2,1GHz, RAM 2 GB/HDD 320 GB, *Windows 7*
3. *Software* yang digunakan: *Arcview GIS 3.3*, *Dimas*, *Matlab*, *Surfer 10*, dan *Microsoft Excell 2007*.

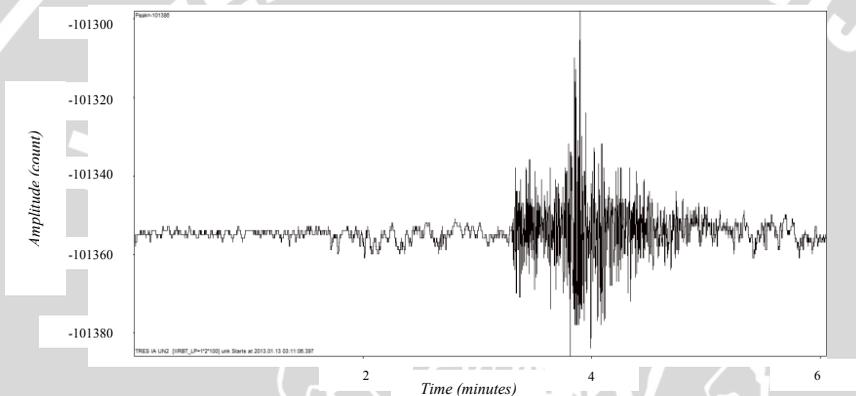
Adapun alat yang digunakan dalam menentukan hiposenter gempa bumi lokal adalah TDS (*Tide Digital Seismograph*) Stasioner 5.0. TDS Stasioner 5.0 terdiri atas:

1. Sensor *Broadband* 3 komponen
2. Digitizer
3. *Software* pengolah sinyal (*Monost*, *Data pro*, dan *Netrec*)
4. Pc/laptop pengolah sinyal
5. Perangkat kabel
6. Panel surya
7. Inverter.

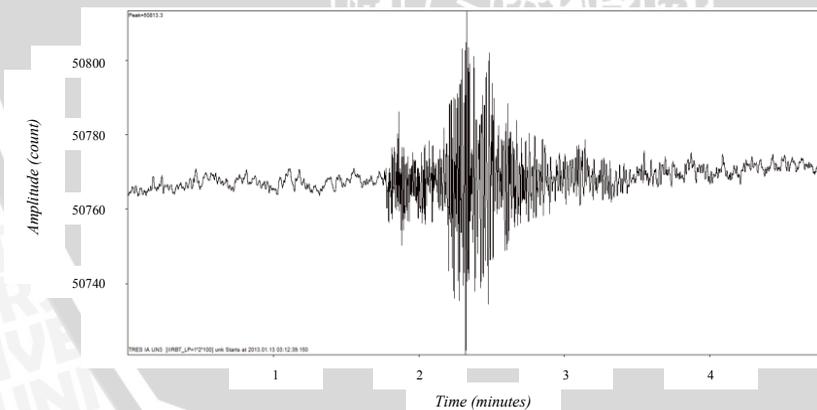
3.2.2 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam perhitungan percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa daerah penelitian berupa data primer (data *accelerograph*) dan data sekunder (data GFZ Postdam dan data IRIS). Data primer merupakan data percepatan tanah akibat 7 peristiwa gempa bumi di Jawa Timur yang terekam di

accelerograph BMKG Kelas II Tretes. Nilai PGA dari data primer dibandingkan dengan nilai PGA dari data GFZ Postdam (data sekunder) yang dihitung menggunakan rumusan empiris. Data kejadian gempa bumi dari GFZ Postdam dapat dilihat pada tabel 3.1, sedangkan *waveform accelerogram* kejadian gempa tersebut yang telah dilakukan pemfilteran dengan *software* dimas dapat dilihat pada lampiran 1. Salah satu *waveform accelerogram* tersebut seperti pada gambar 3.1. Hasil perbandingan nilai PGA dari data aktual dan data GFZ Postdam digunakan untuk menentukan persamaan atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian.



(a)



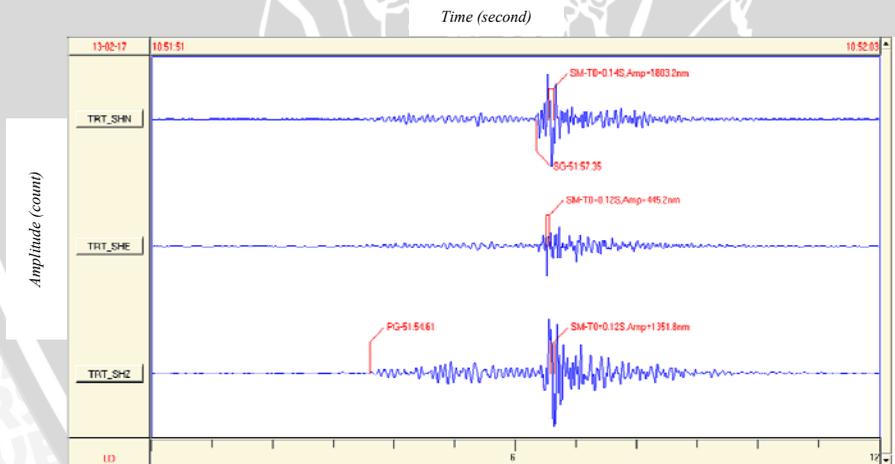
(b)

Gambar 3.1 Sinyal gempa bumi tanggal 13 Januari 2013 pukul 03:13:58.0 UTC (a) arah N-S, (b) arah E-W

Data sekunder yang diperoleh dari IRIS merupakan data historis gempa bumi di Jawa Timur, Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY), dan sekitar Jawa Tengah dalam periode tahun 1952-2012. Data tersebut berupa parameter gempa bumi yang terdiri atas letak episenter gempa (derajat bujur/*longitude* dan lintang/*latitude*), kekuatan gempa bumi (*magnitude*), dan kedalaman sumber gempa (*depth*) dalam kilometer (km). Data historis gempa bumi yang diperoleh dari IRIS dapat dilihat pada lampiran 2.

Tabel 3.1 Daftar gempa bumi yang tercatat di GFZ Postdam

No	Tanggal	Origin Time (UTC)	Bujur	Lintang	Mb	Depth
1	2/1/2013	02:57:35.0	113.88	-10.97	4.5	10 km
2	13/01/2013	03:13:58.0	112.95	-9.04	4.5	69 km
3	14/01/2013	07:36:10.0	112.8	-9.83	4.7	56 km
4	16/01/2013	22:41:38.0	112.47	-11.52	4.9	10 km
5	26/01/2013	14:13:23.5	113.15	-9.34	4.5	10 km
6	2/2/2013	11:54:05.5	112.88	-9.75	4.7	42 km
7	26/2/2013	14:06:03.7	107.18	-7.17	5.2	138 km

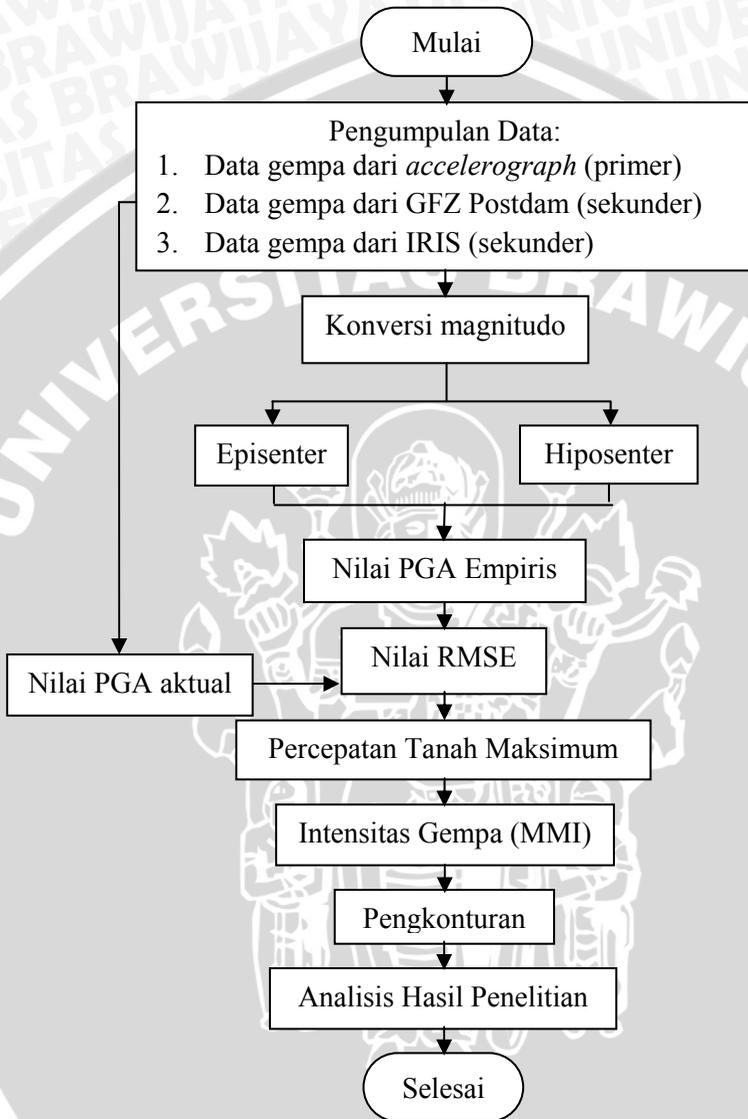


Gambar 3.2 Sinyal gempa bumi tanggal 17 Februari 2013 pukul 10:51:50.6 WIB

Data yang digunakan dalam menentukan hiposenter gempa bumi lokal merupakan data sekunder berupa sinyal gempa bumi yang terekam oleh sensor TDS Stasioner 5.0. Sinyal gempa bumi yang diperoleh dari TDS Stasioner 5.0 dapat dilihat pada lampiran 3. Salah satu *waveform* gempa bumi yang terekam oleh sensor TDS Stasioner 5.0 seperti pada gambar 3.2. Data tersebut diolah menggunakan *software* penganalisis yang terdapat pada TDS Stasioner 5.0 sehingga diperoleh parameter-parameter gempa bumi.

3.3 Langkah Penelitian

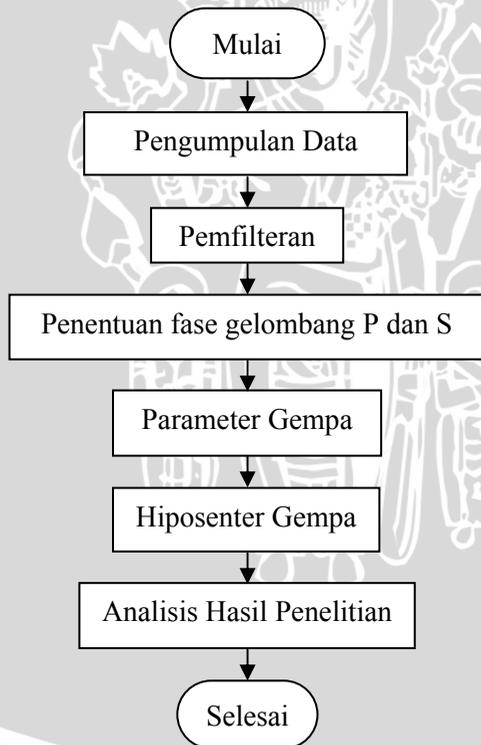
Gambar 3.3 menjelaskan tentang alur penelitian dalam penentuan nilai PGA maksimum dan intensitas gempa daerah penelitian. Penelitian ini menggunakan data primer (data *accelerograph*) dan data sekunder (data IRIS dan GFZ Postdam). Data primer yang berupa data PGA aktual ditentukan berdasarkan nilai amplitudo maksimum *waveform accelerogram* yang dikalikan dengan koefisien faktor dari *accelerometer* dan dikonversi menjadi satuan gal. Adapun data sekunder berupa data parameter gempa dan dilakukan konversi skala magnitudo sebelum melalui tahap pengolahan data. Selanjutnya data tersebut diolah dengan menggunakan fungsi atenuasi untuk mendapatkan data PGA empiris pada setiap kejadian gempa. Pada tahap selanjutnya, dilakukan perbandingan antara data PGA aktual dan data PGA empiris dengan menghitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE). Fungsi atenuasi yang mempunyai nilai RMSE terkecil dianggap sebagai fungsi atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian, sehingga akan digunakan untuk menghitung nilai PGA di daerah tersebut berdasarkan data historis gempa tahun 1952-2012. Setelah itu, nilai PGA yang diperoleh tersebut disortir untuk mendapatkan nilai PGA maksimum pada setiap titik grid daerah penelitian. Berdasarkan data PGA maksimum tersebut, maka dilakukan perhitungan empiris intensitas (MMI) menggunakan fungsi atenuasi intensitas. Pada tahap selanjutnya, dilakukan pengkonturan PGA maksimum dan intensitas gempa (MMI) di daerah penelitian menggunakan *software* surfer 10.



Gambar 3.3 Diagram alur dalam menentukan PGA dan intensitas gempa

Gambar 3.4 menjelaskan tentang alur penelitian dalam penentuan parameter gempa bumi lokal yang terdiri atas beberapa tahap. Pada tahap pertama, mengumpulkan data sinyal gempa di

Gunung Arjuno-Welirang dalam periode tahun 2012-2013 yang terekam oleh sensor TDS Stasioner 5.0. Pada tahap kedua, dilakukan pengolahan data sinyal gempa yang terdiri atas pemfilteran sinyal gempa dan penentuan fase gelombang P dan S. Pada tahap ketiga, dilakukan analisis hasil pengolahan sinyal gempa secara otomatis menggunakan *software* data pro (TDS Stasioner 5.0), sehingga diperoleh parameter-parameter gempa bumi. Parameter-parameter gempa tersebut terdiri atas waktu terjadinya gempa (*origin time*), episenter gempa (*longitude* dan *latitude*), kedalaman fokus gempa (*depth*), kekuatan gempa (*magnitude*), *distance* (jarak antara lokasi gempa ke stasiun penerima), dan *azimuth*. Data parameter gempa tersebut digunakan untuk menentukan hiposenter gempa yang akan diplotkan dalam bentuk irisan penampang Barat-Timur dan irisan penampang Utara-Selatan.



Gambar 3.4 Diagram alur dalam menentukan hiposenter gempa bumi lokal

3.4 Pengolahan Data Percepatan Tanah

3.4.1 Pengumpulan Data

Penentuan percepatan tanah maksimum di suatu daerah memerlukan data yang mencatat kejadian gempa yang terjadi di sekitar daerah tersebut dalam periode pengamatan tertentu. Data kejadian gempa bumi yang diperlukan dalam penelitian ini diperoleh dari katalog gempa lembaga-lembaga berikut:

1. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Kelas II Tretes, Pasuruan, Jawa Timur.
2. IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) yang merupakan kompilasi dari berbagai katalog, yaitu *National Earthquake Information Center – Preliminary Determination of Epicenters* (NEIC – PDE), dan *International Seismological Center* (ISC).
3. GFZ Potsdam (*GeoForschungsZentrum Potsdam*)

Data aktual percepatan tanah diperoleh dari hasil pembacaan *accelerogram* gempa bumi yang tercatat pada *accelerograph* TSA – 100S (METROZET – USA) di BMKG kelas II Tretes. Spesifikasi *accelerograph* dapat dilihat pada lampiran 4. Data yang tercatat pada alat tersebut setelah dilakukan pemfilteran sinyal dengan *software* Dimas masih dalam satuan *counts*. Untuk mengubah satuan *counts* menjadi gal, maka dikalikan dengan koefisien faktor (dalam satuan g) dan dikonversikan menjadi satuan gal. Perhitungan dilakukan dengan bantuan *software* Matlab yang dapat dilihat pada lampiran 5. Berikut ini adalah koefisien faktor dari alat yang digunakan:

$$\text{Koefisien faktor} = \left((W1 - \text{mean}(W1)) \times 4,768 \cdot 10^{-7} \right) \quad (3.1)$$

Keterangan:

Koefisien faktor= satuan g

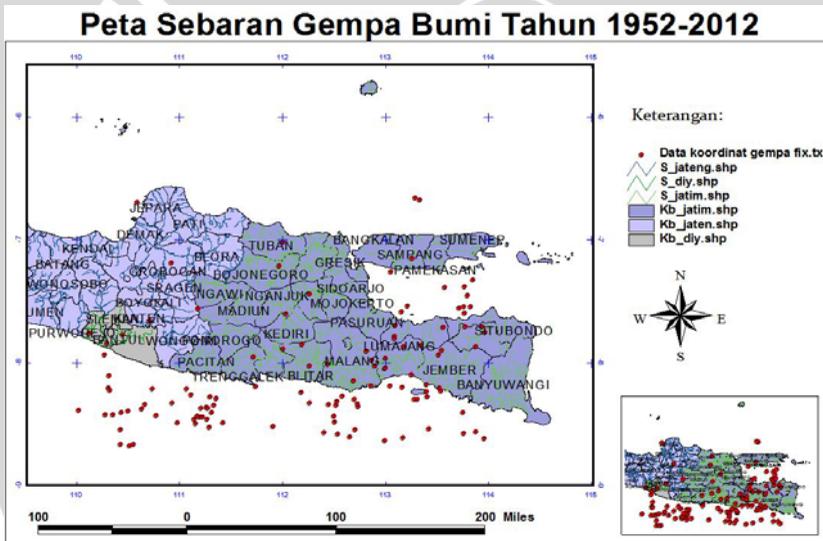
$W1$ = data dalam satuan *counts*

1 g = 980 gal = 980 cm^2/s

Data sekunder yang digunakan merupakan data gempa hasil pencatatan GFZ Postdam dan IRIS. Data parameter gempa GFZ Postdam yang ada pada tabel 3.1 digunakan untuk perhitungan nilai PGA menggunakan rumusan empiris yang akan dibandingkan data PGA empirisnya dengan data PGA aktual dari *accelerograph*. Adapun data parameter gempa IRIS merupakan data historis gempa

bumi di Jawa Timur, DIY (Daerah Istimewa Yogyakarta), dan sekitar Jawa Tengah dalam periode 60 tahun terakhir. Jumlah kejadian gempa dicatat oleh IRIS tersebut terdapat 120 data gempa. Untuk peta seismisitas berdasarkan data IRIS dapat dilihat pada gambar 3.5. Kriteria data gempa IRIS yang digunakan dalam penelitian, antara lain:

1. Kejadian gempa bumi berlangsung pada tanggal 1 Januari 1952 sampai 31 Desember 2012.
2. Sebaran kejadian gempa bumi berada pada koordinat $6.00^{\circ}\text{LS} - 9.00^{\circ}\text{LS}$ dan $110.00^{\circ}\text{BT} - 114.00^{\circ}\text{BT}$.
3. Memiliki kekuatan gempa $5 < M < 9$ dan kedalaman fokus gempa $0 < \text{depth (km)} < 300$.



