

TESIS

**IDENTIFIKASI POTENSI KERUSAKAN DI KOTA BENGKULU
AKIBAT GEMPABUMI DENGAN METODE HVSR**



Disusun Oleh :

Nurul Hidayat
12914009

**KONSENTRASI MANAJEMEN REKAYASA KEGEMPAAN
PROGRAM PASCA SARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2015**

HALAMAN PERSETUJUAN

TESIS

**IDENTIFIKASI POTENSI KERUSAKAN
DI KOTA BENGKULU AKIBAT GEMPABUMI
DENGAN METODE HVSR**



Prof. Ir. Widodo, MSCE. Ph.D.

Dosen Pembimbing I

Tanggal : 9/1/2015

Dr. Ir. Lalu Makrup, MT.

Dosen Pembimbing II

Tanggal : 9/1/2015

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

IDENTIFIKASI POTENSI KERUSAKAN DI KOTA BENGKULU AKIBAT GEMPABUMI DENGAN METODE HVSR

Disusun Oleh :

Nama : Nurul Hudayat

NIM : 12914009

Telah diuji di depan Dewan Penguji
Pada tanggal 2 Januari 2015
dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Susunan Dewan Penguji:

Dosen Pembimbing I

9/1/2015

Dosen Pembimbing II

Dosen Penguji

9/1/2015

Prof.Ir. Widodo, MSCE.Ph.D.

Dr.Ir. Lalu Makrup, MT.

Prof.Ir.H. Sarwidi, MSCE.Ph.D.

Yogyakarta, 9 Januari 2015

Universitas Islam Indonesia
Program PascaSarjana Magister Teknik Sipil
Ketua Program,



(Prof.Ir.H. Sarwidi, MSCE.Ph.D)

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (magister), baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Program “*Software*” komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 2 Januari 2015

Yang membuat pernyataan,



Nurul Hidayat
NIM. 12914009

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum wr.wb.

Alhamdulillah rabbil'alamiin, segala puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah memberikan hidayah, kesempatan, dan kemudahan dalam menjalankan amanah sehingga tesis dengan judul **“Identifikasi Potensi Kerusakan di Kota Bengkulu Akibat Gempabumi dengan Metode HVSR”** ini dapat terselesaikan. Shalawat serta salam selalu tercurah kepada Nabi Muhammad SAW, inspirasi akhlak, pribadi yang mulia dan tuntunan dalam segala hal.

Tesis ini merupakan syarat untuk mencapai jenjang Strata Dua (S2), pada Program Magister Teknik Sipil, Konsentrasi Manajemen Rekayasa Kegempaan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Masih terdapat banyak keterbatasan dalam penelitian dan penulisan tesis ini, oleh karena itu penulis berharap akan ada pengembangan penelitian selanjutnya yang lebih baik dengan rekomendasi penelitian yang dikemukakan pada bagian akhir dari tesis ini.

Dalam penyusunan tesis ini, penulis juga mendapatkan dukungan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Prof. Ir. Widodo, MSCE., Ph.D selaku Dosen Pembimbing I terimakasih atas bimbingan, saran dan masukannya hingga dapat terselesaikan Tesis ini,
2. Bapak Dr. Ir. Lalu Makrup, MT selaku Dosen Pembimbing II, terimakasih atas bimbingan, saran dan masukannya hingga dapat terselesaikan Tesis ini,
3. Bapak Prof. Ir. H. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U selaku Dosen penguji Tesis, terimakasih atas bimbingan dan saran yang diberikan hingga dapat terselesaikan Tesis ini.

4. Bapak Prof. Ir. H. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U selaku Ketua Program Studi Magister Teknik Sipil UII.
5. Ibu Ir. Tuti Sumarnigsih, ST., MT. selaku Sekertaris Program Studi Magister Teknik Sipil UII.
6. Bapak Dr. Andi Eka Sakya, M.Eng selaku Kepala Badan Meterologi dan Geofisika.
7. Bapak Dr. Hendar Gunawan, M.Sc selaku Kepala Pusdiklat Badan Meterologi dan Geofisika.
8. Bapak Dadang Permana S.Si., M.Si selaku mantan Kepala Stasiun Geofisika Kepahiang – Bengkulu,
9. Kepala Biro Perencanaan dan Kerjasama Luar Negeri (BPKLN) Kemendiknas,
10. Koordinator Program Beasiswa Unggulan BPKLN,
11. Malik Krisbudianto S.Si, Pebri Surgiansyah S.Si, Fandy dan Nofran yang telah membantu dalam pengambilan data di Kota Bengkulu
12. Bapak Anshori yang telah membantu dalam pencarian data di Kota Bengkulu,
13. Rekan-rekan pegawai Stasiun Geofisika Kepahiang Bengkulu,
14. Rekan-rekan pegawai Stasiun Meteorologi Fatmawati Bengkulu,
15. Rekan-rekan pegawai Stasiun Klimatologi Pulau Bai Bengkulu,
16. Teman-teman MRK 5 yang telah banyak membantu dan mengisi waktu kuliah dengan ilmu yang bermanfaat.
17. Seluruh Dosen Pengajar yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu terimakasih atas bimbingannya selama ini,
18. Seluruh Staf Magister Teknik Sipil UII Pak Bashori, Mbak Fenska, Pak Gandung, Pak Jan dan seluruh karyawan yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, terimakasih atas bimbingan dan saran yang telah diberikan,
19. Keluarga Besar Magister Rekayasa Kegempaan, atas masukan, kerjasama dan kekompakannya,

20. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu, *jazakumullahu khaironkatsiiroo*,

Penulis berharap semoga penelitian yang telah dilakukan dan disajikan dalam bentuk tesis ini dapat memberikan kontribusi yang berarti bagi khasanah ilmiah dan sumbangan ilmu khususnya untuk studi manajemen bencana gempa bumi.

Wassalamu'alaikum wr.wb.

Yogyakarta, 2 Januari 2015

Penulis

Nurul Hidayat
12914009

LEMBAR PERSEMBAHAN



Karya ini kupersembahkan kepada:

Ibu dan Bapak Tercinta

Serta Istri dan anakku yang tersayang

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERSETUJUAN	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSEMBAHAN.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xix
DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL	xx
ABSTRAK	xxi
<i>ABSTRACT</i>	xxii

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Manfaat Penelitian.....	7
1.5 Batasan Masalah	7
1.6 Definisi Operasional.....	8

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya.....	9
2.2 Keaslian Penelitian	15

BAB III LANDASAN TEORI

3.1	Kerusakan akibat gempa bumi.....	19
3.2	Gempa merusak di Bengkulu.....	21
3.3	Faktor yang mempengaruhi tingkat kerusakan.....	27
3.4	<i>Site Effect</i>	27
3.5	Metode untuk mengevaluasi <i>site effect</i>	31
3.5.1	Metode SSR (<i>Standard Spectral Ratio</i>)... ..	31
3.5.2	Metode HVSR (<i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i>).....	33
3.6	Mikrotremor	35
3.7	Dasar teori metode HVSR.....	37
3.8	Frekuensi dominan (Frekuensi Resonansi).....	41
3.9	Hubungan Frekuensi dominan dengan ketebalan lapisan.....	42
3.10	Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA).....	43
3.11	Hubungan PGA dipermukaan dengan tingkat kerusakan.....	49
3.12	Indeks kerentanan seismik.....	50
3.13	Hubungan indeks kerentanan seismik dengan tingkat kerusakan.....	51
3.14	<i>Ground Shear Strain</i>	51
3.15	Hubungan <i>ground shear strain</i> dengan tingkat kerusakan.....	53
3.16	Properti Dinamik Tanah.....	54
3.16.1	Modulus Geser (G).....	54
3.16.2	Damping Ratio (ξ).....	55
3.17	<i>Ground Motion Synthetic</i>	56
3.18	Analisis respon tanah 1D.....	57
3.19	Inversi kurva H/V	59
3.20	Penentuan Vs30 dan <i>Site Class</i>	61

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

4.1	Lokasi, Cakupan Wilayah Penelitian dan Waktu Penelitian.....	62
-----	--	----

4.2	Data yang diperlukan.....	63
4.3	Alat yang digunakan.....	63
4.4	Cara memperoleh data.....	63
4.5	Analisis Data Mikrotremor.....	65
4.6	Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik.....	67
4.7	Perhitungan PGA.....	68
4.8	Perhitungan v_s tiap lapisan dan Vs30.....	68
4.9	Perhitungan Ketebalan Sedimen.....	69
4.10	Perhitungan <i>Ground Shear Strain</i>	70
4.11	Data parameter gempa yang digunakan.....	70
4.12	Perhitungan <i>Ground Shear Strain</i> perlapisan berdasarkan permodelan numerik.....	70

BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1	Proses Pengolahan Data	77
5.2	Pembahasan.....	83
5.2.1	Sebaran Frekuensi Dominan (f_g) dan Faktor Amplifikasi (A_g).....	83
5.2.2	Sebaran Indeks Kerentanan Seismik (K_g).....	85
5.2.3	Sebaran <i>Ground Shear Strain</i>	87
5.2.4	Sebaran PGA Kanai.....	90
5.2.5	Sebaran Vs30.....	95
5.2.6	Sebaran Ketebalan Sedimen.....	97
5.2.7	<i>Ground Shear Strain</i> perlapisan.....	100
5.2.7.1	Analisis <i>Spektral matching</i> untuk daerah Kota Bengkulu.....	101
5.2.7.2	Perhitungan <i>ground shear strain</i> pada lokasi 1 dan 2 dengan NERA.....	104

BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN

6.1	Kesimpulan	108
6.2	Saran-saran	108
DAFTAR PUSTAKA		110

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Nilai PGA Rerata dan Indeks Kerentanan Seismik di Kota Bengkulu (Hadi dkk, 2012).....	11
Tabel 2.2 Rangkuman penelitian sebelumnya dan perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan.....	16
Tabel 3.1 Data gempa merusak yang pernah terjadi di Provinsi Bengkulu (BMKG, 2012).....	22
Tabel 3.2 Mikrozonasi <i>Japan Building Code</i> (Kanai dan Tanaka, 1961).....	36
Tabel 3.3 Perbandingan nilai PGA dan Skala MMI (David dkk, 1999)	50
Tabel 3.4 Nilai <i>Ground Shear Strain</i> dan fenomena yang terjadi pada tanah (Isihara, 1996).....	52
Tabel 3.5 Tabel parameter C_1, C_2, C_3, C_4 dan C_5 untuk batuan (Young, 1997).....	56
Tabel 3.6 Tabel parameter C_1, C_2, C_3, C_4 dan C_5 untuk tanah (Young, 1997).....	57
Tabel 3.7 Penggolongan <i>site class</i> berdasarkan v_s , $\bar{N}$, dan $\bar{S}_u$ <i>Eurocode 8</i>	61
Tabel 4.1 Panduan pengukuran mikrotremor (SESAME, 2004).....	64
Tabel 5.1 Hasil data primer $F_g, A_g, K_g, \gamma, R_{hip}, a_s, V_{s30}$ dan H	82
Tabel 5.2 Hasil data sekunder $F_g, A_g, K_g, \gamma, R_{hip}, a_s, V_{s30}$ dan H	83
Tabel 5.3 Hasil perhitungan PGA pada lokasi 1 dan 2.....	95
Tabel 5.4 Data Bor pada lokasi 1.....	103
Tabel 5.5 Data Bor pada lokasi 2.....	104
Tabel 5.6 Perbandingan hasil <i>shear strain</i> NERA dan Nakamura.....	105
Tabel 5.7 Perbedaan Nilai PGA yang digunakan pada perhitungan <i>shear strain</i>	106

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Peta Provinsi Bengkulu dan Peta Kota Bengkulu (Bakosurtanal, 2000).....	1
Gambar 1.2 Peta Potensi Akumulasi Gempa di Mentawai (Natawidjaya, 2007).....	2
Gambar 1.3 Peta Gempa Merusak dan Tsunami di Bengkulu (BMKG,2012).....	4
Gambar 1.4 Penjalaran gelombang seismik dari kecepatan tinggi menuju ke kecepatan rendah (Schuler dalam Sungkono, 2011).....	5
Gambar 2.1 Peta Indeks Kerentanan Seismik (Daryono, 2011).....	9
Gambar 2.2 Peta Percepatan Tanah Kota Bengkulu (Hadi dkk , 2012).....	10
Gambar 2.3 Peta Indeks Kerentanan Seismik Kota Bengkulu (Hadi dkk, 2012).....	11
Gambar 2.4 Peta PGA di Kota Bengkulu (Febriani, 2012).....	12
Gambar 2.5 Peta Vs30 Kota Surabaya (Mufida dkk, 2013).....	13
Gambar 2.6 Peta Indeks Kerentanan Seismik di Kab. Bengkulu Utara (Farid dkk, 2013).....	14
Gambar 2.7 Peta PGA di permukaan Kab. Bengkulu Utara (Harlianto, 2013).....	14
Gambar 3.1 Likuifaksi yang memicu kerusakan apartemen Kawagishi-cho yang disebabkan gempa Nigata 1964 (Kramer, 1996).....	19
Gambar 3.2 Kerusakan jalan di Provinsi Bengkulu (BAPPENAS, 2007) ...	20
Gambar 3.3 Posisi gempa Michoacan dan lokasi kota Mexico (Kantiyar dkk, 2010).....	28
Gambar 3.4 Posisi Episenter Gempa Loma Prieta dan Kota San Fransisco (USGS, 1999).....	28
Gambar 3.5 Persebaran kerusakan akibat gempa Bantul 27 Mei 2006 (Miura dkk dalam Daryono, 2011).....	29
Gambar 3.6 Variasi Seismogram pada jenis lithologi yang berbeda	