Gambar 3.5 Peta seismisitas tahun 1952-2012 berdasarkan data IRIS

3.4.2 Konversi Magnitudo Gempa

Pada umumnya data gempa bumi dari beberapa sumber menggunakan skala magnitudo yang berbeda-beda. Skala magnitudo tersebut antara lain: *surface wave magnitude* (M_S), *Richter local magnitude* (M_L), *body wave magnitude* (m_b), dan *moment magnitude* (M_w). Skala magnitudo tersebut dikonversi terlebih dahulu menjadi skala magnitudo yang sesuai dengan rumusan empiris atenuasi, yaitu menjadi M_w dan M_S . Untuk fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka (1990) dalam Douglas (2011) menggunakan *surface wave magnitude*

(M_S). Jika sumber gempa menggunakan *surface wave magnitude* (M_S), maka dapat langsung dilakukan perhitungan percepatan tanah tersebut. Jika sumber gempa menggunakan skala magnitudo yang lainnya, maka dilakukan konversi menjadi M_S yang dikembangkan oleh Ambrasseys (1990) dalam Sukanta dkk. (2010). Konversi tersebut digunakan untuk menyeragamkan magnitudo gempa-gempa di Eropa yang memiliki rentang $3 < M < 8$. Konversi magnitudo tersebut sebagai berikut (Sukanta dkk., 2010):

$$0,86 m_b - 0,49 M_S = 1,94 \text{ atau } M_S = 1,755 m_b - 3,959 \quad (3.2)$$

Untuk fungsi atenuasi (Joyner dan Boore (1988), Crouse (1991), dan Youngs et al. (1997)) dalam Douglas (2011) dilakukan konversi magnitudo menjadi moment magnitude (M_w). Adapun korelasi konversi magnitudonya dapat dilihat pada tabel 2.4.

3.4.3 Perhitungan Episenter Gempa

Bumi dianggap menyerupai bola, sehingga jarak antara dua titik di permukaan bumi membentuk suatu busur. Untuk menentukan jarak episenter gempa terhadap setiap titik pada daerah penelitian maupun stasiun BMKG kelas II Tretes, maka digunakan rumus segitiga bola atau dikenal dengan nama trigonometri bola (*spherical trigonometri*). Untuk menentukan jarak episenter digunakan persamaan 2.12.

3.4.4 Perhitungan Hiposenter Gempa

Kedalaman sumber gempa (hiposenter) diperlukan dalam perhitungan percepatan tanah. Maka dari itu, jarak hiposenter terhadap setiap titik pada daerah penelitian dihitung dengan melalui hubungan geometri antara episenter, hiposenter, dan lokasi yang ditinjau. Untuk menghitung jarak hiposenter digunakan persamaan 2.16.

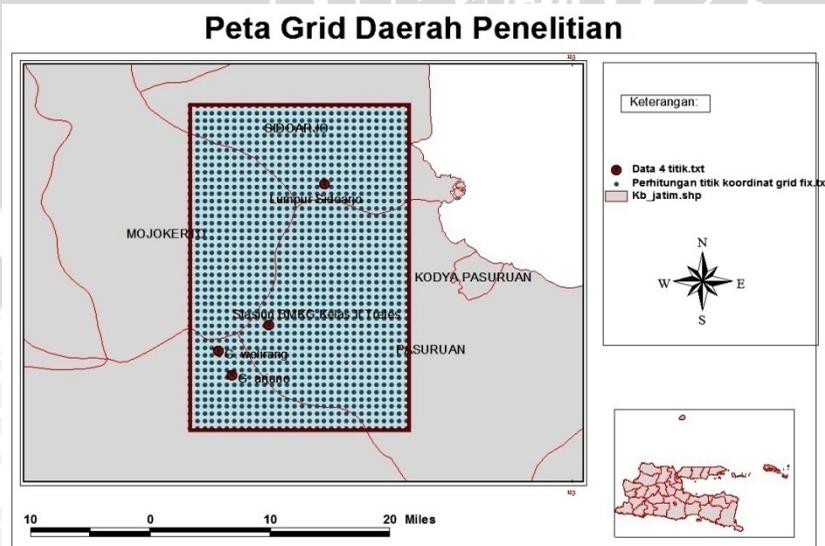
3.4.5 Pemilihan Fungsi Atenuasi

Fungsi atenuasi merupakan suatu fungsi yang menghubungkan antara parameter gempa di lokasi sumber gempa (magnitudo, kedalaman, dan jarak episenter) dengan parameter pergerakan tanah di lokasi yang ditinjau. Fungsi atenuasi cenderung spesifik untuk wilayah dan patahan yang berbeda. Untuk menghitung

percepatan tanah di Indonesia masih menggunakan fungsi atenuasi yang diturunkan dari negara lain, karena keterbatasan data historis gempa di Indonesia.

Fungsi atenuasi yang digunakan dalam penelitian ini, antara lain: fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988 (lihat persamaan 2.4), Fukushima dan Tanaka tahun 1990 (lihat persamaan 2.6), Crouse tahun 1991 (lihat persamaan 2.7), dan Youngs et al. tahun 1997 (persamaan 2.9) (Douglas, 2011). Untuk menentukan fungsi atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian, dilakukan perbandingan antara nilai PGA dari data aktual (*accelerograph*) dengan data empiris (fungsi atenuasi yang digunakan). Data tersebut berupa 7 kejadian gempa bumi yang nilai PGA-nya dihitung dengan titik acuan stasiun BMKG kelas II Tretes. Setelah itu, menghitung nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari data PGA empiris terhadap data PGA aktual. Fungsi atenuasi yang digunakan untuk menghitung nilai PGA dengan nilai RMSE terkecil dianggap sebagai fungsi atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian. Oleh karena itu, fungsi atenuasi tersebut digunakan untuk menghitung nilai percepatan tanah di daerah penelitian.

3.4.6 Perhitungan Percepatan Tanah Maksimum



Gambar 3.6 Peta daerah penelitian

Setelah menentukan fungsi atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian, dilakukan perhitungan nilai PGA akibat 120 kejadian gempa bumi (data sekunder IRIS) terhadap masing-masing titik *grid* daerah penelitian. Perhitungan nilai PGA ini dilakukan dengan menggunakan *Microsoft Excel 2007*. *Grid* daerah penelitian mempunyai interval 1 km (0.009009°) dengan batas koordinat $7.435^\circ\text{LS} - 7.831^\circ\text{LS}$ dan $112.54^\circ\text{BT} - 112.8^\circ\text{BT}$, sehingga diperoleh 1350 titik *grid*. Setiap titik memiliki 120 data PGA, kemudian disortir untuk memperoleh nilai PGA maksimum pada setiap titik di daerah penelitian. Nilai PGA maksimum pada masing-masing titik dikonturkan dengan menggunakan *software* surfer 10. Peta daerah penelitian dapat dilihat pada gambar 3.6.

3.4.7 Perhitungan Intensitas Gempa (MMI)

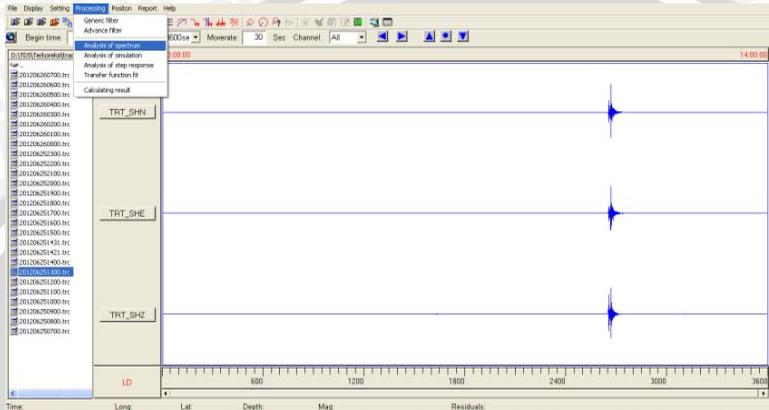
Intensitas gempa dihitung berdasarkan nilai PGA maksimum di daerah penelitian yang menggunakan fungsi atenuasi dengan nilai RMSE terkecil. Intensitas gempa (MMI) dihitung dengan menggunakan fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011). Fungsi atenuasi intensitas yang digunakan dapat dilihat pada persamaan 2.10. Tahap terakhir adalah pengkonturan hasil perhitungan intensitas gempa (MMI) secara empiris dengan menggunakan *software* surfer 10.

3.5 Pengolahan Data dengan TDS Stasioner 5.0

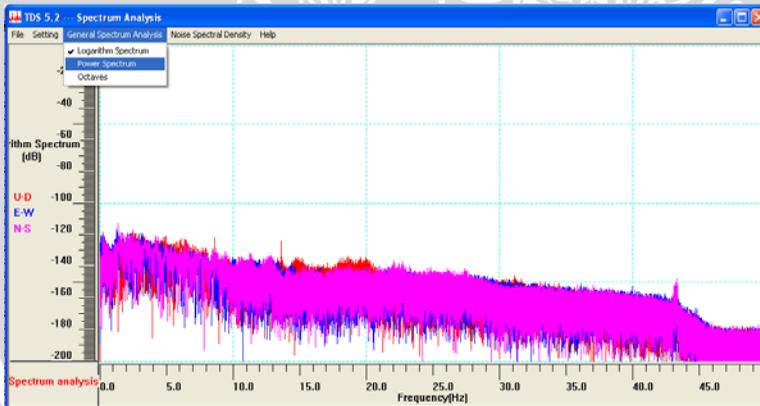
Data sinyal gempa bumi yang diterima oleh sensor TDS Stasioner 5.0 dicatat dalam PC/komputer yang tersimpan dalam data pro. Spesifikasi TDS Stasioner 5.0 dapat dilihat pada lampiran 6. Untuk mencari data *event* gempa dilakukan dengan membuka file data pro yang tersimpan dengan nama sesuai waktu terjadinya gempa. Adapun langkah – langkah pengolahan data dengan TDS Stasioner 5.0 sebagai berikut:

1. Klik *shortcut* data pro lalu klik file > *open event / open trace* dan pilih folder sesuai tanggal yang akan dianalisis.
2. Dilakukan analisis *content frekuensi* pada sinyal untuk menentukan *range* frekuensi yang akan diloloskan dalam pemfilteran.
3. Analisis *content* frekuensi pada sinyal gempa dilakukan dengan cara klik *processing > analysis of spectrum > ok* (gambar 3.7).

- Setelah itu, keluar *box spectrum* dan klik *general spectrum analysis > power spectrum* dan lihat rentang frekuensi sinyal gempa yang ada (gambar 3.8).



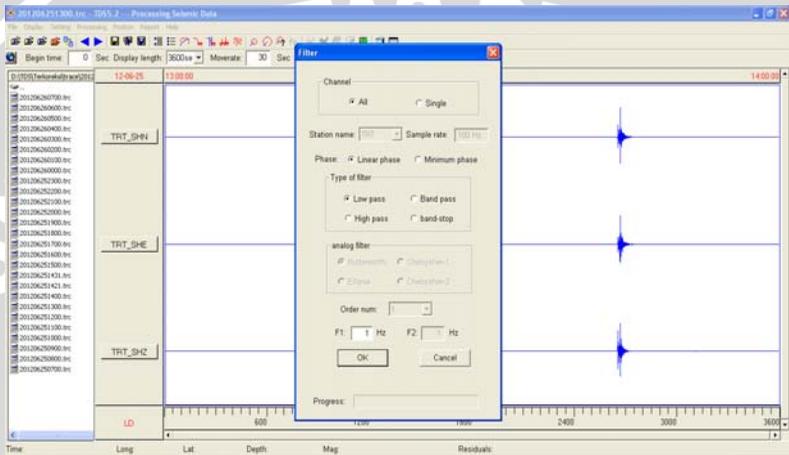
Gambar 3.7 Cara untuk menganalisis *content* frekuensi sinyal gempa



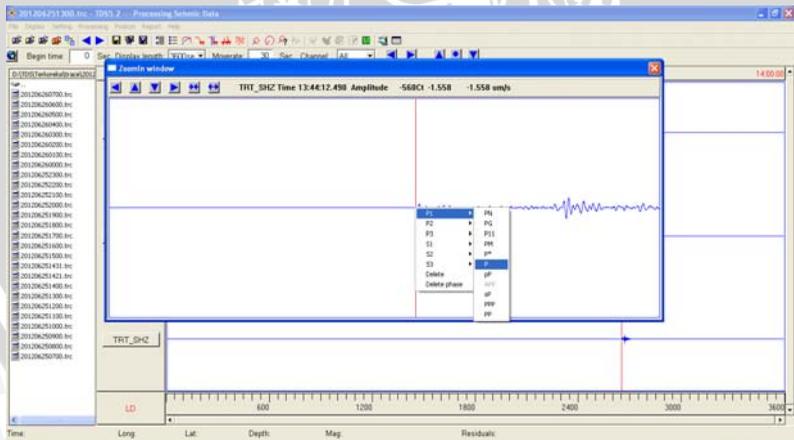
Gambar 3.8 *Box spectrum* untuk melihat frekuensi sinyal gempa

- Dilakukan filter pada sinyal dengan klik *processing > generic filter > low filter* dan isi frekuensi sesuai dengan analisis spektrum > ok (gambar 3.9).
- Penentuan fase gelombang P atau S dengan cara *double* klik pada sinyal > klik kanan > pilih gelombang P/S sesuai dengan fase gelombangnya (gambar 3.10).

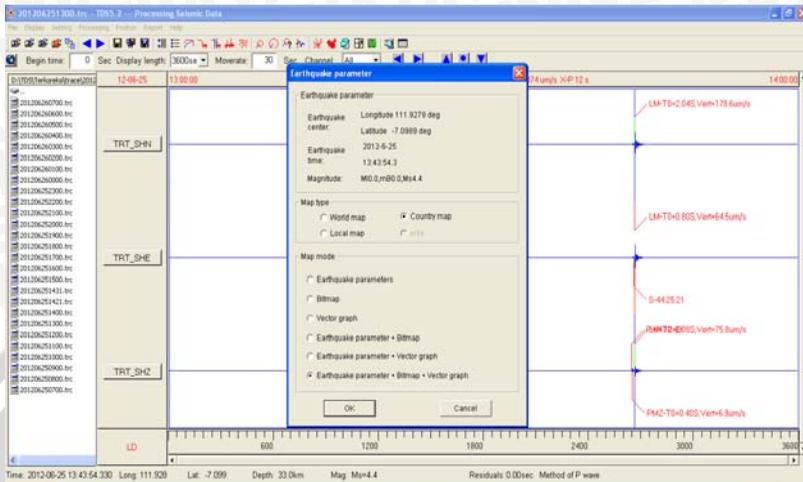
7. Untuk mengetahui parameter gempa dan posisi gempa, dilakukan dengan cara memilih *position bitmap & vectormap* lalu pilih *Earthquake + bitmap + vector graph* > ok (gambar 3.11).
8. Hasil analisis sinyal gempa berupa parameter gempa yang terdiri atas *earthquake time, earthquake center, latitude, longitude, depth, distance, dan azimuth*. Tampilan parameter gempa dapat dilihat pada gambar 3.12.