	di Miyazaki, Jepang (Okuma dkk dalam Daryono, 2011).....	30
Gambar 3.7	Pengukuran mikrotremor dengan metode SSR (Charman, 2006)	31
Gambar 3.8	Fourier Amplitude Spektra pada <i>bedrock</i> (referensi) dan tanah.....	32
Gambar 3.9	Perbandingan antara fourier spektra tanah dengan <i>bedrock</i> (referensi) didapatkan faktor amplifikasi dan frekuensi dominan tanah.....	32
Gambar 3.10	Pengukuran mikrotremor dengan metode HVSR (Charman, 2006).....	33
Gambar 3.11	Fourier Spektra komponen horisontal dan komponen vertikal.....	34
Gambar 3.12	Spektra Rasio H/V.....	35
Gambar 3.13	Variasi zona tanah dan tingkat kerusakan akibat gempa Tonankaipada daerah di sekitar sungai Kukugawa (Kanai dan Tanaka, 1961).....	37
Gambar 3.14	Sketsa <i>bedrock</i> dan lapisan tanah lunak (Daryono, 2011).....	38
Gambar 3.15	Contoh Spektrum H/V.....	39
Gambar 3.16	Sketsa faktor amplifikasi dan penurunan rumus untuk menunjukkan bahwa faktor amplifikasi (A_g) berlaku untuk <i>displacement</i> , kecepatan dan percepatan.....	41
Gambar 3.17	Model dua lapisan <i>bedrock</i> dan tanah lunak (sedimen) (Ibs-von dan Jurgen, 1999).....	43
Gambar 3.18	Spektra Amplifikasi tanah (Ibs-von dan Jurgen, 1999).....	43
Gambar 3.19	Hubungan antara simpangan maksimum dengan periode (Kanai dan Yoshizawa, 1958).....	44
Gambar 3.20	Hubungan antara predominant period dengan koefesien damping (Kanai, 1957).....	46
Gambar 3.21	Hubungan variabel P dan Q terhadap jarak episenter (Kanai dkk, 1966).....	48
Gambar 3.22	Hubungan percepatan kalkulasi dan observasi	

	(Kanai dkk, 1966).....	49
Gambar 3.23	Variasi indeks kerentanan seismik di San Fransisco (Nakamura 2008 dalam Daryono, 2011).....	51
Gambar 3.24	Sketsa <i>ground shear strain</i> tanah (Nakamura, 2000).....	52
Gambar 3.25	Hubungan G_{max} dan G_{sec}	54
Gambar 3.26	Grafik <i>Modulus Reduction</i>	55
Gambar 3.27	Penjalaran gelombang body dari hiposenter kepermukaan (Kramer, 1996).....	58
Gambar 3.28	Satu dimensi sistem lapisan tanah dan diskritisasi spasial (Bardet dan Tobita, 2001).....	58
Gambar 3.29	Inversi dan permodelan inversi.....	60
Gambar 3.30	Hasil inversi dengan menggunakan ModelHVSRR (Mufida dkk, 2013).....	60
Gambar 4.1	Peta lokasi pengukuran mikrotremor berdasarkan satuan geologi.....	62
Gambar 4.2	Contoh data hasil pengukuran mikrotremor.....	65
Gambar 4.3	Proses windowing data mikrotremor.....	66
Gambar 4.4	Kurva H/V setelah dilakukan proses transformasi fourier (Harlianto, 2013).....	67
Gambar 4.5	Kurva H/V setelah dilakukan penghalusan Konno-Omachi.....	67
Gambar 4.6	Sebaran data bor di Kota Bengkulu.....	69
Gambar 4.7	Diagram alir penelitian keseluruhan.....	71
Gambar 4.8	Diagram alir pengolahan frekuensi dominan, faktor amplifikasi dan indeks kerentanan seismik.....	72
Gambar 4.9	Diagram alir pengolahan ketebalan sedimen.....	73
Gambar 4.10	Diagram alir pengolahan PGA di permukaan.....	73
Gambar 4.11	Diagram alir pengolahan Vs30.....	74
Gambar 4.12	Diagram alir pengolahan <i>ground shear strain</i>	75
Gambar 4.13	Diagram alir pengolahan <i>ground shear strain</i> perlapisan.....	76
Gambar 5.1	<i>Waveform</i> mikrotremor.....	77
Gambar 5.2	Seleksi <i>waveform</i>	77

Gambar 5.3	Kurva H/V rata-rata (garis warna hitam) dan kurva H/V untuk tiap <i>waveform</i> yang diseleksi (garis berwarna).....	78
Gambar 5.4	Kurva H/V.....	78
Gambar 5.5	Pengolahan inversi v_s per lapisan dengan Model HVSR.....	80
Gambar 5.6	<i>Waveform</i> percepatan gempa Landers.....	80
Gambar 5.7	Input data percepatan <i>software</i> NERA.....	81
Gambar 5.8	Input <i>soil profile</i> pada <i>software</i> NERA.....	81
Gambar 5.9	Peta sebaran frekuensi dominan.....	84
Gambar 5.10	Peta faktor amplifikasi.....	84
Gambar 5.11	Peta indeks kerentanan seismik di Kota Bengkulu.....	85
Gambar 5.12	Peta Topografi Kota Bengkulu.....	86
Gambar 5.13	Peta sebaran indeks kerentanan seismik Kab.Bengkulu Utara (Harlianto, 2013).....	87
Gambar 5.14	Sebaran kerusakan akibat gempa Bengkulu 2007 pada Peta Indeks Kerentanan Seismik.....	88
Gambar 5.15	Peta <i>Ground Shear Strain</i>	90
Gambar 5.16	Sebaran kerusakan dan <i>Ground Shear Strain</i> akibat gempa Bengkulu 2007	91
Gambar 5.17	Peta PGA Kanai.....	92
Gambar 5.18	Peta ShakeMap Gempa Bengkulu 2007 (USGS, 2007).....	93
Gambar 5.19	Sebaran kerusakan dan PGA Kanai akibat gempa Bengkulu 2007.....	94
Gambar 5.20	Sketsa lokasi 1 dan 2 serta perbedaan periode dominan pada lokasi 1 dan 2.....	95
Gambar 5.21	Peta V_{s30} di Kota Bengkulu.....	96
Gambar 5.22	Peta V_{s30} di Kota Bengkulu (USGS, 2014).....	97
Gambar 5.23	Peta Ketebalan Sedimen di Kota Bengkulu.....	98
Gambar 5.24	Grafik hubungan ketebalan sedimen dan frekuensi dominan...	99
Gambar 5.25	Hubungan antara penelitian ini (garis warna merah dan sebaran data warna merah) dengan penelitian	