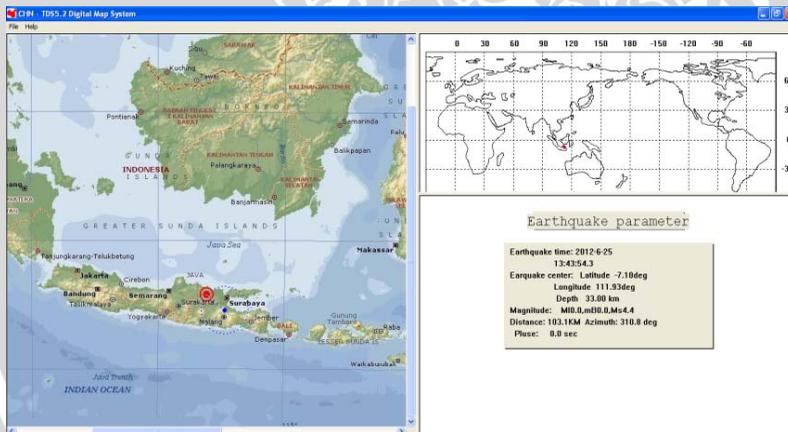
Gambar 3.9 Proses pemfilteran dengan menentukan frekuensi yang akan diloloskan



Gambar 3.10 Penentuan fase gelombang P/S pada *software data pro*



Gambar 3.11 Cara untuk mengetahui parameter gempa dan posisi gempa



Gambar 3.12 Hasil analisis data dengan TDS Stasioner 5.0

Parameter-parameter gempa bumi lokal dari hasil analisis sinyal gempa, selanjutnya dipetakan dengan menggunakan *software Arcview GIS 3.3* dan diplotkan dalam bentuk irisan penampang melintang Barat-Timur dan Utara-Selatan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui posisi gempa bumi di daerah penelitian. Selanjutnya, dari parameter gempa tersebut dilakukan perhitungan percepatan tanah dan intensitas gempanya.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

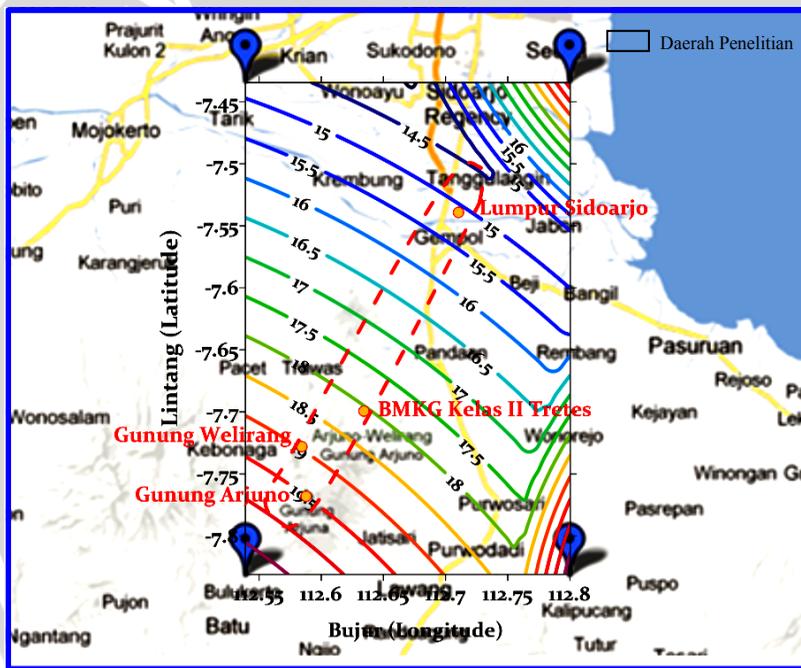
4.1 Hasil Perhitungan

Percepatan tanah merupakan suatu parameter yang menggambarkan perubahan kecepatan tanah atau pergerakan tanah (*ground motions*) akibat adanya getaran seismik. Adanya percepatan tanah ini akan mempengaruhi beberapa tipe struktur bangunan yang berdiri di atasnya. Adapun percepatan tanah maksimum merupakan suatu nilai percepatan getaran tanah terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat akibat gempa bumi. Apabila struktur bangunan tidak mampu menahannya, maka akan terjadi kerusakan pada bangunan-bangunan tersebut. Akibat runtuhnya bangunan yang rusak dapat menimbulkan korban jiwa. Oleh karena itu, salah satu upaya untuk mitigasi bencana gempa bumi diperlukan informasi percepatan tanah maksimum dalam rangka membuat desain bangunan tahan gempa. Nilai percepatan tanah ini dapat diperoleh dengan menggunakan fungsi atenuasi.

Hingga saat ini di Indonesia belum mempunyai data historis gempa yang cukup untuk menurunkan suatu fungsi atenuasi, sehingga untuk mengetahui nilai percepatan tanah di wilayah Indonesia masih menggunakan fungsi atenuasi yang diturunkan dari negara lain. Pada penelitian ini digunakan beberapa fungsi atenuasi, yaitu fungsi atenuasi (Joyner dan Boore (1988), Fukushima dan Tanaka (1990), Crouse (1991), dan Youngs et al. (1997)) dalam Douglas (2011). Untuk mengetahui nilai percepatan tanah maksimum di daerah penelitian terlebih dahulu ditentukan fungsi atenuasi yang sesuai dengan daerah penelitian. Untuk menentukan fungsi atenuasi tersebut dilakukan perhitungan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) dari nilai PGA empiris terhadap nilai PGA aktual. Nilai RMSE ini menggambarkan besarnya simpangan (*deviasi*) nilai percepatan tanah empiris terhadap nilai percepatan tanah aktual. Semakin kecil nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) maka hasil perhitungan empirisnya mendekati nilai percepatan tanah aktual.

Hasil perhitungan nilai RMSE masing-masing fungsi atenuasi menunjukkan nilai yang berbeda. Fungsi atenuasi Youngs et al. (Douglas, 2011) mempunyai nilai RMSE terbesar, yaitu 5.34 gal. Adapun fungsi atenuasi Joyner dan Boore, Fukushima dan Tanaka, dan Crouse (Douglas, 2011) mempunyai nilai RMSE yang berturut-turut 2.71 gal, 0.49 gal, dan 3.04 gal. Keempat fungsi atenuasi

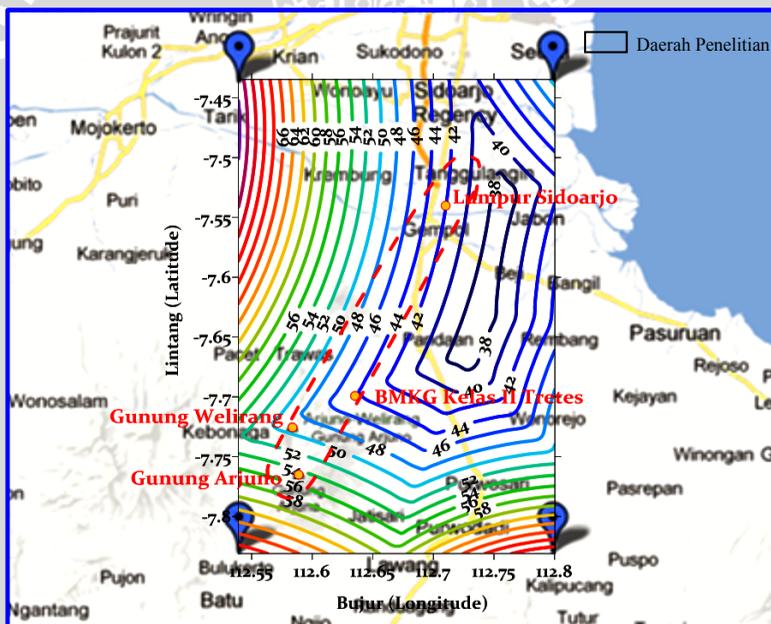
tersebut mempunyai nilai RMSE kurang dari 10 ($RMSE < 10$) sehingga hasil perhitungan PGA empirisnya menunjukkan bahwa fungsi atenuasi tersebut cenderung memberikan nilai perhitungan yang baik atau mendekati nilai PGA aktual. Berdasarkan nilai RMSE tersebut, nilai percepatan tanah yang dihitung menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka (Douglas, 2011) mempunyai nilai RMSE terkecil sehingga fungsi atenuasi ini dianggap sesuai dengan daerah penelitian. Oleh karena itu, fungsi atenuasi tersebut digunakan untuk menghitung nilai percepatan tanah maksimum di daerah penelitian. Untuk hasil perhitungan empiris nilai PGA dan RMSE masing-masing fungsi atenuasi dapat dilihat pada lampiran 7.



Gambar 4.1 Kontur percepatan tanah maksimum daerah penelitian menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990

Gambar 4.1 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur nilai percepatan tanah maksimum menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 (Douglas, 2011). Pada kontur tersebut menunjukkan nilai PGA terendah sebesar 13.95 gal berada pada koordinat $7.44^{\circ}LS$ dan

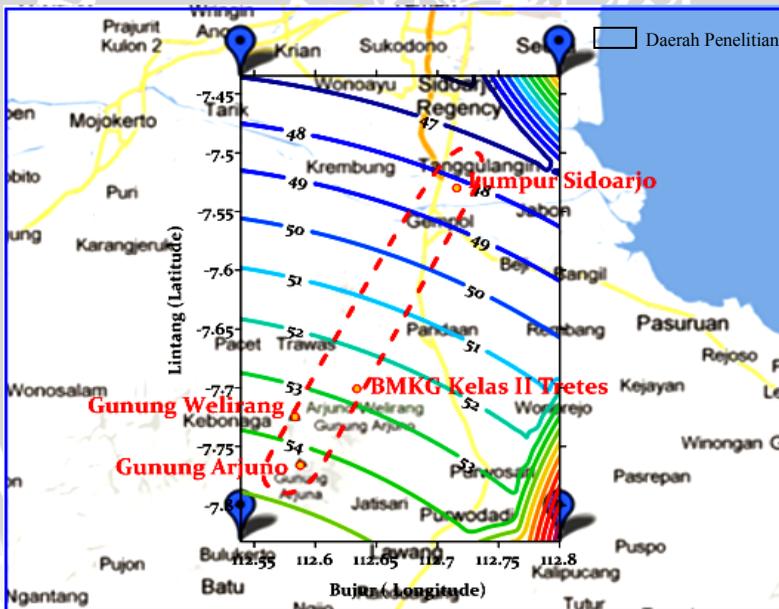
112.67°BT, sedangkan nilai PGA tertinggi sebesar 20.85 gal pada koordinat 7.83°LS dan 112.54°BT. Nilai PGA maksimum di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 15.14 gal. Nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 18.10 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 19.11 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 19.44 gal. Nilai PGA maksimum di lokasi LUSI menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan Gunung Arjuno-Welirang. Hal tersebut terjadi karena di sebelah barat daya Gunung Arjuno-Welirang pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo besar dibandingkan di sebelah utara lokasi LUSI.



Gambar 4.2 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988

Gambar 4.2 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur nilai percepatan tanah maksimum menggunakan fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988 (Douglas, 2011). Pada kontur tersebut menunjukkan nilai PGA

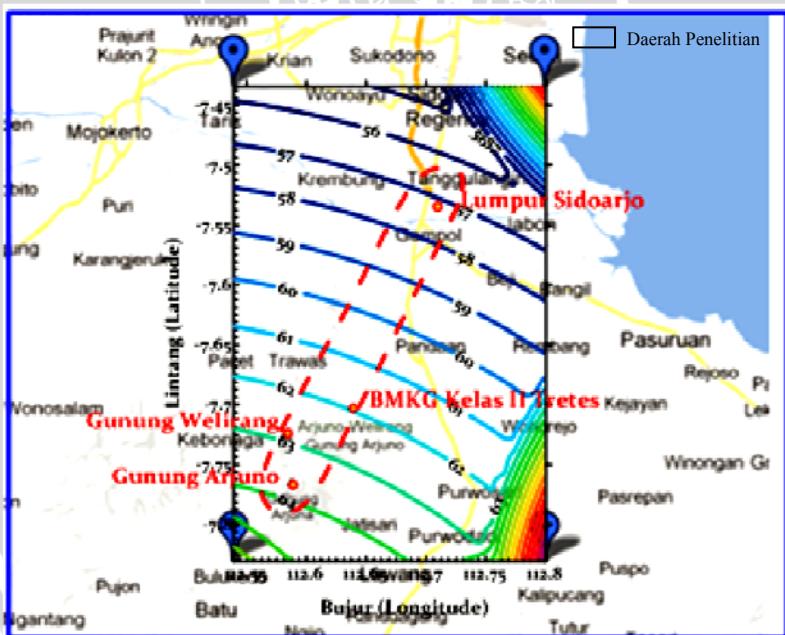
terendah sebesar 36.71 gal berada pada koordinat 7.66°LS dan 112.73°BT, sedangkan nilai PGA tertinggi sebesar 76.35 gal pada koordinat 7.48°LS dan 112.54°BT. Nilai PGA maksimum di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 41.98 gal. Nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 44.54 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 50.46 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 54.79 gal. Nilai PGA maksimum di lokasi LUSI menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan Gunung Arjuno-Welirang. Hal tersebut terjadi karena di sebelah barat daya Gunung Arjuno-Welirang pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo besar dibandingkan di sebelah utara lokasi LUSI.



Gambar 4.3 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Crouse tahun 1991

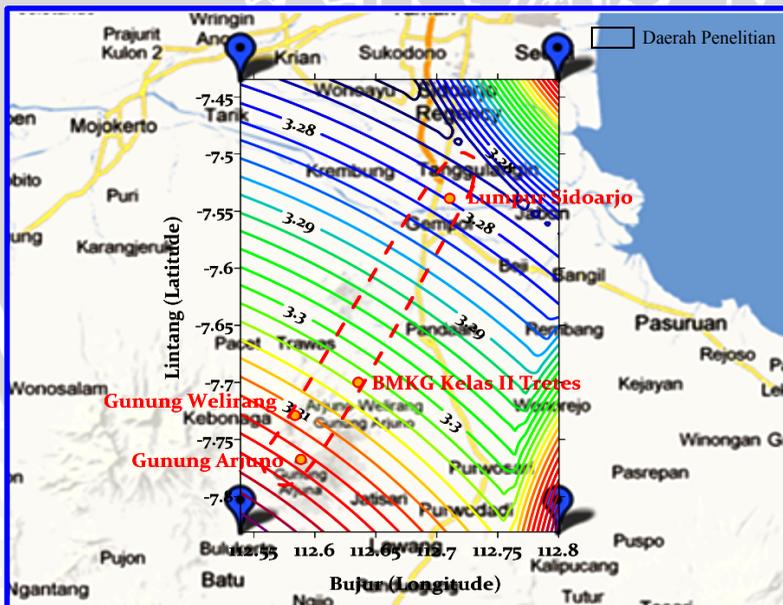
Gambar 4.3 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur nilai percepatan tanah maksimum menggunakan fungsi atenuasi Crouse tahun 1991

(Douglas, 2011). Pada kontur tersebut menunjukkan nilai PGA terendah sebesar 45.78 gal berada pada koordinat 7.44°LS dan 112.73°BT , sedangkan nilai PGA tertinggi sebesar 61.96 gal pada koordinat 7.83°LS dan 112.80°BT . Nilai PGA maksimum di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 48.54 gal. Nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 52.76 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 53.74 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 54.32 gal. Nilai PGA maksimum di lokasi LUSI menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan Gunung Arjuno-Welirang. Hal tersebut terjadi karena di sebelah barat daya Gunung Arjuno-Welirang pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo besar dibandingkan di sebelah utara lokasi LUSI.

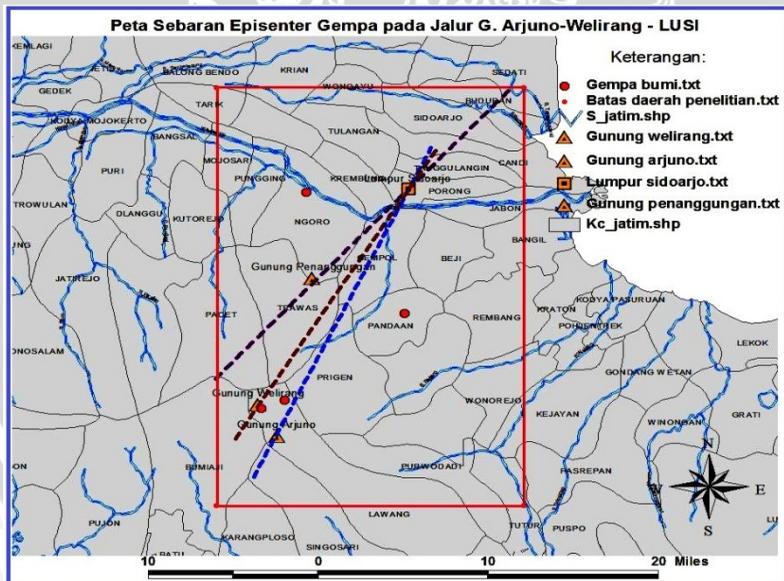


Gambar 4.4 Kontur PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997

Gambar 4.4 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur nilai percepatan tanah maksimum menggunakan fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997 (Douglas, 2011). Pada kontur tersebut menunjukkan nilai PGA terendah sebesar 54.53 gal berada pada koordinat 7.44°LS dan 112.71°BT, sedangkan nilai PGA tertinggi sebesar 75.09 gal pada koordinat 7.83°LS dan 112.80°BT. Nilai PGA maksimum di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 57.38 gal. Nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 61.99 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 63.07 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 63.70 gal. Nilai PGA maksimum di lokasi LUSI menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan Gunung Arjuno-Welirang. Hal tersebut terjadi karena di sebelah barat daya Gunung Arjuno-Welirang pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo besar dibandingkan di sebelah utara lokasi LUSI.

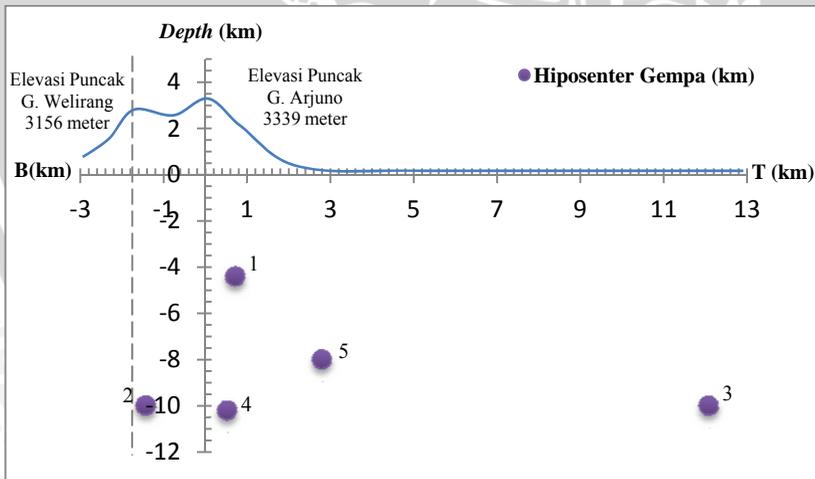


Gambar 4.5 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur intensitas gempa (MMI) dengan menggunakan fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011). Nilai intensitas gempa tersebut diperoleh berdasarkan data PGA maksimum yang menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 (Douglas, 2011). Pada kontur ini menunjukkan intensitas (MMI) terendah sebesar 3.27 berada pada koordinat 7.44°LS dan 112.67°BT , sedangkan nilai intensitas (MMI) tertinggi sebesar 3.33 pada koordinat 7.83°LS dan 112.54°BT . Nilai intensitas (MMI) di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 3.28. Nilai intensitas (MMI) di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 3.30. Nilai intensitas (MMI) di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 3.31. Nilai intensitas (MMI) di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 3.32. Berdasarkan data intensitas gempa tersebut, daerah penelitian memiliki intensitas gempa (MMI) sekitar III-IV. Intensitas gempa di lokasi LUSI menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan intensitas gempa di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan Gunung Arjuno-Welirang.

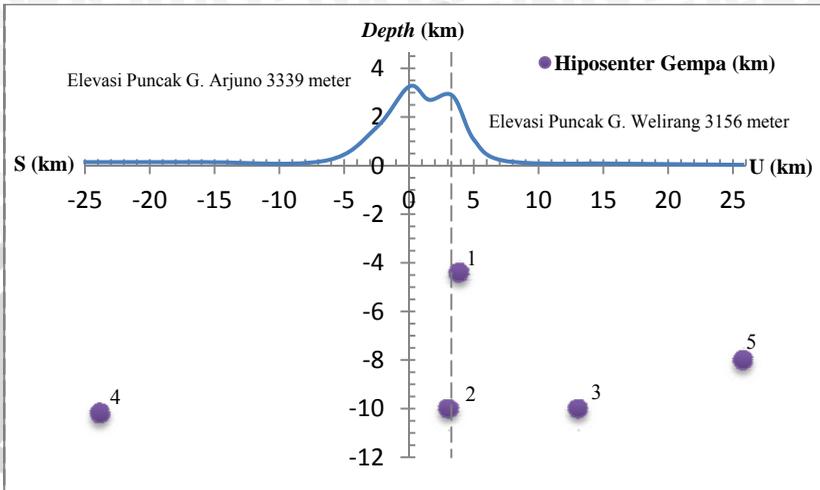


Gambar 4.6 Peta sebaran gempa bumi lokal yang terekam di TDS Stasiun 5.0

Berdasarkan hasil pencatatan TDS Stasioner 5.0 terdapat 5 peristiwa gempa yang terjadi di sekitar daerah penelitian, 4 dari 5 gempa tersebut berlangsung di daerah penelitian dan tidak jauh dari lokasi sesar watakosek yang ditunjukkan oleh garis putus-putus berwarna ungu di sepanjang arah baratdaya-timurlaut (N 50° E) dari sumur eksplorasi BJP-1 Porong (Chaerunnisa, 2010). Adapun 2 peristiwa gempa terjadi di dekat kompleks vulkanik Arjuno-Welirang atau berdekatan dengan jalur Gunung Arjuno-Welirang sampai LUSI (gambar 4.6). Garis putus-putus berwarna coklat menunjukkan jalur/jarak terpendek dari lokasi lumpur Sidoarjo sampai Gunung Welirang, sedangkan garis putus-putus berwarna biru menunjukkan jalur dari lokasi lumpur Sidoarjo sampai Gunung Arjuno. Jika mengacu pada lokasi gempa yang terjadi di daerah penelitian, maka gempa tersebut dapat menimbulkan percepatan tanah dengan nilai terbesar di sekitar lokasi gempa, meskipun kekuatan gempanya $0 < M_s < 3$. Nilai percepatan gempa dan intensitas gempa ini bergantung pada kekuatan gempa (magnitudo) juga jarak hiposenternya. Untuk memudahkan pembacaan, koordinat hiposenter gempa tersebut disajikan dalam bentuk irisan penampang melintang Barat-Timur dan irisan penampang melintang Utara-Selatan dengan titik acuan Gunung Arjuno-Welirang karena lokasinya di dekat sesar watakosek dan memiliki tingkat seismisitas tinggi.



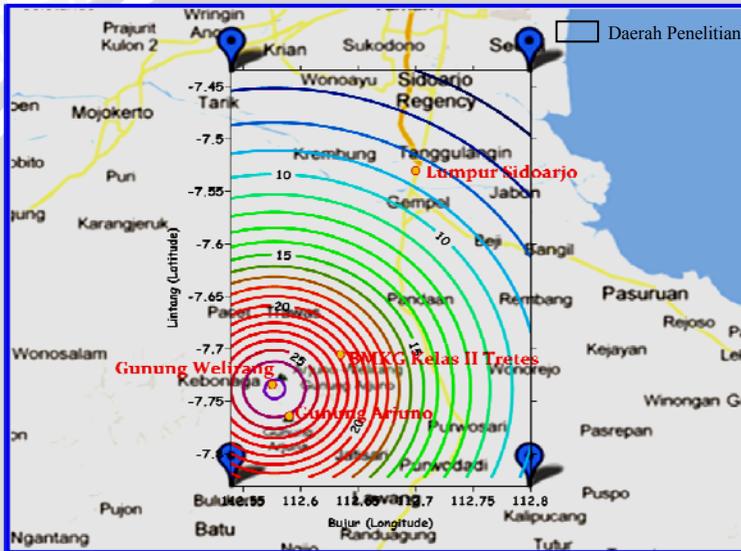
Gambar 4.7 Hiposenter gempa bumi lokal dalam irisan penampang melintang Barat-Timur



Gambar 4.8 Hiposenter gempa bumi lokal dalam irisan penampang melintang Utara-Selatan

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa dalam irisan penampang melintang Barat-Timur terdapat 4 hiposenter gempa yang letaknya dekat dengan Gunung Arjuno-Welirang. Gempa tersebut merupakan peristiwa gempa yang berturut-turut terjadi pada tanggal 05/03/2013 dengan magnitudo 0.9 Ms dan kedalaman 4.4 km, tanggal 08/01/2013 dengan magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km, tanggal 01/01/2013 dengan magnitudo 1.6 Ms dan kedalaman 10.2 km, dan tanggal 17/02/2013 dengan magnitudo 1.0 Ms dan kedalaman 8 km. Adapun gempa yang letaknya jauh berdasarkan irisan penampang melintang tersebut merupakan gempa bumi yang terjadi pada tanggal 30/01/2013 dengan magnitudo 0.2 Ms dan kedalaman 10 km. Pada gambar 4.8 menunjukkan bahwa dalam irisan penampang melintang Utara-Selatan, terdapat 3 hiposenter gempa yang letaknya dekat dengan Gunung Arjuno-Welirang. Gempa tersebut merupakan peristiwa gempa yang berturut-turut terjadi pada tanggal 05/03/2013, 08/01/2013, dan 30/01/2013. Adapun gempa yang letaknya jauh berdasarkan irisan penampang melintang tersebut merupakan gempa bumi yang terjadi pada tanggal 01/01/2013 dan 17/02/2013. Peristiwa gempa bumi tanggal 05/03/2013 dan 08/01/2013 terjadi di Gunung Arjuno-Welirang dengan jarak hiposenter terhadap Gunung Arjuno berturut-turut 5.88 km dan 10.53 km sedangkan jarak

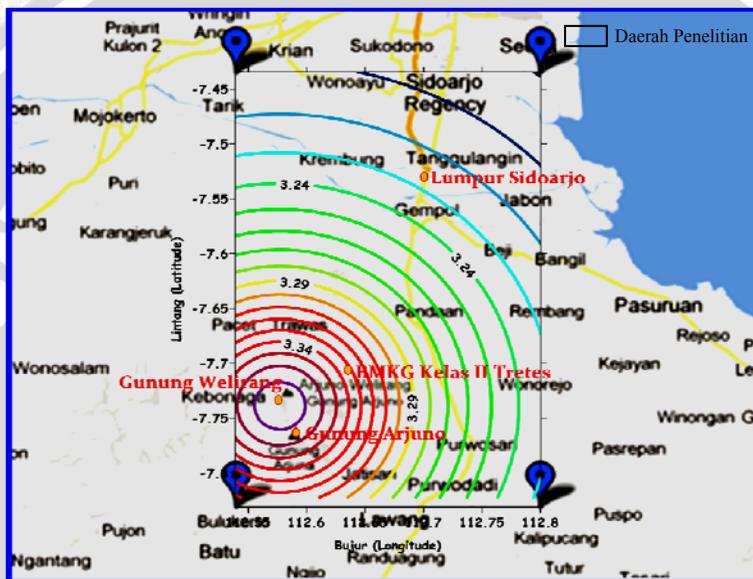
hiposenter terhadap Gunung Welirang berturut-turut 5.06 km dan 10.01 km. Untuk gempa yang lainnya memiliki jarak hiposenter terhadap Gunung Arjuno berturut-turut 20.29 km, 26.02 km, dan 27.10 km. Adapun jarak hiposenter terhadap Gunung Welirang 19.52 km, 29.19 km, dan 24.22 km. Data parameter-parameter gempa tersebut dapat dilihat pada lampiran 8.



Gambar 4.9 Kontur PGA maksimum berdasarkan data gempa bumi lokal

Gambar 4.9 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur nilai percepatan tanah maksimum dengan menggunakan data gempa bumi lokal yang terekam di TDS Stasioner 5.0. Pada kontur tersebut menunjukkan nilai PGA terendah sebesar 5.07 gal berada pada koordinat 7.43°LS dan 112.80°BT , sedangkan nilai PGA tertinggi sebesar 27.15 gal pada koordinat 7.74°LS dan 112.57°BT . Nilai PGA maksimum di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 8.66 gal. Nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 19.84 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 27.01 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 25.42 gal. Nilai PGA maksimum di Gunung Arjuno-Welirang

menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan lokasi LUSI, karena gempa bumi yang memiliki magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km terjadi di Gunung Arjuno-Welirang. Gempa tersebut menghasilkan percepatan tanah yang lebih besar dibandingkan gempa bumi lokal yang lainnya di setiap titik daerah penelitian.



Gambar 4.10 Kontur intensitas gempa (MMI) berdasarkan data gempa bumi lokal

Gambar 4.10 merupakan peta daerah penelitian yang ditunjukkan oleh gambar kotak dengan kontur intensitas gempa dengan menggunakan data gempa bumi lokal yang terekam di TDS Stasioner 5.0. Pada kontur tersebut menunjukkan intensitas gempa terendah sebesar 3.20 pada koordinat 7.43°LS dan 112.80°BT , sedangkan intensitas gempa tertinggi sebesar 3.38 pada koordinat 7.74°LS dan 112.57°BT . Intensitas gempa di lokasi lumpur Sidoarjo dengan koordinat 7.54°LS dan 112.71°BT sebesar 3.23. Intensitas gempa di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dengan koordinat 7.70°LS dan 112.64°BT sebesar 3.32. Intensitas gempa di Gunung Welirang dengan koordinat 7.73°LS dan 112.58°BT sebesar 3.38. Intensitas gempa di Gunung Arjuno dengan koordinat 7.77°LS dan 112.59°BT sebesar 3.36. Secara umum intensitas gempa (MMI) di daerah

penelitian berkisar III – IV. Intensitas gempa di Gunung Arjuno-Welirang menunjukkan nilai yang lebih besar dibandingkan nilai PGA maksimum di Stasiun BMKG Kelas II Tretes dan lokasi LUSI, karena gempa bumi yang memiliki magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km terjadi di Gunung Arjuno-Welirang. Intensitas gempa bumi lokal ini sebanding dengan percepatan tanah maksimum di daerah penelitian. Semakin besar nilai percepatan tanah maksimumnya maka semakin tinggi pula intensitas gempa atau tingkat kerusakan yang ditimbulkannya. Meskipun demikian, intensitas gempa juga dipengaruhi oleh kondisi tanah setempat dan stuktur bangunannya.

4.2 Pembahasan

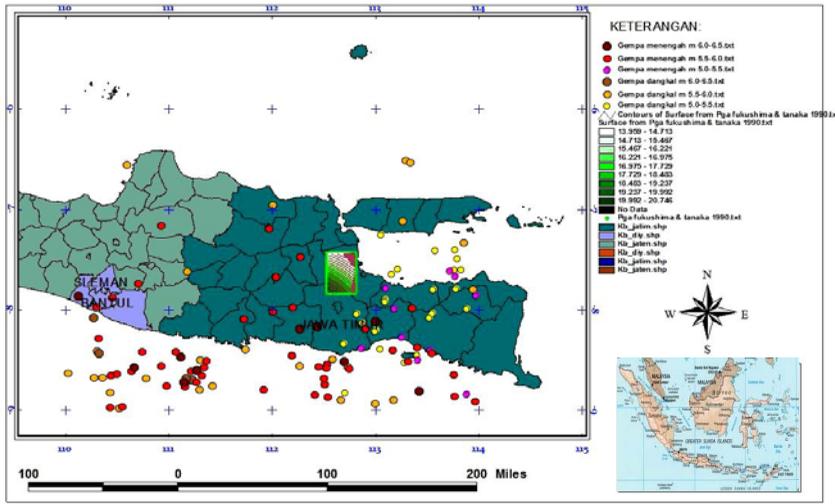
Berdasarkan nilai RMSE masing-masing fungsi atenuasi, fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 (Douglas, 2011) mempunyai nilai RMSE terkecil. Fungsi atenuasi tersebut juga dapat digunakan untuk menghitung PGA di stasiun BMKG kelas II Tretes apabila terjadi kerusakan pada *accelerograph*, karena data PGA empirisnya paling mendekati data PGA aktual (data *accelerograph*) dibandingkan data PGA empiris yang lainnya. Untuk pola kontur percepatan tanah maksimum di daerah penelitian dengan fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988, Crouse tahun 1991, dan Youngs et al. tahun 1997 (Douglas, 2011) mendekati pola kontur percepatan tanah maksimum dengan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 (Douglas, 2011), tetapi memiliki nilai PGA maksimum yang berbeda. Hal tersebut terjadi karena masing-masing fungsi atenuasi dipengaruhi oleh perbedaan parameter yang digunakan, kriteria data gempa, dan lokasi terjadinya gempa bumi. Parameter yang digunakan untuk fungsi atenuasi Joyner dan Boore tahun 1988 terdiri atas magnitudo momen (M_w) dan jarak episenter gempa terhadap titik pengamatan. Parameter yang digunakan untuk fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 terdiri atas magnitudo gelombang permukaan (M_s) dan jarak hiposenter gempa terhadap titik pengamatan. Parameter yang digunakan untuk fungsi atenuasi Crouse tahun 1991 terdiri atas magnitudo momen (M_w), jarak hiposenter gempa terhadap titik pengamatan, dan kedalaman fokus gempa. Adapun parameter yang digunakan untuk fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997 terdiri atas magnitudo momen (M_w), jarak *rupture* gempa terhadap titik pengamatan, kedalaman fokus gempa, dan tipe sumber gempa.

Nilai PGA maksimum di daerah penelitian menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 berkisar 13.95 gal – 20.85 gal. Nilai PGA maksimum ini digunakan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempa bumi melalui fungsi atenuasi intensitas Santoso dkk. (2011), sehingga diperoleh intensitas gempa di daerah penelitian berkisar III – IV. Di sebelah barat daya, tenggara, dan timur laut daerah penelitian memiliki percepatan tanah maksimum yang tinggi, yaitu 20.5 gal – 21 gal dan intensitas gempa III – IV. Di sekitar daerah Pasuruan memiliki percepatan tanah maksimum menengah, yaitu 16.5 gal – 17 gal dan intensitas gempa III – IV. Di lokasi lumpur Sidoarjo memiliki percepatan tanah maksimum terkecil, yaitu 13.5 gal – 14 gal dan intensitas gempa III – IV. Meskipun selisih intensitas gempa di setiap titik daerah penelitian tidak terlalu besar, namun menunjukkan intensitas gempanya sebanding dengan nilai PGA-nya. Semakin tinggi nilai PGA-nya, maka intensitas gempa (MMI) atau tingkat kerusakan yang diakibatkan oleh gempa bumi juga semakin besar.

Hasil kontur percepatan tanah maksimum dengan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 menunjukkan bahwa di sebelah barat daya, tenggara, dan timur laut pada daerah penelitian mempunyai kecenderungan semakin besar nilai PGA maksimumnya. Daerah di sekitar Gunung Arjuno-Welirang memiliki nilai percepatan tanah maksimum dan intensitas gempa yang lebih tinggi dibandingkan daerah di sekitar lumpur Sidoarjo. Hal ini dikarenakan gempa bumi lebih sering terjadi di Jawa Timur bagian selatan dan sekitarnya dibandingkan di Jawa Timur bagian utara. Gempa bumi yang banyak terjadi di Jawa Timur bagian selatan (sekitar zona subduksi) adalah gempa dangkal dan gempa menengah dengan magnitudo (5.5 – 6.5) M_w , sedangkan di sebelah timur laut (Selat Madura) dan tenggara daerah penelitian banyak terjadi gempa dangkal dan gempa menengah dengan magnitudo (5.0 – 5.5) M_w (gambar 4.11). Di sebelah barat daya, tenggara, dan timur laut pada daerah penelitian pernah terjadi gempa bumi dengan magnitudo besar dan jarak fokus gempa terhadap daerah penelitian tidak terlalu jauh, sehingga mengakibatkan percepatan tanah maksimum di daerah tersebut mempunyai nilai yang tinggi. Nilai percepatan tanah maksimum ini berkorelasi dengan intensitas gempa (tingkat kerusakan akibat gempa) di suatu tempat. Adapun tingkat kerusakan yang terjadi juga bergantung pada kondisi tanah dan bangunannya. Secara umum, nilai percepatan tanah yang diakibatkan oleh gempa

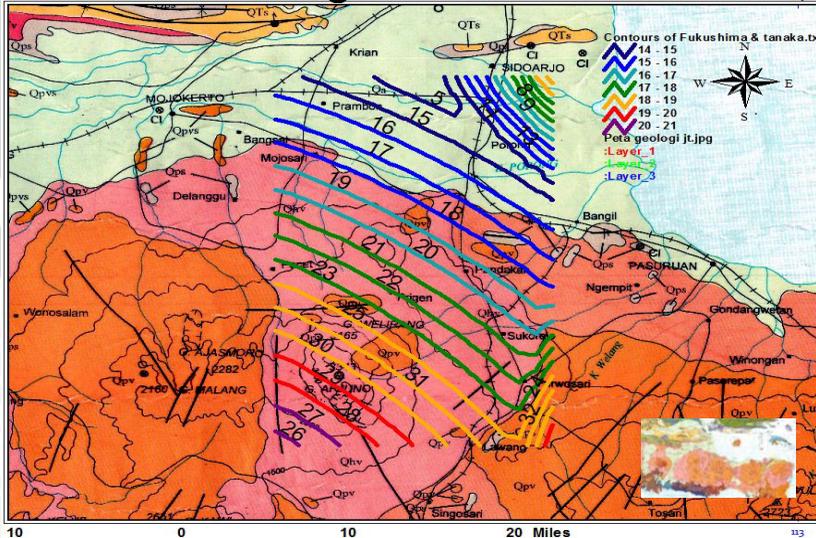
bumi dipengaruhi oleh magnitudo gempa, jarak sumber gempa terhadap daerah penelitian, dan periode dominan tanahnya.