Daryono (2011) dengan garis warna biru dan sebaran data warna biru	99
Gambar 5.26 Peta lokasi perhitungan <i>Ground Shear Strain</i> perlapisan.....	100
Gambar 5.27 Respon Spektra target pada lokasi 1 dan 2.....	101
Gambar 5.28 Penskalaan Spektra Desain Lokasi 1.....	102
Gambar 5.29 <i>Time History</i> percepatan desain lokasi 1.....	102
Gambar 5.30 Penskalaan Spektra Desain Lokasi 2.....	103
Gambar 5.31 <i>Time History</i> percepatan desain lokasi 2.....	103
Gambar 5.32 Grafik perbandingan ground shear strain antara lokasi 1 dan 2	105
Gambar 5.33 Perbandingan Shear Modulus Maximum (G_{max}).....	106

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN A	Peta Lokasi Pengukuran Mikrotremor
LAMPIRAN B	<i>Waveform</i> Mikrotremor Data Primer
LAMPIRAN C	Kurva H/V
LAMPIRAN D	Data Bor NPT, Sondir dan Lithologi
LAMPIRAN E	Perhitungan indeks kerentanan seismik dan <i>ground shear strain</i>
LAMPIRAN F	Perhitungan PGA

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

a_b	percepatan getaran di <i>bedrock</i>
A_g	faktor amplifikasi
A_{gd}	faktor perbesaran <i>displacement</i>
A_{gk}	faktor perbesaran kecepatan getaran
A_{ga}	faktor perbesaran percepatan getaran
A_m	simpangan maksimum
a_s	percepatan getaran di <i>surface</i> (permukaan)
Δ	jarak hiposenter
d_b	<i>displacement</i> di <i>bedrock</i>
d_s	<i>displacement</i> di <i>surface</i> (permukaan)
Es	besarnya pengaruh gelombang Rayleigh
f_g	frekuensi dominan tanah
G	modulus geser
γ	<i>ground shear strain</i>
γ_c	<i>cyclic shear strain</i>
G_{max}	modulus geser maksimum
G_{sec}	<i>secant shear modulus</i>
$G(T)$	faktor perbesaran/faktor amplifikasi
h	ketebalan sedimen
k_b	kecepatan getaran di <i>bedrock</i>
K_g	indeks kerentanan seismik
k_s	kecepatan getaran di <i>surface</i> (permukaan)
λ	panjang gelombang
M	magnitude
η	viskositas
S_{HS}	spektra fourier komponen horisontal di lapisan tanah permukaan
S_{HB}	spektra fourier komponen horisontal di <i>bedrock</i>
S_{VS}	spektra fourier komponen vertikal di lapisan tanah permukaan
S_{VB}	spektra fourier komponen vertikal di <i>bedrock</i>
S_{TT}	pendekatan Fungsi transfer gelombang SH

τ_c	<i>cyclic shear stress</i>
t	waktu
T	periode
T_g	periode dominan tanah
T_H	fungsi transfer gelombang SH dari bedrock ke lapisan tanah permukaan
T_m	periode maksimum
v_p	kecepatan gelombang P
v_s	kecepatan gelombang geser
v_{sb}	kecepatan gelombang geser di <i>bedrock</i>
v_{ss}	kecepatan gelombang geser di permukaan
W_d	energi disipasi
W_s	energi regangan maksimum
V_{s30}	kecepatan rata-rata gelombang s sampai kedalaman 30 m
ρ	densitas
ξ	damping ratio
z	kedalaman

ABSTRAK

Kota Bengkulu merupakan daerah yang rawan terjadinya gempabumi. Salah satu cara untuk mengurangi dampak bencana dari gempabumi yaitu dengan mengetahui daerah-daerah yang rentan terhadap kerusakan tanah. Saat ini getaran alami tanah (*mikrotremor*) dapat dimanfaatkan untuk mengetahui potensi kerusakan tanah. Kerusakan tanah ini ditentukan berdasarkan nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g), *Peak Ground Acceleration* (PGA) dan *Ground Shear Strain* (γ). Dalam penelitian ini gempabumi yang dianalisa ialah gempa Bengkulu 12 September 2007. Dengan magnitudo 8.4 SR, lokasi : 4.44 LS - 101.37 BT dan kedalaman 34 km. Lokasi pengukuran mikrotremor berada di Kota Bengkulu yang berjumlah 52 titik pengukuran dengan tambahan data sekunder berjumlah 15 data.

Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Metode ini dapat memberikan parameter faktor amplifikasi (A_g), frekuensi dominan (F_g), indeks kerentanan seismik (K_g) dan *ground shear strain* (γ). Selanjutnya perhitungan PGA dihitung dengan menggunakan atenuasi Kanai (1966). Nilai Vs30 diperoleh dari hasil inversi kurva H/V dengan *software* ModelHVSR (Herak, 2007). Berdasarkan hasil penelitian menunjukkan bahwa di daerah sekitar pantai Kecamatan Muara Bangkahulu memiliki nilai indeks kerentanan seismik yang paling besar yakni 28.34. Sedangkan nilai *Ground Shear Strain* terbesar saat terjadi gempa Bengkulu 12 September 2007 yaitu di wilayah sekitar pantai Kecamatan Kampung Melayu yakni 0.0028. Nilai PGA terbesar berada di wilayah Kecamatan Teluk Segara yakni 789 gal. Dengan melihat sebaran kerusakannya menunjukkan adanya hubungan antara tingkat kerusakan dengan indeks kerentanan seismik (K_g), *ground shear strain* (γ) dan PGA. Dengan begitu tingkat kerusakan akibat gempa dapat ditentukan dari parameter indeks kerentanan seismik (K_g), *ground shear strain* (γ) dan PGA.