Peta Seismitas di Jawa Timur dan Sekitarnya Tahun 1952-2012



Gambar 4.11 Peta seismitas di wilayah Jawa Timur dan sekitarnya tahun 1952-2012

Peta Geologi Daerah Penelitian



Gambar 4.12 Peta geologi daerah penelitian

Berdasarkan peta geologi daerah penelitian pada gambar 4.12, daerah Sidoarjo (termasuk lokasi lumpur Sidoarjo) merupakan dominan daerah dataran rendah yang tersusun atas batuan Qa. Batuan Qa (aluvium) terdiri atas kerakal, kerikil, pasir, lanau, dan lumpur. Batuan aluvium merupakan jenis batuan endapan yang diendapkan di pinggir sungai atau dataran rendah. Kondisi tanah yang bersifat aluvial memiliki tingkat kekerasan yang rendah, sehingga dapat mengakibatkan amplifikasi ketika terjadi gempa bumi. Untuk daerah Pandaan, Pasuruan tersusun atas batuan Qps, Qpv, dan Qhv. Batuan Qps (sedimen plistosen) terdiri atas batuan konglomerat, batupasir, batulempung, napal, dan tufa yang umumnya kurang mampat. Batuan sedimen berumur plistosen umumnya berbutir, berlapis, dan berfosil. Untuk batuan konglomerat umumnya berwarna abu-abu, ukuran butir campuran (besar dan kecil), dan bentuk butiran membundar. Untuk batulempung mempunyai ukuran butiran lebih kecil dari 1/256 mm. Untuk batuan tufa umumnya berwarna krem (ada pula yang berwarna putih), bentuk butir menyudut, dan ukuran kecil-kecil. Batuan Qpv (lahar gunung api plistosen) terdiri atas kepingan andesit berukuran kerikil-bongkah dan termasuk hasil dari endapan lahar. Batuan andesit termasuk batuan beku yang memiliki warna abu-abu cerah, sifat batuan intermediet, dan mempunyai tingkat kekerasan > 5 . Batuan Qhv (batuan gunung api holosen) terdiri atas breksi gunung api, aglomerat, lava, lahar, tuf, lapili, dan bom. Pada batuan ini tersusun atas andesit-basal, mengandung feldspar (memiliki warna putih dan tingkat kekerasan 6), piroksen (memiliki warna hijau kehitaman dan tingkat kekerasan 6.5), horeh-blenda (memiliki warna hitam dan tingkat kekerasan 5-6), sedikit kuarsa (memiliki warna putih dan tingkat kekerasan 7), dan kaca gunung api (termasuk lajur Gunung api Tengah). Daerah di sekitar Gunung Arjuno-Welirang tersusun atas batuan Qpv (lahar gunung api plistosen) dan Qhv (batuan gunung api holosen). Berdasarkan kondisi tanah pada daerah penelitian dapat diketahui bahwa kondisi tanah di lokasi lumpur Sidoarjo memiliki tingkat kekerasan yang lebih rendah dibandingkan kondisi tanah di daerah Pasuruan dan di sekitar Gunung Arjuno-Welirang. Apabila terjadi gempa bumi di daerah penelitian dengan magnitudo besar ($M > 5$) maka dapat menimbulkan kerusakan yang parah di sekitar lokasi lumpur Sidoarjo dibandingkan di sekitar

daerah Pasuruan dan Gunung Arjuno-Welirang, karena kondisi tanahnya yang kurang mendukung atau berada pada zona lemah.

Sejak terpasangnya TDS (*Tide Digital Seismograph*) Stasioner 5.0 pada tahun 2012 di Stasiun BMKG Kelas II Tretes belum pernah mencatat peristiwa gempa bumi yang terjadi di Gunung Arjuno-Welirang. Namun belakangan ini, dari hasil pencatatan TDS Stasioner 5.0 telah beberapa kali terjadi gempa bumi di daerah tersebut. Terdapat 5 data sinyal gempa yang terjadi di sekitar daerah penelitian, 4 dari peristiwa gempa tersebut terjadi di daerah penelitian yang letaknya tidak terlalu jauh dari sesar watakosek yang melintang dengan arah baratdaya-timurlaut dari sumur eksplorasi BJP-1. Adapun 2 peristiwa gempa terjadi di Gunung Arjuno-Welirang dengan kedalaman gempa berkisar 4 km – 10 km. Salah satu gempa yang terjadi di Gunung Arjuno-Welirang dengan magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km, menghasilkan nilai percepatan tanah dan intensitas gempa terbesar dibandingkan 4 peristiwa gempa lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa gempa bumi dengan magnitudo menengah dan kedalaman dangkal juga dapat menimbulkan kerusakan pada beberapa struktur bangunan yang dibangun dengan tidak memperhatikan terhadap gaya lateral. Karena gempanya terjadi di Gunung Arjuno-Welirang yang tanahnya bersifat keras, sehingga gempa tersebut tidak menimbulkan kerusakan yang berarti pada struktur bangunan di sekitar Gunung Arjuno-Welirang. Lapisan batuan yang tanahnya keras akan mengatenuasi gelombang seismik berfrekuensi rendah sehingga energi gempanya akan berkurang ketika sampai di permukaan tanah. Efek gempa bumi tersebut (percepatan tanah dan intensitas gempa) dapat pula dirasakan lebih besar di lokasi lumpur Sidoarjo karena tanahnya bersifat lunak. Lapisan batuan yang tanahnya lunak akan memperkuat getaran tanah selama terjadi gempa karena bersifat sebagai penghantar yang baik untuk gelombang seismik berfrekuensi rendah.

Gempa bumi dengan magnitudo besar ($M > 5$) dapat menimbulkan korban jiwa dalam jumlah yang tidak sedikit dan umumnya disebabkan oleh reruntuhan bangunan di sekitar lokasi terjadinya gempa. Peristiwa ini menunjukkan bahwa bangunan di lokasi tersebut dibangun dengan tidak memperhatikan nilai percepatan tanah maksimum dan kondisi tanah setempat. Hasilnya, kerusakan bangunan maupun infrastruktur ini menimbulkan kerugian yang besar bagi masyarakat. Daerah Gunung Arjuno-Welirang

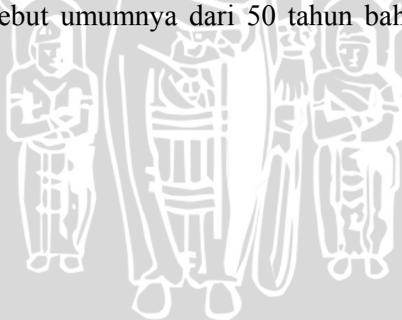
sampai LUSI merupakan daerah yang padat penduduknya dan banyak terdapat bangunan bertingkat yang memerlukan perhatian khusus dalam mitigasi bencana gempa. Struktur bangunan bertingkat tinggi memiliki beban gempa yang lebih besar daripada struktur bangunan bertingkat rendah-menengah, sehingga dapat mengalami guncangan yang besar jika terjadi resonansi ketika tanah setempat bergetar akibat gelombang gempa bumi. Untuk meminimalisir kerusakan bangunan akibat gempa bumi terutama bangunan bertingkat tinggi, maka frekuensi alami (f_0) bangunan tersebut harus diestimasi supaya tidak sama dengan frekuensi alami tanah setempat. Nilai dari kuadrat frekuensi alami ini sebanding dengan percepatan tanah akibat gelombang gempa bumi.

Beberapa penelitian percepatan tanah maksimum di daerah penelitian pernah dilakukan sebelumnya, yaitu Standar Nasional Indonesia (2002) dan Irsyam dkk. (2010). Berdasarkan SNI (Standar Nasional Indonesia) 03-1726-2002 pada peta wilayah gempa Indonesia dengan menghitung nilai percepatan puncak batuan dasar pada periode ulang gempa 500 tahun diperoleh nilai PGA di daerah penelitian sebesar 0,10 g – 0,15 g atau 98 gal – 147 gal. Sementara itu, Irsyam dkk. (2010) menghasilkan revisi peta gempa Indonesia dengan menghitung nilai percepatan puncak di batuan dasar pada periode ulang gempa 50 tahun dan 200 tahun. Untuk peta gempa dengan periode ulang 50 tahun diperoleh nilai PGA di batuan dasar pada daerah penelitian sebesar 0,05 g – 0,10 g atau 49 gal – 98 gal, sedangkan untuk peta gempa dengan periode ulang 200 tahun diperoleh nilai PGA di batuan dasar pada daerah penelitian sebesar 0,10 g – 0,20 g atau 98 gal – 196 gal.

Apabila nilai PGA maksimum di daerah penelitian menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 dibandingkan dengan penelitian-penelitian sebelumnya (peta wilayah gempa Indonesia berdasarkan SNI 03-1726-2002 dan peta revisi gempa Indonesia tahun 2010), maka nilai PGA-nya berbeda dan relatif lebih kecil daripada nilai PGA pada penelitian sebelumnya. Nilai PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 di daerah penelitian berkisar antara 13.95 gal – 20.85 gal dengan nilai RMSE sebesar 0.49 gal. Meskipun demikian, penelitian yang dilakukan oleh Noviyanti (2012) menunjukkan bahwa fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka tahun 1990 paling mendekati hasil pencatatan dari *accelerograph* yang ada di Jawa Timur dan dapat digunakan untuk menghitung nilai PGA di wilayah

Jawa Timur. Adapun hasil perhitungan nilai PGA menggunakan fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997 relatif sama dengan nilai PGA dari peta gempa Indonesia yang dikembangkan oleh Irsyam dkk. (2010) untuk periode ulang gempa 50 tahun, karena salah satu fungsi atenuasi yang digunakan dalam perhitungan PGA-nya yaitu fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997. Nilai PGA maksimum menggunakan fungsi atenuasi Youngs et al. tahun 1997 di daerah penelitian berkisar antara 54.53 gal – 75.09 gal, sedangkan nilai PGA maksimum untuk periode ulang gempa 50 tahun yang dikembangkan oleh Irsyam dkk. (1997) berkisar antara 49 gal – 98 gal. Nilai PGA menggunakan fungsi atenuasi tersebut lebih kecil daripada nilai PGA yang dikembangkan oleh Irsyam dkk. (2010) karena perbedaan metode yang digunakan dalam penelitian.

Nilai PGA maksimum ini cukup untuk memberikan gambaran mengenai percepatan tanah maksimum di daerah penelitian. Untuk nilai PGA maksimum di daerah penelitian berdasarkan peta gempa dalam SNI 03-1726-2002 dan peta gempa yang dikembangkan Irsyam dkk. (2010) dengan periode ulang gempa 200 tahun memiliki selisih yang cukup besar, karena perbedaan periode waktu data historis gempa bumi yang digunakan. Semakin lama rentang waktu dari data historis gempa yang diambil maka semakin akurat data percepatan tanah maksimum yang diperoleh, karena gempa bumi yang kuat mempunyai periode ulang tertentu. Periode ulang gempa tersebut umumnya dari 50 tahun bahkan 100 tahun.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, disimpulkan bahwa fungsi atenuasi Fukushima dan Tanaka yang dikembangkan tahun 1990 dapat digunakan untuk menentukan percepatan tanah (PGA) maksimum pada Gunung Arjuno-Welirang sampai lumpur Sidoarjo karena mempunyai nilai RMSE terkecil, yaitu 0.49 gal. Nilai PGA maksimum di daerah penelitian berkisar 13.95 gal – 20.85 gal dan intensitas gempanya berkisar III-IV. Di lokasi lumpur Sidoarjo mempunyai nilai PGA sebesar 15.14 gal dan intensitas (MMI) III-IV. Di stasiun BMKG kelas II Tretes mempunyai nilai PGA sebesar 18.10 gal dan intensitas (MMI) III-IV. Di Gunung Welirang mempunyai nilai PGA sebesar 19.11 gal dan intensitas (MMI) III-IV. Di Gunung Arjuno mempunyai nilai PGA sebesar 19.44 gal dan intensitas (MMI) III-IV.

Berdasarkan hasil pencatatan TDS Stasioner 5.0, 4 dari 5 peristiwa gempa bumi lokal terjadi di daerah penelitian yang tidak jauh dari orientasi sesar watakosek. Salah satu gempa yang terjadi di Gunung Arjuno-Welirang dengan magnitudo 2.9 Ms dan kedalaman 10 km, menghasilkan percepatan tanah di daerah penelitian berkisar 5.07 gal – 27.15 gal dan intensitas gempa berkisar III-IV.

5.2 Saran

Untuk penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data historis gempa > 60 tahun dan menggunakan metode yang berbeda (PSHA) dalam menentukan nilai PGA dan intensitas gempa. Selain itu, juga perlu didukung oleh data gempa bumi lokal yang lebih banyak di daerah penelitian supaya hasil yang diperoleh lebih maksimal.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan



DAFTAR PUSTAKA

- Adnan, Zulkarnain. 2012. *Standar Operasional Prosedur (SOP) TDS Stasioner 5.0*. Pasuruan: BMKG II Tretes.
- Afnimar. 2009. *Seismologi*. Bandung: Penerbit ITB.
- Arif, Mirza. 2012. *Bentukan Lahan Kawasan Malang*. Diakses dari <http://blog.ub.ac.id/ndrembes4nature/2012/03/03/bentukan-lahan-kawasan-malang/> pada tanggal 17 November 2012 jam 13.54 WIB.
- Bird, Peter. 2003. An Updated Digital Model of Plate Boundaries, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 4, No. 3, 1027, doi: 10.1029/2001GC000252.
- Chaerunnisa. 2010. *Identifikasi Struktur Bawah Permukaan yang Diduga Sebagai Pemicu Meluasnya Semburan Lumpur Porong, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur Menggunakan Data Gayaberat*. Bandung: Penerbit Universitas Pendidikan Indonesia.
- Delfebriyadi. 2009. Peta Respon Spektrum Provinsi Sumatera Barat untuk Perencanaan Bangunan Gedung Tahan Gempa, *Jurnal Teknik Sipil*. Vol. 16, No. 2, ISSN 0853-2982.
- Dharma, P., Fariza, A., dan Haqqun, R. Y. 2011. *Sistem Informasi Geografis Daerah Bencana Lumpur Lapindo Sidoarjo Menggunakan J2ME*. Surabaya: Penerbit ITS.
- Douglas, John. 2011. *Ground-motion prediction equations 1964–2010*. California: Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM).
- Gafoer, S. dan Ratman, N. 1999. *Peta Geologi Lembar Jawa Bagian Timur Skala 1:500.000*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Indonesia.
- Haris, A. 2012. *Analisis Percepatan Pergerakan Tanah Maksimum Daerah Yogyakarta dengan Metode Atenuasi*. Malang: Penerbit UIN.
- Howell, Benjamin F. 1959. *Introduction to Geophysics*. USA: Mc Graw-Hill.
- Indriana, Rina D. 2008. Analisis Sudut Kemiringan Lempeng Subduksi di Selatan Jawa Tengah dan Jawa Timur Berdasarkan Anomali Gravitasi dan Implikasi Tektonik Vulkanik, *Berkala Fisika*, Vol. 11, no. 3, hal. 89-96.
- Irsyam, M., Sengara, I.W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Hilman, D., Kertapati, E., Meilano, I., Asrurifak, M.,

- Ridwan, M., dan Suhardjono. 2010. *Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010 (Edisi 2)*. Bandung: Kementrian Pekerjaan Umum.
- Kearey, Philip., Brooks, Michael., Hill, Ian. 2002. *An Introduction to Geophysical Exploration Third Edition*. Australia: Blackwell.
- Lay, Thorne dan Wallace, Terry C. 1995. *Modern Global Seismology*. USA: Academic Press.
- Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C. F., dan Seed, H. B. 1975. *FLUSH-A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil Structure Interaction Problems*. Berkeley: University of California.
- Mazzini, A., Svensen, H., Akhmanov, G. G., Aloisi, G., Planke, S., Malthé-Sorensen, A., dan Istadi, B. 2007. *Triggering and dynamic evolution of the LUSI mud volcano, Indonesia*. Norwegia: *Institute for Energy Technology, Kjeller*.
- Musson, R. M. W. dan Cecic, I. 2011. *Intensity and Intensity Scales*. San Diego: Academic Press.
- Noviyanti, Ana B. 2012. *Perbandingan Nilai Percepatan Tanah Berdasarkan Rumus Empiris dan Data Accelerograph di Wilayah Jawa Timur*. Tangerang: Penerbit Akademi Meteorologi dan Geofisika.
- Nurrofiq. 2009. *Pengertian dan Macam–Macam pada Gempa Bumi*. Diakses dari <http://www.g-excess.com/367/pengertian-dan-macam-macam-pada-gempa-bumi/> pada tanggal 12 Desember 2012 jam 14.40 WIB.
- Ony. 2007. *Parameter Gempa Bumi*. Diakses dari <http://onyxdua.blogspot.Com/2007/12/parameter-gempa-bumi.html> pada tanggal 20 November 2012 jam 16.00 WIB.
- Priyanto, Cahya. 2011. *Zona Subduksi Indonesia*. Diakses dari <http://cahyageo.blogspot.com/2011/02/dalam-geologi-subduksi-adalah-proses.html> pada tanggal 31 Maret 2013 jam 12.30 WIB.
- Razali. 2008. *Rekonturing Zona Percepatan Gempa di Permukaan Tanah Provinsi Sumatera Utara dengan Program Aplikasi Shake2000*. Medan: Penerbit Universitas Sumatera Utara.
- Ruff, Larry dan Kanamori, Hiroo. 1980. *Seismicity and The Subduction Process, Physics of Earth and Planetary Interiors*, Inter-23:240-252.
- Santoso, Djoko. 2002. *Pengantar Teknik Geofisika*. Bandung: Penerbit ITB.