Kata Kunci : HVSR, *Ground Shear Strain* (γ), *Peak Ground Acceleration* (PGA), Mikrotremor, Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

ABSTRACT

Bengkulu city is an area that is prone to earthquakes . One way to reduce the impact of the earthquake disaster is to knowing the areas that are susceptible to damage the soil . Currently the natural vibration ground (microtremor) can be used to determine the potential damage to the soil. Soil damage is determined based on the value of seismic vulnerability index (K_g) , Peak Ground Acceleration (PGA) and Ground Shear Strain (γ) . In this study analyzed the earthquake is an earthquake in Bengkulu September 12, 2007. The magnitude 8.4 SR , location : 4:44 LS - 101.37 BT and a depth of 34 km . Microtremor measurement locations are in the city of Bengkulu , amounting to 52 measuring points with additional secondary 15 data.

Microtremor data processing using HVSR method (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) . This method can provide amplification factor parameter (A_g) , the dominant frequency (f_g) , seismic vulnerability index (K_g) and ground shear strain (γ) . Further PGA calculation is calculated by using the attenuation Kanai (1966) . Vs30 values obtained from the inversion curve H / V with software ModelHVSR (Herak, 2007) . Based on the results of the study showed that in the area around the beach Muara Bangkahulu has an index value of the seismic vulnerability of the greatest namely 28.34 . While the value of the largest ground shear strain during the earthquake Bengkulu 12 September 2007 , in the area around the beach District of Kampung Melayu namely 0.0028 . PGA values were greatest in the Segara Gulf region district 789 gal . By looking at the distribution of the damage suggests a correlation between the level of damage to the seismic vulnerability index (K_g) , ground shear strain (γ) and PGA . With that level of damage caused by the earthquake can be determined from the parameters of the seismic vulnerability index (K_g) , ground shear strain (γ) and PGA .

Keyword : HVSR, Ground Shear strain (γ), Peak Ground Acceleration (PGA), Mikrotremor, Seismic Vulnerability Index (K_g)

BAB I

PENDAHULUAN

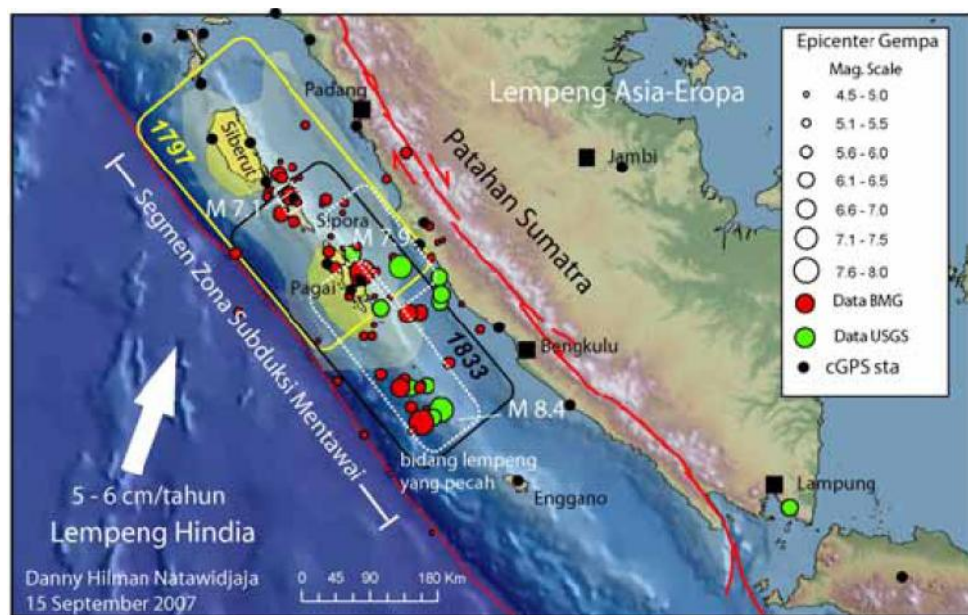
1.1 Latar Belakang

Provinsi Bengkulu merupakan daerah yang berada di sepanjang pantai barat Sumatera. Letaknya secara geografis pada posisi 2° 6' – 3° 31' LS dan 101° 1' - 103°41' BT. Pada Gambar 1.1 dapat terlihat bahwa Provinsi Bengkulu di sebelah utaranya berbatasan dengan Provinsi Sumatera Barat, di sebelah barat berbatasan dengan samudra Hindia, di sebelah selatan berbatasan dengan Provinsi Lampung serta sebelah timur berbatasan dengan Provinsi Jambi dan Provinsi Sumatera Selatan. Provinsi Bengkulu terdiri dari 10 Kabupaten/Kota yaitu : Kota Bengkulu, Kab. Bengkulu Tengah, Kab. Kepahiang, Kab. Lebong, Kab. Muko-Muko, Kab. Seluma, Kab. Kaur, Kab. Bengkulu Utara, Kab. Rejang Lebong dan Kab. Bengkulu Selatan (BPS Pemrov Bengkulu, 2013).



Gambar 1.1 Peta Provinsi Bengkulu dan Peta Kota Bengkulu (Bakosurtanal, 2000)

Kota Bengkulu merupakan ibukota Provinsi Bengkulu. Pada daerah ini terdapat beberapa fasilitas penting yaitu adanya pusat pendidikan, pusat pemerintahan dan pusat perekonomian. Jumlah penduduk di Kota Bengkulu juga merupakan yang terbesar dibandingkan dengan beberapa kabupaten yang ada di Provinsi Bengkulu yaitu 319.098 jiwa (BPS Kota Bengkulu, 2013). Tetapi di sisi lain Kota Bengkulu berada dekat dengan zona subduktsi aktif pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia serta patahan aktif mentawai. Zona subduksi dan patahan aktif merupakan daerah yang sering menimbulkan gempabumi. Karena jumlah penduduknya yang cukup besar dan berada dekat daerah aktif gempabumi maka Kota Bengkulu menjadi daerah berisiko tinggi terkena dampak dari gempabumi.



Gambar 1.2 Peta Potensi Akumulasi Energi Gempa di Mentawai (Natawidjaya, 2007)

Gempa yang terjadi di sekitar Provinsi Bengkulu dikarenakan adanya zona subduksi. Zona subduksi ini merupakan daerah tumbukan antara dua buah lempeng dan zona subduksi di wilayah pantai barat Sumatera terbilang cukup aktif. Hal ini dikarenakan pergerakan lempeng Indo-Australia yang menunjam di bawah lempeng Eurasia bergerak sebesar 50 – 60 cm / tahun dengan kemiringannya yaitu 12° (Natawidjaya, 2007). Aktivitas kegempaan di daerah subduksi ini dapat mencapai kedalaman 300 km di bawah Pulau Sumatera. Pada

Gambar 1.2 terlihat bahwa akumulasi energi regangan pada wilayah barat sumatera terbagi menjadi beberapa bagian. Pada wilayah yang dibatas garis putih putus-putus yang berada disebelah barat Kota Bengkulu menunjukkan daerah yang terkunci antara lempeng Indo-australia dan Eurasia. Di wilayah ini pernah menimbulkan gempa sebesar 8.4 SR yang terjadi pada 12 September 2007. Gempa yang terjadi ini terasa di Bengkulu VI MMI, di Padang V MMI, di Lampung, Palembang, Pekanbaru dan Sibolga IV MMI, di Jambi III MMI, di Medan, Banten dan Serang II MMI, di Jakarta, Bekasi dan Kuningan III MMI dan sampai ke Malaysia III MMI.

Gempa yang terjadi pada tanggal 12 September 2007 ini mengakibatkan korban meninggal 25 orang, korban luka-luka 161 orang dan kerusakan bangunan yang ditimbulkannya yaitu 56.425 bangunan. Gempa yang terjadi juga menimbulkan tsunami walaupun hanya beberapa sentimeter saja (BMKG, 2012). Kemudian terjadi lagi pada tanggal 13 september 2007 gempa dengan magnitude 7.9 SR. Gempa ini terjadi akibat dipicu keaktifan segmen yang dibawahnya pada segmen yang dikelilingi garis putih putus-putus di sebelah pulau pagai (Gambar 1.2). Gempa besar lainnya akibat aktivitas zona subduksi yaitu terjadi pada tanggal 4 Juni 2000 dengan Skala magnitude 7.3 SR di posisi 4.7 LS – 102 BT dan kedalaman 33 km. Getaran gempa ini terasa di Bengkulu VI MMI, di Lampung dan Palembang IV MMI, di Jakarta III MMI serta terasa juga di Singapura dan Malaysia. Korban meninggal akibat gempa 90 orang serta korban luka-luka 1782 orang dan kerusakan bangunan mencapai.

Selain dari zona subduksi sumber gempa lainnya yaitu berasal dari Sesar Besar Sumatera (*Great Sumatera Fault*). Sesar ini berada di darat yang melewati dari P. Weh Aceh sampai ke Teluk Semangko Lampung (Gambar 1.2). Pergerakan sesar ini 10 sampai 30 mm/tahun. Patahan ini merupakan sesar geser ke kanan (dextral strike-slip fault). Gempa yang ditimbulkan akibat keaktifan sesar ini pernah terjadi di Bengkulu yaitu pada 18 Agustus 1938 yang terasa sampai ke Sumatera Barat dan Palembang tetapi catatan mengenai besarnya kekuatannya belum diketahui secara jelas. Selanjutnya pada tanggal 15 Desember 1979 terjadi gempa dengan magnitude 5.8 SR posisinya di Kepahiang – Bengkulu. Akibatnya

8 orang meninggal dan korban luka-luka 162 orang. Kerusakan bangunan mencapai 2500 rumah akibat gempa ini.

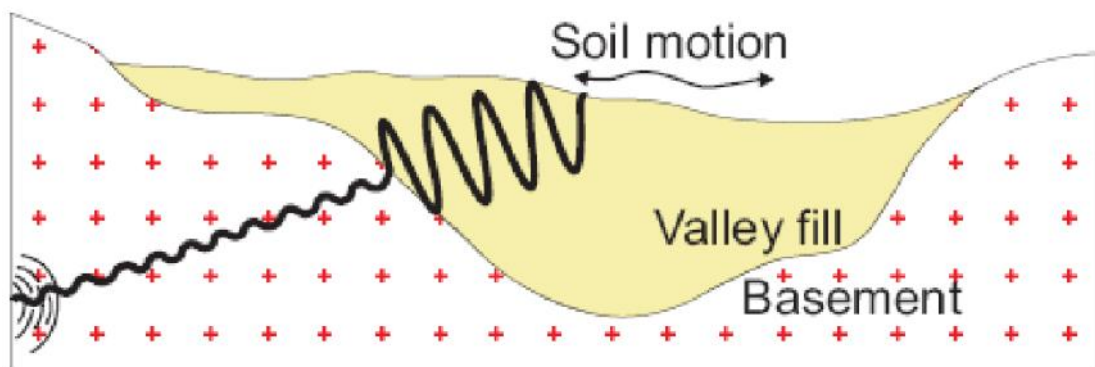
Gempa akibat Sesar Besar Sumatera dapat dilihat pada Gambar 1.3. Pada gambar dapat dilihat sebaran gempa merusak yang pernah terjadi di Provinsi Bengkulu. Garis-garis yang berwarna hitam di daratan merupakan segmen sesar besar sumatera. Gempa ditandai dengan simbol lingkaran merah sedangkan simbol bintang menunjukkan gempa yang disertai kejadian tsunami. Dari sini dapat terlihat bahwa Provinsi Bengkulu merupakan daerah yang rawan terjadi gempabumi dan Kota Bengkulu sebagai ibu kota Provinsi perlu mendapat perhatian lebih terhadap dampak bencana gempabumi karena jumlah penduduk di Kota Bengkulu yang cukup besar dan beberapa fasilitas penting pemerintahan banyak berada di sini.



Gambar 1.3 Peta Gempa Merusak dan Tsunami di Bengkulu (BMKG,2012)

Mitigasi bencana merupakan langkah terbaik untuk mengurangi dampak bencana gempabumi. Dengan melakukan pemetaan daerah yang memiliki tingkat kerusakan dan potensi kerusakan yang tinggi maka dapat menjadi masukan kepada pemerintah daerah terhadap perencanaan tata ruang berbasis kebencanaan. Bentuk mitigasi terhadap gempabumi yakni dengan memperhitungkan geologi lokal yang berpengaruh terhadap *ground motion* di permukaan tanah. Pengaruh geologi lokal biasanya disebut juga dengan *site effect*.

Pengaruh dari *site effect* dapat memperbesar (mengamplifikasi) *ground motion* dipermukaan tanah yang dampaknya dapat memperbesar tingkat kerusakan. Proses terjadinya amplifikasi ini yaitu gelombang gempa menjalar dari kecepatan tinggi ke kecepatan rendah (sedimen). Selanjutnya, terjadi multi-refleksi gelombang yang terjadi pada sedimen sehingga berakibat pada terjadinya amplifikasi amplitudo gelombang (Sungkono, 2011).