- Santoso, Edy., Widiyantoro, Sri., dan Sukanta, Nyoman. 2011. *Studi Hazard Seismik dan Hubungannya dengan Intensitas Seismik di Pulau Sumatera dan Sekitarnya*. Jakarta: Penerbit Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Setyono, Ernawan. 2011. Pemakaian Model Diterministik Untuk Transformasi Data Hujan Menjadi Data Debit Pada Das Lahor, *Media Teknik Sipil*, Vol. 9, No. 1, Hal. 17-28.
- Shearer, P. M. 2009. *Introduction to Seismology Second Edition*. New York: Cambridge University Press.
- SNI. 2002. *Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Penerbit Badan Standardisasi Nasional.
- Sukanta, N. I., Pudja, P. I., Pakpahan, S., Badriyah, I. U., Muchlis, Mudhalifana, W. S., dan Tresnawati, R. 2010. *Accelerograph BMKG dalam Penentuan Peta Intensitas Gempa Kuat*. Jakarta: Penerbit Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Sulaiman, Ismail. 1980. *Pendahuluan Seismologi*. Jakarta: Akademi Meteorologi dan Geofisika.
- Susanto, Heri. 2009. *Sejarah Gempa dan Tsunami di Jawa Timur*. Diakses dari <http://nasional.news.viva.co.id/news/read/95025-sejarah-gempa-dan-tsunami-di-jawa-timur> pada tanggal 17 November 2012 jam 13.25 WIB.

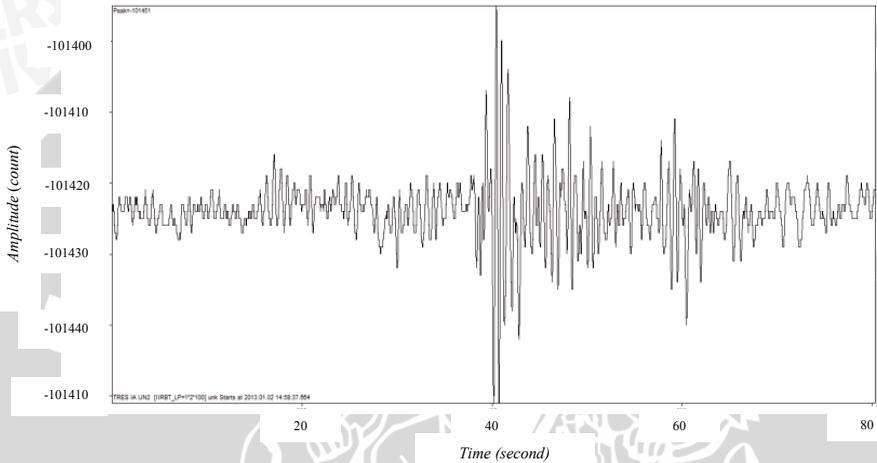
UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Halaman ini sengaja dikosongkan

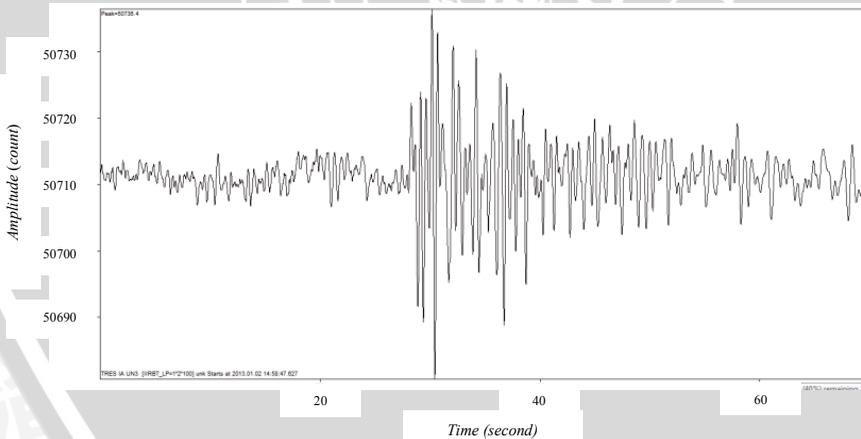


LAMPIRAN 1

Waveform Accelerogram yang Difilter dengan Menggunakan Software Dimas

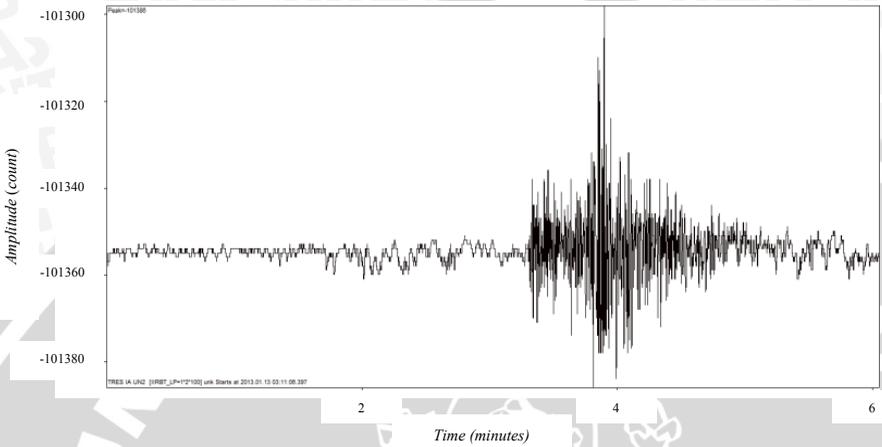


(a)

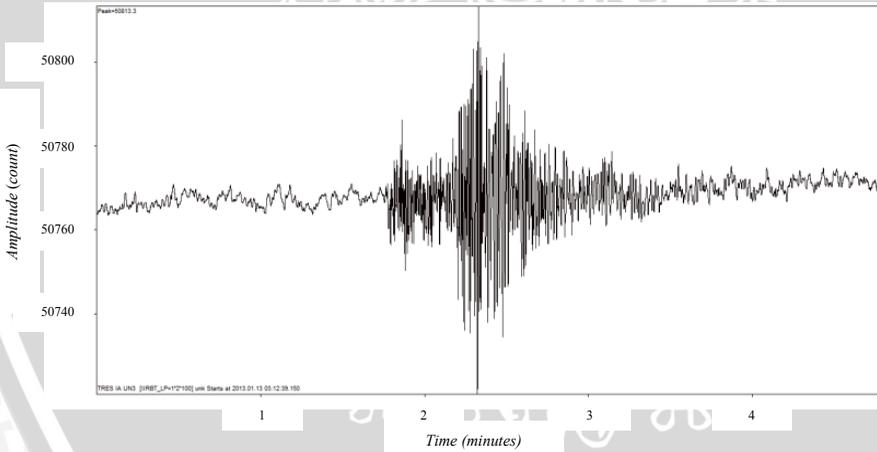


(b)

Gambar L.1.1 Sinyal gempa bumi tanggal 2 Januari 2013 pukul 02:57:35.0 UTC a) arah N-S, b) arah E-W

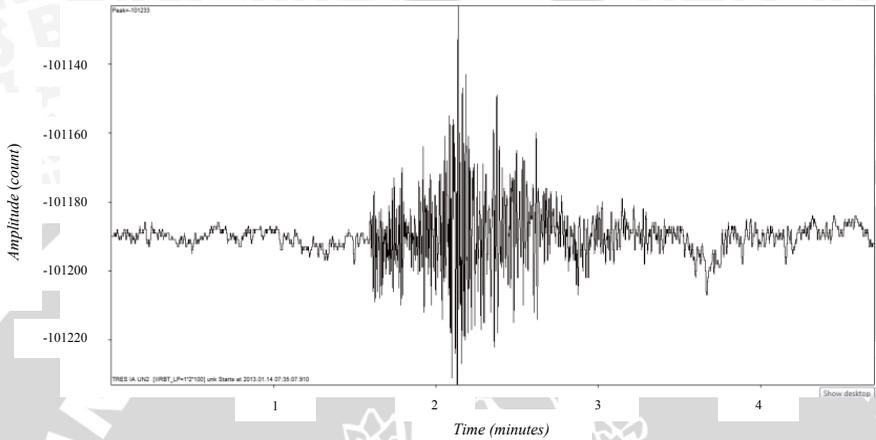


(a)

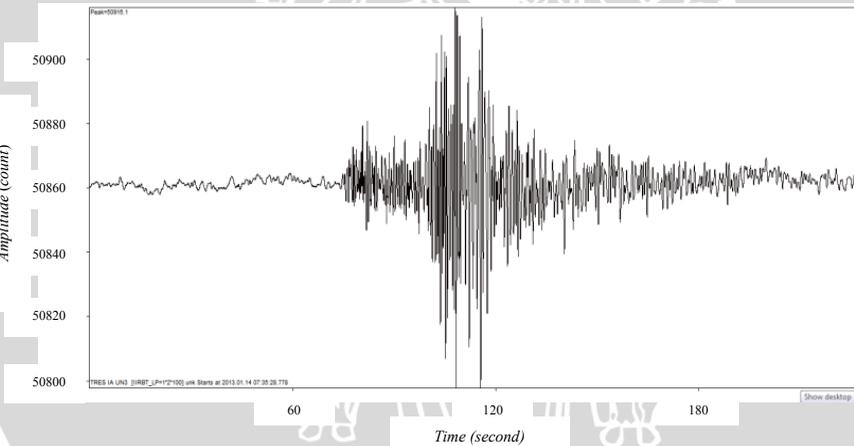


(b)

Gambar L.1.2 Sinyal gempa bumi tanggal 13 Januari 2013 pukul 03:13:58.0 UTC a) arah N-S, b) arah E-W

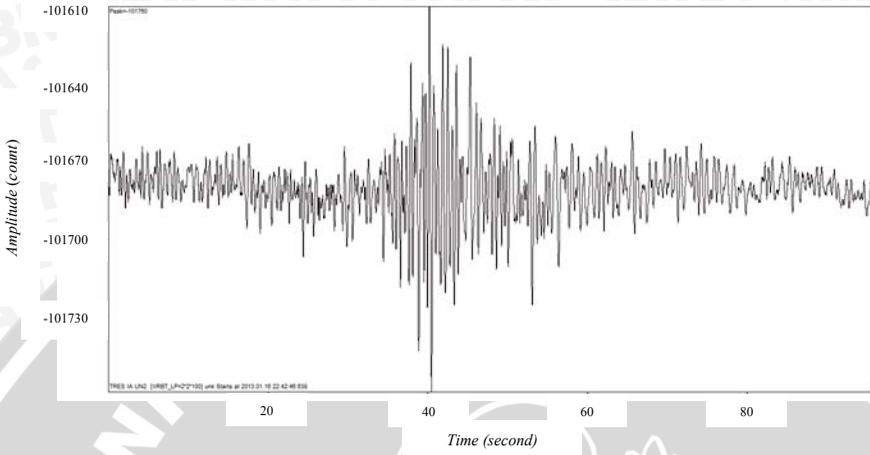


(a)

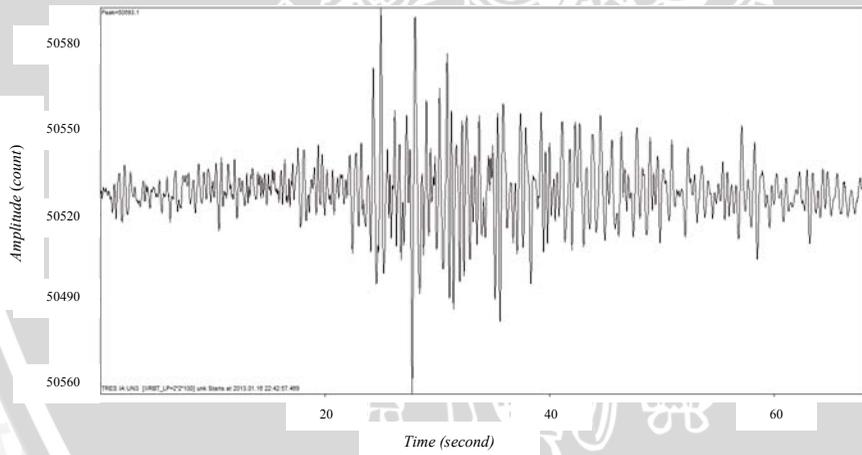


(b)

Gambar L.1.3 Sinyal gempa bumi tanggal 14 Januari 2013 pukul 07:36:10.0 UTC a) arah N-S, b) arah E-W

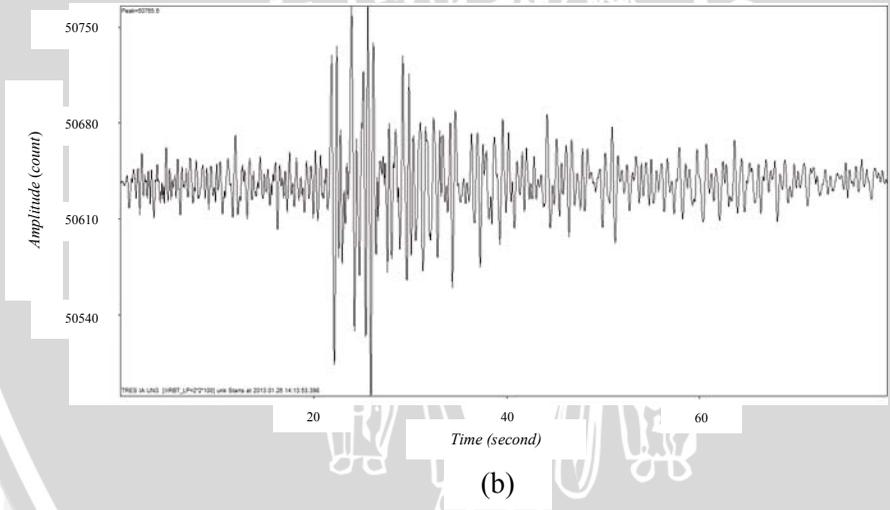
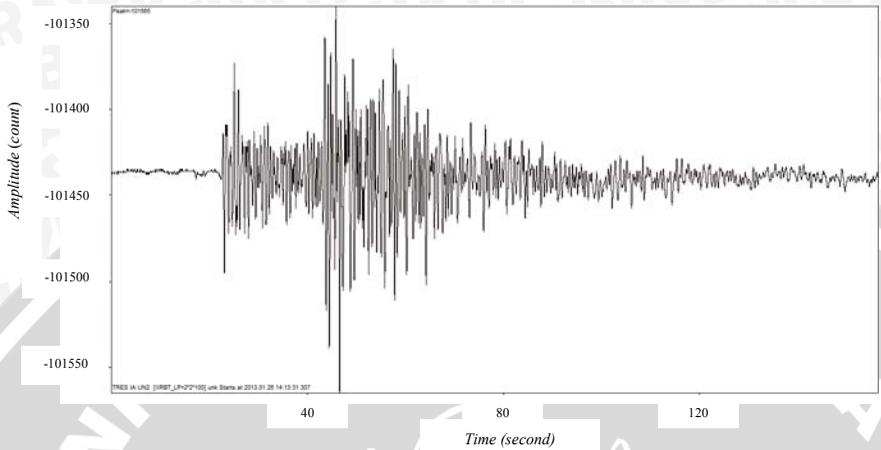


(a)

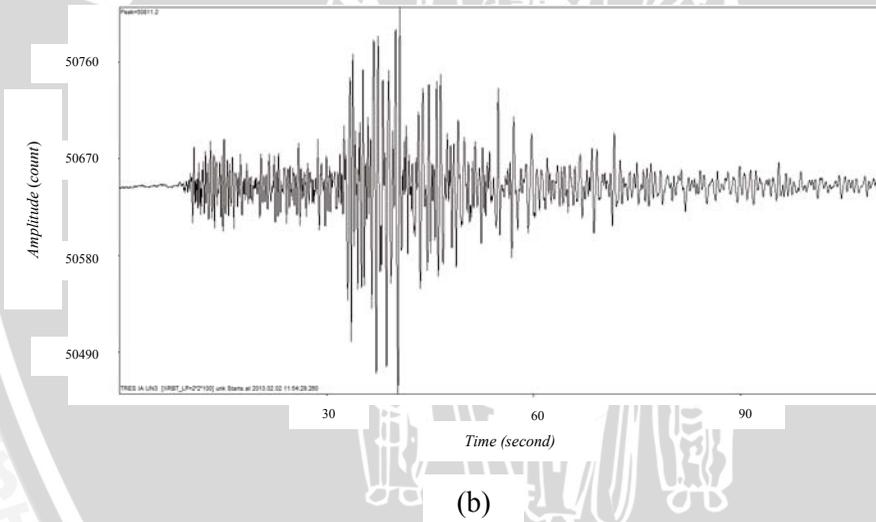
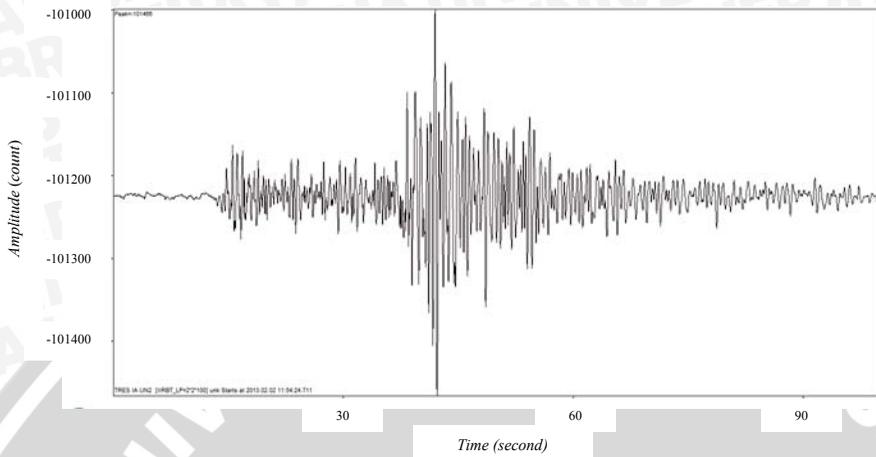