Gambar 1.4 Penjalaran gelombang seismik dari kecepatan tinggi menuju kecepatan rendah (Schuler dalam Sungkono, 2011).

Besarnya kecilnya amplifikasi ini sebanding dengan kerusakan yang ditimbulkan. Pengaruh ini dapat dilihat pada gempabumi di bantul 2006, kerusakan di Desa Ngajaran, Desa Sidomulyo, Desa Bambanglipuro, Bantul, Parangtritis yang memiliki jarak terhadap sumber gempa hanya 10 km dari sumber gempa tidak mengalami kerusakan yang signifikan tetapi di daerah Kecamatan Cawas, Kecamatan Bayat dan Kecamatan Trucuk yang berjarak 50 km dari sumber gempa terjadi kerusakan yang tinggi (Irfani, 2014).

Saat ini getaran mikrotremor dapat digunakan untuk mendapatkan beberapa parameter fisis dari *site effect*. Metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) merupakan salah satu metode yang memanfaatkan getaran mikrotremor. Metode ini dapat memberikan hasil parameter fisis berupa periode dominan, faktor amplifikasi dan indeks kerentanan seismik. Metode ini relatif mudah dilakukan karena dalam proses akuisisi datanya tidak membutuhkan sumber getar aktif melainkan hanya getaran mikrotremor saja. Hasil akhir pengolahan ini dapat berupa indeks kerentanan seismik, *Ground Shear Strain* dan PGA. Indeks kerentanan seismik, *Ground Shear Strain* dan PGA merupakan beberapa parameter yang dapat menggambarkan tingkat kerusakan akibat gempa.

Metode HVSR pertama kali dikembangkan oleh Nogoshi dan Iragashi (1971) dan kemudian dikembangkan oleh Nakamura (1989, 2000, 2008). Di Indonesia metode HVSR juga dikembangkan untuk melihat variasi satuan bentuk lahan terhadap kerusakan akibat gempa bantul (Daryono, 2011). Hasil dari penelitian ini menunjukkan adanya korelasi antara indeks kerentanan, *Ground Shear Strain* dan PGA dengan tingkat kerusakan yang ditimbulkan oleh gempabumi. Pada daerah yang memiliki nilai indeks kerentanan, *Ground Shear Strain* dan PGA yang tinggi mudah mengalami kerusakan sedangkan pada daerah yang memiliki nilai indeks kerentanan seismik, *Ground Shear Strain* dan PGA yang rendah tidak mengalami kerusakan. Berdasarkan dari uraian diatas maka dengan mengukur parameter indeks kerentanan seismik, *Ground Shear Strain* dan PGA di Kota Bengkulu diharapkan dapat menjadi acuan untuk mengetahui potensi kerusakan yang akan terjadi dan hal ini dapat menjadi masukan bagi pemerintah untuk mengurangi dampak bencana gempabumi.

1.2 Perumusan Masalah

Perumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut ini :

1. Bagaimana hubungan antara Indeks Kerentanan Seismik (K_g), *Ground Shear Strain* (γ), dan PGA dipermukaan dengan kerusakan yang pernah terjadi di Kota Bengkulu ?

2. Bagaimana sebaran Indeks Kerentanan Seismik, *Ground Shear Strain*, PGA dipermukaan, Ketebalan Sedimen, Faktor Amplifikasi, Frekuensi Dominan, dan Vs30 di Kota Bengkulu ?
3. Bagaimana variasi *Ground Shear Strain* pada tiap kedalaman di Kota Bengkulu ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian adalah untuk mengetahui :

1. Hubungan hubungan antara Indeks Kerentanan Seismik, *Ground Shear Strain* dan PGA dipermukaan dengan kerusakan yang pernah terjadi di Kota Bengkulu;
2. Sebaran Indeks Kerentanan Seismik, *Ground Shear Strain*, PGA dipermukaan, Ketebalan Sedimen, Faktor Amplifikasi, Frekuensi Dominan, dan Vs30 di Kota Bengkulu; dan
3. Variasi *Ground Shear Strain* pada tiap kedalaman di Kota Bengkulu.

1.4 Manfaat Penelitian

Dengan mengetahui potensi kerusakan suatu daerah diharapkan dapat menjadi masukan untuk Pemerintah dalam penataan tata ruang wilayah di wilayah Kota Bengkulu dan Sekitarnya. Kemudian diharapkan hasil dari penelitian ini dapat memberikan kontribusi terhadap perkembangan penelitian mikrotremor selanjutnya.

1.5 Batasan Masalah

Supaya penelitian tidak terlalu melebar, maka batasan masalah disusun sebagai berikut :

1. Gempa yang merusak di dasarkan pada gempa yang terakhir terjadi yaitu pada tanggal 12 september 2007 dengan posisi di 4.44 LS - 101.37 BT dan magnitude 8.5 SR dan gempabumi ini termasuk jenis *Maximum Design Earthquake (MDE)*.
2. Daerah pengukuran mikrotremor dilakukan di wilayah administratif Kota Bengkulu.
3. Kerusakan yang dimaksud dalam penelitian ini merupakan kerusakan tanah.

4. *Time History* Percepatan Gempa Landers yang telah di *Spectral Matching* dianggap sama dengan *Time History* Gempa Bengkulu 12 September 2007.
5. *Ground Shear Strain* dengan konsep Nakamura diasumsikan tidak ada redaman.
6. Nilai densitas terhadap kedalaman variasinya diasumsikan sangat kecil sehingga antara densitas di permukaan dan di *bedrock* dianggap sama pada konsep Nakamura.
7. Pada lapisan *bedrock*, *displacement* getaran arah vertikal diasumsikan sama dengan arah horisontal.
8. Periode gempa diasumsikan sama dengan periode dominan tanah untuk menghitung PGA dengan atenuasi Kanai (1966).

1.6 Definisi Operasional

Gempabumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba yang ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Potensi kerusakan adalah kecenderungan untuk mengalami kerusakan akibat gempabumi yang ditentukan berdasarkan Indeks Kerentanan Seismik (Kg), *Ground Shear Strain* (γ) dan *Peak Ground Acceleration* (PGA).

Maximum Design Earthquake (MDE) adalah magnitude gempa maximum atau ekuivalen level percepatan tanah yang dipakai untuk desain ataupun mengevaluasi struktur bangunan. *Maximum Design Earthquake* tersebut dipakai untuk maksud kinerja struktur-biasa (*ordinary structures*) maksimum mencapai *moderate damage*.

HVSR adalah metode perbandingan spektra horisontal dengan spektra vertikal. Metode ini digunakan untuk menentukan parameter bawah permukaan seperti frekuensi dominan dan faktor amplifikasi.