(b)

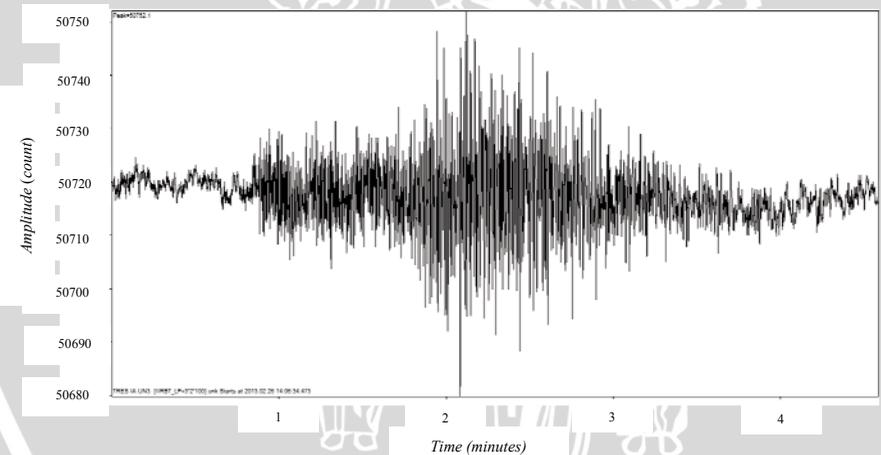
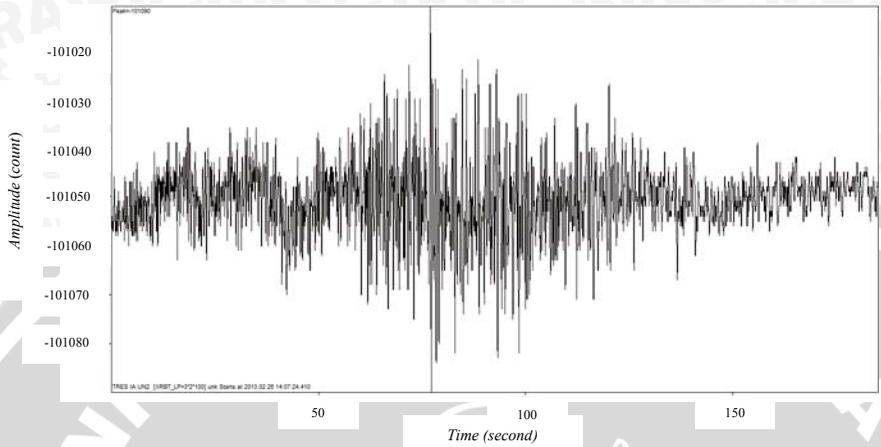
Gambar L.1.4 Sinyal gempa bumi tanggal 16 Januari 2013 pukul 22:41:38.0 UTC a) arah N-S, b) arah E-W



Gambar L.1.5 Sinyal gempa bumi tanggal 26 Januari 2013 pukul 14:13:23.5 UTC a) arah N-S, b) arah E-W



Gambar L.1.6 Sinyal gempa bumi tanggal 2 Februari 2013 pukul 11:54:05.5 UTC a) arah N-S, b) arah E-W



Gambar L.1.7 Sinyal gempa bumi tanggal 26 Februari 2013 pukul 14:06:03.7 UTC a) arah N-S, b) arah E-W

LAMPIRAN 2

Tabel L.2.1 Data Historis Gempa Bumi Berdasarkan Hasil Pencatatan IRIS

No	TANGGAL	WAKTU	BUJUR	LINTANG	DEPTH (km)	TIPE MAG	MAG
1	12/21/2010	59:38.3	111.197	-8.7	54.6	MB	5.7
2	8/16/2010	19:17.2	112.53	-8.546	73.6	MB	5
3	6/18/2010	42:53.3	111.34	-8.58	73.9	MB	5
4	6/6/2010	57:27.0	112.451	-8.572	87.6	MB	5.1
5	7/28/2009	50:52.1	112.51	-8.7491	76.1	mb	5.2
6	7/20/2008	11:08.8	111.2686	-8.7234	88.8	mb	5.3
7	9/15/2005	33:38.1	111.4236	-8.7615	52.2	mb	5
8	5/10/2005	32:12.1	113.5242	-8.4104	128.5	MD	5.2
9	3/14/2005	37:00.4	112.7409	-8.5934	131.6	mb	5.1
10	3/7/2005	51:02.9	113.3128	-8.5192	127.7	mb	5
11	1/4/2005	42:21.3	113.0443	-8.391	2	MD	5.2
12	1/4/2005	07:46.2	112.7088	-8.8251	2	MD	5.1
13	12/29/2004	48:52.3	113.4024	-8.4523	33	MD	5
14	11/19/2004	08:40.1	113.8839	-8.8441	107.4	MD	5
15	11/15/2004	39:52.5	113.7624	-7.6032	2	MD	5.5
16	11/4/2004	41:20.7	113.9382	-7.7983	15	MD	5.7
17	9/20/2004	15:50.5	113.7801	-7.7967	33	MD	5
18	9/12/2004	54:23.1	113.4074	-8.5001	135.1	MD	5
19	7/17/2004	20:31.2	113.3362	-6.5371	50.4	mb	5
20	4/24/2004	24:37.4	113.5222	-8.0811	30	MD	5.4
21	4/16/2004	22:14.6	113.052	-7.2533	2	MD	5.4
22	4/10/2004	41:24.7	113.5523	-8.0357	15	MD	5
23	1/25/2004	45:54.0	112.0048	-8.0244	118.5	mb	5
24	1/24/2004	45:51.8	113.5607	-7.8037	2	MD	5.3
25	8/25/2003	17:19.3	113.1713	-8.903	63.2	mb	5.1
26	7/19/2003	20:37.5	111.2271	-8.6992	62.7	mb	6.1
27	5/28/2003	34:03.7	112.5252	-8.5827	83.3	mb	5.2
28	8/26/2002	36:45.0	113.289	-6.516	33	MS	5.3
29	8/7/2001	22:38.2	113.757	-8.653	115.5	mb	5.4
30	1/19/2001	26:42.7	112.409	-8.853	124.5	mb	5.3

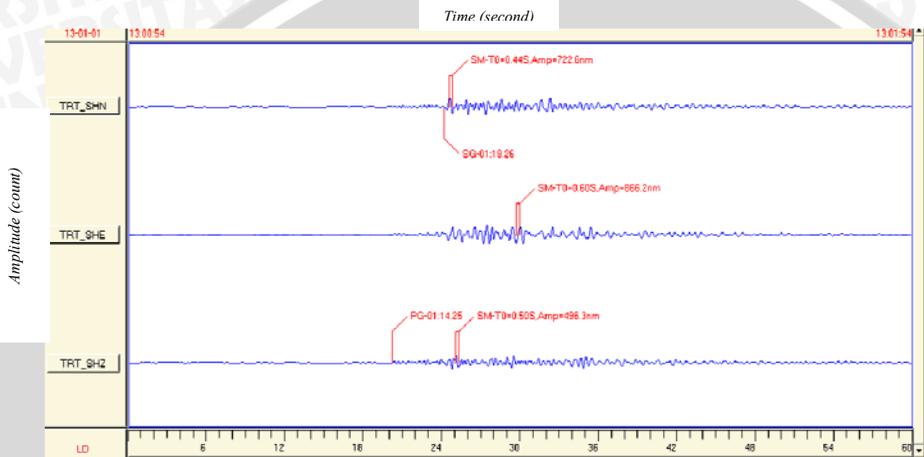
No	TANGGAL	WAKTU	BUJUR	LINTANG	DEPTH (km)	TIPE MAG	MAG
31	11/25/2000	45:18.5	113.2831	-8.5227	22.7	MD	5
32	11/25/2000	44:54.8	112.8652	-8.3875	160	MD	5
33	11/24/2000	38:57.1	113.2557	-8.277	80	MD	5.1
34	10/19/2000	48:02.5	113.4036	-8.3738	80	ML	5.3
35	9/5/2000	58:01.3	112.187	-8.457	144.7	mb	5
36	5/14/2000	23:00.0	113.8489	-7.3323	2	ML	5.1
37	4/15/2000	31:48.5	113.0961	-7.7871	80	MD	5
38	3/30/2000	20:55.2	112.0353	-7.6744	225	ML	5.3
39	2/12/2000	11:03.9	112.503	-8.689	121.8	mb	5.1
40	1/29/2000	13:12.2	111.263	-8.605	81.1	mb	5.2
41	3/7/1999	43:47.4	113.5422	-8.4397	160	ML	5.4
42	9/28/1998	34:30.4	112.4447	-8.1741	157.2	mb	6
43	9/25/1998	55:17.3	112.9957	-8.2171	33	md	5
44	8/11/1998	35:02.2	113.093	-7.8969	15	md	5.5
45	7/3/1998	32:12.4	111.9144	-8.7988	116	mb	5
46	4/1/1998	54:35.4	113.2169	-7.597	33	md	5
47	3/20/1998	15:45.0	113.5778	-7.4073	33	md	5
48	3/14/1998	32:50.4	112.873	-8.1333	33	md	5.2
49	3/7/1998	03:22.5	113.7216	-7.6157	80	md	5.1
50	3/5/1998	20:00.6	113.9713	-7.8582	80	md	5.6
51	3/2/1998	41:26.2	112.6903	-8.3391	33	md	5.1
52	2/18/1998	48:32.9	113.7696	-7.4002	33	md	5.2
53	2/13/1998	45:54.9	113.1573	-7.6492	33	md	5.6
54	10/18/1997	44:59.3	113.7703	-7.6657	80	md	5
55	10/12/1997	34:49.1	113.7967	-7.4873	33	md	5
56	9/25/1997	26:16.6	113.8786	-7.996	2	md	5
57	9/13/1997	29:11.3	113.0952	-7.9161	33	md	5
58	9/8/1997	55:35.1	112.8176	-8.0456	33	md	5.1
59	8/3/1997	51:44.0	113.182	-7.996	80	md	5.1
60	7/25/1997	18:40.6	113.003	-8.21	3.7	md	5.1

No	TANGGAL	WAKTU	BUJUR	LINTANG	DEPTH (km)	TIPE MAG	MAG
61	7/16/1997	07:23.2	113.828	-7.6	15	md	5.1
62	7/27/1995	21:33.8	111.3163	-8.6583	88.8	mb	5
63	5/5/1995	19:22.4	111.1479	-8.7237	105.7	mb	5.7
64	1/18/1994	46:12.5	113.1633	-8.4034	167.8	mb	5.1
65	6/26/1992	36:15.0	112.5396	-8.8713	82.1	mb	5.1
66	6/9/1992	31:58.0	111.1161	-8.475	81.8	mb	5.8
67	11/26/1991	47:37.2	113.7646	-8.8615	107.4	mb	5.1
68	7/4/1991	54:17.7	111.0682	-8.4196	130.6	mb	5.2
69	12/3/1989	11:56.7	113.4208	-8.8154	101	mb	5.7
70	10/25/1989	46:42.6	113.2592	-7.122	37.5	mb	5
71	4/17/1989	20:33.2	112.899	-8.19	138.5	mb	5.1
72	7/14/1988	18:08.1	112.5835	-8.4954	36.6	mb	5
73	5/12/1986	35:00.0	112.0052	-6.9564	33	mb	5.1
74	3/9/1986	41:57.1	111.7232	-8.0998	125.9	mb	5.2
75	4/23/1985	10:39.2	111.2958	-8.8022	39	mb	5.3
76	5/3/1984	28:50.9	111.2759	-8.6081	80.8	mb	5.6
77	8/17/1983	29:49.4	111.1574	-8.7657	73.5	mb	5.2
78	8/13/1983	28:17.7	111.1736	-8.6903	64.4	mb	5.9
79	7/3/1980	06:16.2	111.9701	-7.1978	230.1	mb	5.2
80	3/31/1980	14:47.6	112.9934	-8.9354	57.7	mb	5.2
81	9/24/1979	25:08.3	113.9641	-8.9135	79.8	mb	5.1
82	5/14/1979	14:23.0	111.1787	-7.6221	48.6	mb	5.1
83	10/14/1978	41:15.1	112.269	-7.4768	197.6	mb	5.4
84	11/9/1977	25:24.1	113.3488	-7.9874	154.8	mb	5
85	1/15/1975	29:54.0	112.1955	-7.9751	141	mb	5.5
86	5/21/1974	57:10.0	111.213	-8.6117	76.4	mb	5
87	11/4/1972	35:58.5	112.2689	-8.1939	99.3	mb	5.7
88	12/17/1971	08:07.7	112.2656	-8.5593	64.1	mb	5.2
89	7/3/1971	10:05.9	111.3602	-8.512	83.7	mb	5.4
90	6/30/1968	49:23.0	112.73	-8.57	47	mb	5.1

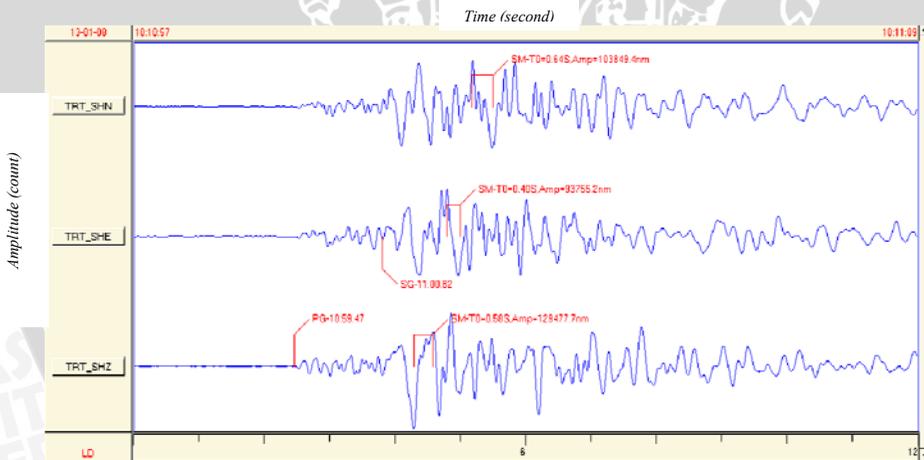
No	TANGGAL	WAKTU	BUJUR	LINTANG	DEPTH (km)	TIPE MAG	MAG
91	11/26/1967	54:01.0	113	-8.12	110	mb	5.6
92	8/6/1967	10:24.6	112.66	-8.9	33	mb	5
93	1/15/1967	26:58.0	111.74	-8.4	64	mb	5.1
94	1/7/1965	04:20.0	111.3	-8.5	39	mb	5.4
95	2/29/1964	49:48.7	112.7	-8.52	148	mb	5.7
96	11/9/2010	03:30.4	110.026	-8.634	63	MB	5.4
97	5/26/2006	54:00.8	110.2737	-8.0827	19.9	mb	5.8
98	9/8/2003	26:33.9	110.309	-8.4155	67	mb	5.3
99	1/6/2003	16:00.4	110.6388	-8.6166	111.3	mb	5.1
100	10/14/2001	10:46.3	110.668	-8.575	77.5	mb	5.7
101	5/25/2001	06:08.6	110.127	-7.864	131.3	mb	5.9
102	5/14/2000	18:18.9	110.5915	-6.5622	25.8	ML	5.5
103	7/7/1999	01:03.8	110.4538	-7.883	160	ML	5.3
104	2/4/1999	34:33.7	110.432	-8.976	96	mb	5.3
105	8/21/1997	48:57.3	110.924	-7.163	80	mL	5.2
106	8/26/1993	43:07.0	110.3548	-8.6786	37.9	mb	5.3
107	3/22/1993	24:55.9	110.7783	-8.6868	52.1	mb	5.2
108	11/21/1992	04:10.5	110.438	-8.6566	71.1	mb	5.2
109	9/12/1989	29:17.4	110.5532	-8.9718	70.2	mb	5.2
110	9/12/1989	55:56.7	110.5175	-8.9838	27	MS	5.2
111	7/23/1985	23:18.9	110.7402	-8.4223	111.7	mb	5.3
112	7/9/1985	26:55.3	110.3297	-8.4353	34.6	mb	5.6
113	3/13/1981	22:34.9	110.4312	-8.8285	48.2	MS	5.6
114	10/7/1979	27:48.8	110.7064	-7.7388	178.9	mb	5.2
115	7/18/1977	11:39.7	110.2799	-8.6775	66.1	mb	5.3
116	11/8/1974	26:34.1	110.3215	-8.2882	116.9	mb	5
117	4/2/1969	24:08.0	110.3	-7.97	124	mb	5.3
118	11/23/1965	31:09.3	110.98	-8.76	94	mb	5.4
119	7/7/1964	44:55.2	110.93	-8.56	108	mb	5
120	5/2/1964	01:43.5	110.5	-8.64	82	mb	5.4

LAMPIRAN 3

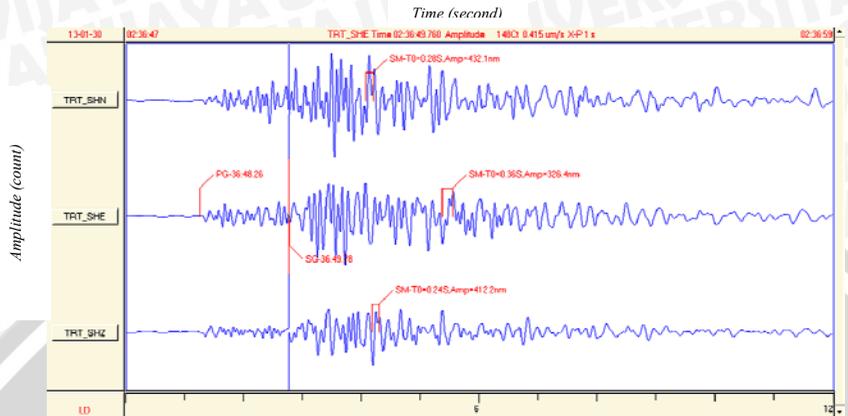
Sinyal Gempa Bumi yang telah Ditentukan Fase Gelombang P dan S



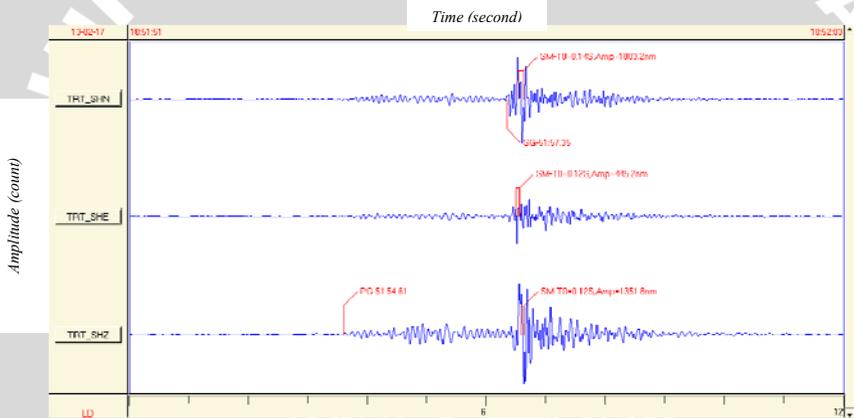
Gambar L.3.1 Sinyal gempa bumi tanggal 1 Januari 2013 pukul 13:01:08.6 WIB



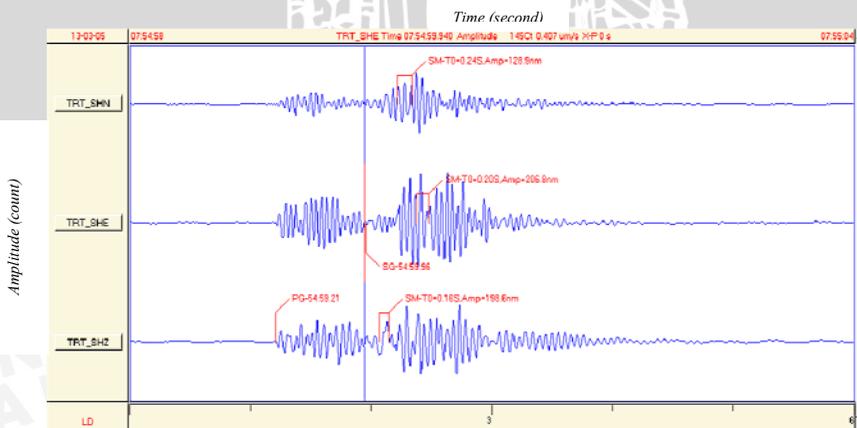
Gambar L.3.2 Sinyal gempa bumi tanggal 8 Januari 2013 pukul 10:10:57.1 WIB



Gambar L.3.3 Sinyal gempa bumi tanggal 30 Januari 2013 pukul 02:36:45.7 WIB



Gambar L.3.4 Sinyal gempa bumi tanggal 17 Februari 2013 pukul 10:51:50.6 WIB



Gambar L.3.5 Sinyal gempa bumi tanggal 5 Maret 2013 pukul 07:54:57.1 WIB

LAMPIRAN 4

Tabel L.4.1 Spesifikasi *Accelerograph Type TSA-100S*

Specification	Value
<i>Technology</i>	<i>Triaxial, force-balance accelerometer with capacitive displacement sensor, restoring coil and calibration coil.</i>
<i>Full-Scale Range</i>	<i>± 4g Peak-to-Peak: superior to Kinometrics FBA-23 DH specification</i>
<i>Responsitivity</i>	<i>Factory selectable: 5V/g Differential; 2,5 V/g Single-Ended or 2,5V/g Differential; 1,25V/g Single-Ended; Equivalent to Kinometrics FBA-23 DH</i>
<i>Output</i>	<i>Differential to > ± 20V Peak-to-Peak Single Ended to > ± 10V Peak-to-Peak</i>
<i>Bandwitdth</i>	<i>DC to 225 Hz</i>
<i>Dynamic Range</i>	<i>>160 dB, at 1 Hz, in 1 Hz bandwidth 147 dB, typical, 3 Hz to 30 Hz, integrated 135 dB, typical, 0,1 Hz to 100 Hz, integrated</i>
<i>Self-Noise</i>	<i>2,2 x 10⁻⁸ gRMS/rtHz @ 1 Hz, Typical 2,0 x 10⁻⁸ gRMS/rtHz @ 10 Hz, Typical 2,0 x 10⁻⁸ gRMS/rtHz @ 20 Hz, Typical 2,8 x 10⁻⁸ gRMS/rtHz @ 50 Hz, Typical 7,0 x 10⁻⁸ gRMS/rtHz @ 100 Hz, Typical 3,0 x 10⁻⁷ gRMS/rtHz @ 200 Hz, Typical Integrate Self-Noise: under 1µg RMS, 0,01 Hz to 100 Hz (see note)</i>
<i>Offset</i>	<i>< 0,05 g (less than 0.02 g available upon request)</i>
<i>Non-Linearity</i>	<i>< 0,015% Total Non-Linearity</i>
<i>Total Harmonic Distortion (THD)</i>	<i>< -74 dB</i>
<i>Cross-Axis Sensitivity</i>	<i>< 0,002% within each sensor < 0,5 total, within triaxial sensor, including axis misalignment</i>
<i>Hysteresis</i>	<i>< 200 micro-g peak-to-peak, with ± 1 g excitation OR < 0,005% of Full-Scale</i>
<i>Calibration Coil</i>	<i>Standard, digitally enabled Nominal scale factor: 0.04 g/V Calibration Input impedance: > 100 MΩ</i>
<i>Offset Temperature Coefficient</i>	<i>60 micro-g^oC, typical, Horizontal Sensor 320 micro-g^oC, typical, Vertical Sensor</i>
<i>Supply Voltage Ranges</i>	<i>± 12 V to ± 16 V (standard dual supply) 9-18 Volts (single supply option)</i>
<i>Power Consumption</i>	<i>Quiescent: + 75 mA/ - 70 mA on ±12 V Supply</i>

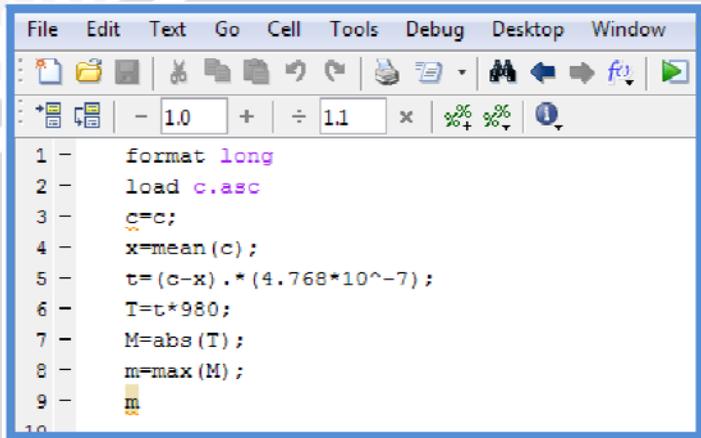
Lanjutan tabel L.4.1

<i>(Standard Supply)</i>	<i>Dual</i>	<i>Dynamic: ± 4 mA/g/axis on ± 12 V Supply</i>
<i>Power Consumption (Single Option)</i>	<i>Supply</i>	<i>Quiescent: 180 mA @ 12 V; 140 mA @ 15 V Dynamic: 9 mA/g/axis @ 12 V; 7.5 mA/g/axis @ 15 V</i>
<i>Operating Temperature Range</i>		<i>-40°C to +85°C</i>
<i>Connector</i>		<i>19-Socket circular connector Connector Technology, Inc. 851-07A14-19S50-A7</i>
<i>Physical Size</i>		<i>8□(L) x 8□(W) x 3.75□(H) with leveling screws extended Total height with right angle mating connector is < 5.75□</i>
<i>Mounting Holes</i>		<i>Three $\frac{1}{4}$-20 clearance holes at edges with sufficient space for washers/nuts; $\frac{1}{4}$-20 adjust able leveling feet and bubble level</i>



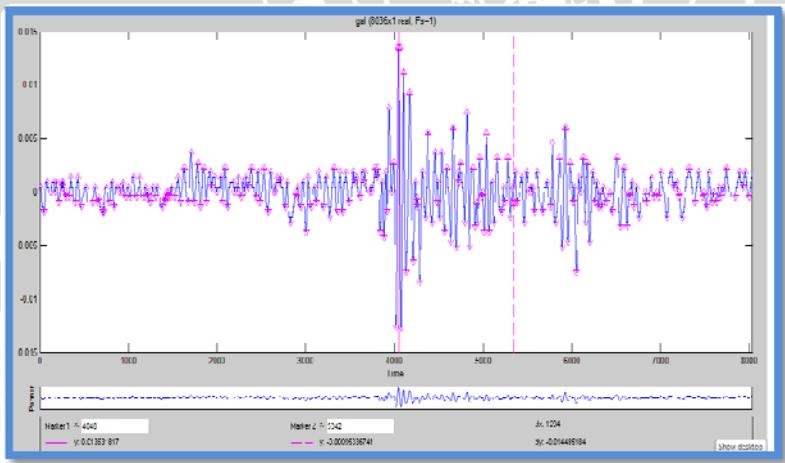
LAMPIRAN 5

Konversi Data PGA aktual dengan Menggunakan *Software* Matlab



```
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window
- 1.0 + 1.1 x %>% %%_
1 - format long
2 - load c.asc
3 - c=c;
4 - x=mean(c);
5 - t=(c-x).*(4.768*10^-7);
6 - T=t*980;
7 - M=abs(T);
8 - m=max(M);
9 -
10
```

Gambar L.5.1 Contoh konversi data percepatan tanah aktual dalam satuan *count* menjadi gal dengan *software* matlab



Gambar L.5.2 Contoh bentuk sinyal gelombang gempa yang telah dikonversi dalam satuan gal dengan *software* matlab

LAMPIRAN 6

Tabel L.6.1 Spesifikasi TDS (*Tide Digital Seismograph*) Stasioner 5.0

<i>Tide Digital Seismograph Main Technical Indicator</i>	
<i>Supply Voltage</i>	<i>DC 12 V (normally work under 6, 18 V)</i>
<i>Power Consumption</i>	<i>Maximum (charging under full power): 12 V x 1.3 A; No charging: 1.4 W (GPS off, system run on normally)</i>
<i>Operating Temperature</i>	<i>-20° - 65°</i>
<i>Dimensions of the Device</i>	<i>20 x 230 x 160 mm</i>
<i>Weight</i>	<i>4.5 kg</i>
<i>Packing and Transportation</i>	<i>Accord with GB/T 657 Rules to 3 level exact instrument</i>
<i>Built-in Data Acquisition System Technical Indicator</i>	
<i>Data Acquisition Channel</i>	<i>3 channels (6 channels, optional)</i>
<i>Sensor Interface</i>	<i>Compatible with DB/T13-2000 rules</i>
<i>Signal Input Mode</i>	<i>Double-ended differential signal input</i>
<i>A/D Conversion</i>	<i>24 bit</i>
<i>Input Impedance</i>	<i>Single-ended 160 KΩ double-ended 320 KΩ</i>
<i>Input Signal Scale Value</i>	<i>7-level program-controlled optional gains of 1, 2, 4, 8, 16, 32, and 64. Corresponding to $\pm 0.3125 V$, $\pm 0.625 V$, $\pm 1.25 V$, $\pm 2.5 V$, $\pm 5 V$, $\pm 10 V$, $\pm 20 V$ differential signal input</i>
<i>Dynamic Range</i>	<i>≥ 135 dB @50sps/chn, ≥ 133 dB @100sps/chn, ≥ 131 dB @200sps/chn</i>
<i>System Noise</i>	<i>< 1 LSB effective value</i>
<i>Nonlinear Distortion</i>	<i>< -110 Db@50 sps/chn</i>
<i>Interchannel Crosstalk</i>	<i>< -110dB</i>
<i>Digital Filtering</i>	<i>FIR digital filter, optional linear phase shift and minimum phase shift</i>
<i>Passband Ripple</i>	<i>< 0.1 dB</i>
<i>Outside Passband Attenuation</i>	<i>> 135 dB</i>
<i>Output Sampling Rate</i>	<i>1, 5, 10, 20, 25, 40, 50, 100, 125, 200, 250, 333, 500 Hz</i>
<i>Band Range</i>	<i>0, 0.4, 2, 4, 10, 16, 20, 40, 50, 80, 100, 133, 200 Hz</i>
<i>De-zeroing Filter</i>	<i>One-step digital high-pass filter</i>
<i>High Pass Filtering</i>	<i>Cutoff cycle 225s, 450s, 900s, 1800s, 3600s, 7200s or</i>

Lanjutan tabel L.6.1

<i>Calibration Signal Generator</i>	<i>16-bit DAC, program controlled wave form output, calibration output current and voltage output are optional. When calibration current, the full range is ± 5 mA. When outputting voltage calibration, the full range is ± 5 V</i>
<i>Number of Calibration Signal Channels</i>	<i>3-channel, Calibration enable output control. When calibration is disabled, calibration output and external circuit are entirely physically isolated</i>
<i>Calibration Signal Type</i>	<i>Step, sine wave, pseudo random coding signal, simulated seismic signal</i>
<i>Calibration Output</i>	<i>Signal frequency, amplitude, cycles are set and controlled by utility</i>
<i>Calibration Enable Mode</i>	<i>Intruction and timing nodes</i>
<i>Frequency Stability</i>	<i>5×10^{-7} temperature compensation voltage controlled crystal oscillator (TCVCXO), real time frequency accuracy monitoring</i>
<i>Time Check Mode</i>	<i>Built-in GPS receiver, GPS second pulse adjustment of crystal oscillator frequency TCVCXO through phase locked loop (PLL) voltage control</i>
<i>Time Service/On Time Precision</i>	<i>Superior to 1 ms</i>
<i>GPS Operating Mode</i>	<i>Continous or time switch time correction</i>
<i>Environment and Status Monitoring</i>	<i>6-way stand alone A/D monitoring channels for a collector, automatically monitoring the status of the environment and the seismometer, monitoring the zero drift of the seismometer (MASS POSITION), service voltage of the station and the observatories, voltage of accumulator, monitoring temperature parameters of the station and the observatories</i>
<i>Recording Function</i>	<i>Support internal continous/triggering record wave form, volume extendable, support over 10-day consecutive data storage (3 tracks/s 100 point sampling)</i>
<i>Record Format</i>	<i>Corrected SEED-Steim2 compression mode</i>
<i>Recording Medium</i>	<i>Pluggable CF card electronic discs, 512 MB for standard configuration, optional HDD (under the optional HDD condition, the</i>

Lanjutan tabel L.6.1

	<i>range system operating temperature and system power consumption indicators may drop)</i>
<i>Communication Interface</i>	<i>Standard RS-232C series port, standard RJ 45/LAN Ethernet interface</i>
<i>Monitoring Setting</i>	<i>Display collected parameters through keys panel and LED nixie tubes</i>
<i>Communication Protocols</i>	<i>Support TCP/IP protocol, support real time, multicast data transmission over Internet/VPN network, support remote management and support data retransmission. Support DDN, wireless/GPRS/CDMA data transmission (including serial port/network etc) on the same platforms, support data cell and switching among multiple seismograph network and centers</i>
<i>Information Transferred</i>	<i>Real-time waveform, monitoring data parameter/message, local recording data</i>
<i>Management Software</i>	<i>Functions, such as parameter setting, self-checking function, real-time graphic display and save, may run on notebook PC with online help</i>
<i>Lightning Protection</i>	<i>Set at all end of the power, RS232 signal, network signal and seismometer signal</i>
<i>Self Enable Function</i>	<i>Self check, reset when the machine is down (including reset for no output signals), self rebooting functions</i>

LAMPIRAN 7

Tabel L.7.1 Hasil Perhitungan Nilai PGA dan RMSE

No.	Fungsi Atenusi	PGA empiris (gal)	PGA aktual (gal)	RMSE	No.	Fungsi Atenuasi	PGA empiris (gal)	PGA aktual (gal)	RMSE
1	Joyner & Boore	0.50280824	0.019611853	2.71	3	Crouse	0.521016114	0.019611853	3.04
		5.50272603	0.03447374				6.461931749	0.03447374	
		2.20995866	0.043169798				2.846624963	0.043169798	
		0.40799651	0.049947152				0.57989866	0.049947152	
		3.48322721	0.09342696				2.794346946	0.09342696	
		2.40343942	0.144256628				2.770970795	0.144256628	
		0.10339872	0.02556789				0.999594178	0.02556789	
2	Fukushima & Tanaka	0.04985889	0.019611853	0.49	4	Youngs et al	0.945938421	0.019611853	5.34
		0.65380955	0.03447374				11.53485452	0.03447374	
		0.33473734	0.043169798				5.621879956	0.043169798	
		0.13454948	0.049947152				1.024660564	0.049947152	
		0.96227418	0.09342696				4.182698657	0.09342696	
		0.79433148	0.144256628				3.903510723	0.144256628	
		0.03484695	0.02556789				1.929628051	0.02556789	

LAMPIRAN 8

Tabel L.8.1 Daftar parameter gempa bumi lokal

No.	Tanggal	OT (WIB)	Lintang	Bujur	Depth (km)	Distance (km)	ts-tp	RMS	Ms	Azimuth
1	8/1/2013	10:10:57.1	-7.73862	112.5772	10	7.4	1.62	0.001	2.9	232.2
2	30/01/2013	02:36:45.7	-7.64846	112.6987	10	9.4	1.78	0.002	0.2	48.0
3	17/02/2013	10:51:50.6	-7.53372	112.6152	8	19.2	2.76	0.001	1.0	354.6
4	5/3/2013	07:54:57.1	-7.73081	112.5965	4.4	5.1	1.01	0.002	0.9	251.9
5	1/1/2013	13:01:08.6	-7.98069	112.5948	10.2	30.9	4.13	0.001	1.6	188.2