Geologi adalah ilmu pengetahuan tentang Bumi khususnya terhadap batuan dan tanah yang membentuk Bumi, asalnya, sifat, sebarannya, prosesnya dan formasinya (Hencer, 2012).

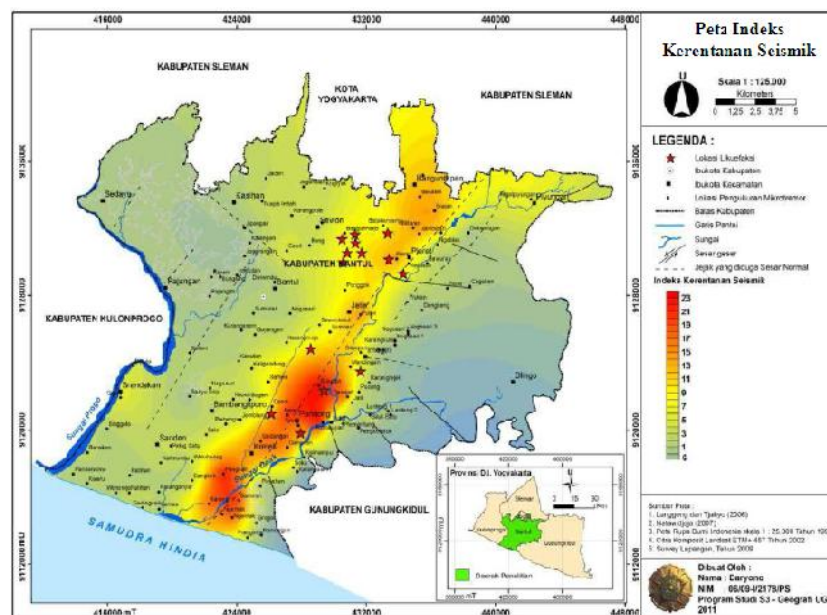
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian mengenai mikrotremor sudah dilakukan di wilayah Indonesia. Cakupan penelitian ini yaitu penentuan indeks kerentanan seismik, *ground shear strain*, PGA, ketebalan sedimen dan Vs30. Parameter diatas digunakan untuk menentukan besarnya pengaruh tingkat kerusakan akibat gempabumi.

2.1 Penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya

2.1.1 Daryono (2011) melakukan penelitian untuk mengetahui karakteristik indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuk lahan dan mengetahui persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul. Nilai rata-rata indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuk lahan berubah mengikuti satuan bentuk lahan tersebut, nilai rata-rata indeks kerentanan seismik tertinggi terdapat pada satuan bentuk lahan dataran fluviovulkanik merapi muda, sedangkan nilai rata-rata indeks kerentanan seismik terendah terdapat pada bentuk lahan perbukitan dengan struktur formasi Sentolo (Gambar 2.1).



Gambar 2.1 Peta Indeks Kerentanan Seismik (Daryono, 2011)

2.1.2 Hadi dkk (2012) melakukan penelitian yang berjudul “Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Kerentanan Seismik Akibat Gempa Bumi untuk Mendukung Tata Ruang dan Wilayah (RTRW) Kota Bengkulu” hasil dari penelitian ini yakni Peta PGA di Kota Bengkulu serta Peta Indeks Kerentanan Seismik. Perhitungan PGA didasarkan atas rumus empiris Mc Giurre R.K. serta Indeks Kerentanan Seismik di hitung dengan metode HVSr. Besarnya PGA di tiap Kecamatan dapat dilihat pada Gambar 2.2 dan nilainya dapat dilihat pada Tabel 2.1.



Gambar 2.2 Peta Percepatan Tanah Kota Bengkulu (Hadi dkk, 2012)

Nilai PGA yang diperoleh ini berdasarkan pendekatan rumus empiris Mc Giurre R.K. dan kejadian gempa di hitung berdasarkan data gempa periode 40 tahun (1971-2011). Karena pendekatan rumus empiris McGuire R.K hanya untuk menaksir PGA di *bedrock* maka Peta PGA ini belum memperhitungkan faktor geologi permukaan yang mempengaruhi karakter gelombang seismik. Besarnya nilai PGA hanya dipengaruhi oleh besarnya nilai magnitude gempa dan jarak titik pengamatan ke hiposenter (sumber gempa). Semakin besar nilai magnitude gempa dan semakin dekat dengan lokasi sumber maka nilai PGAny akan semakin besar dan sebaliknya. Perhitungan PGA ini dirata-ratakan sehingga tiap satu Kecamatan hanya memiliki satu nilai PGA saja sehingga hasil ini kurang mencerminkan sebaran PGA tiap daerah di Kota Bengkulu.

Tabel 2.1 Nilai PGA Rerata dan Indeks Kerentanan Seismik di Kota Bengkulu
(Hadi dkk, 2012)

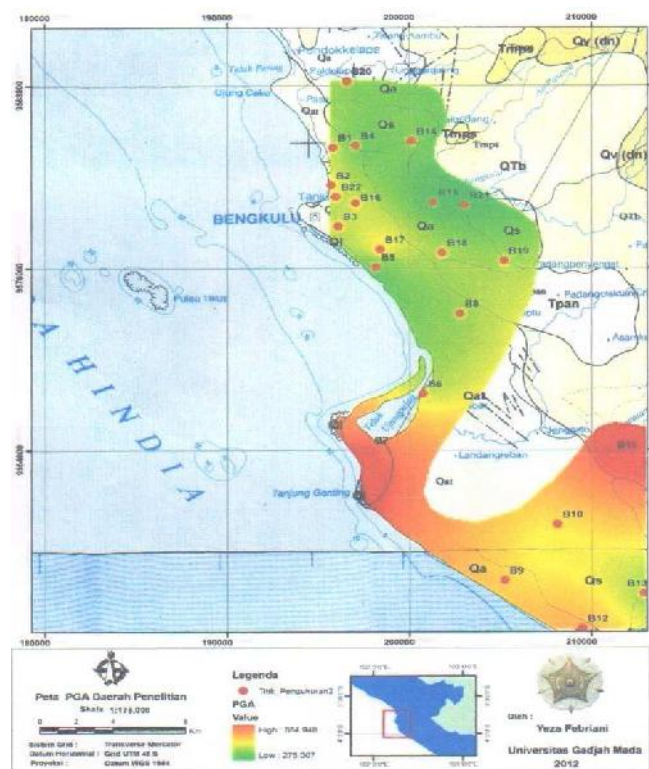
No	Lintang	Bujur	PGA Rerata (gal)	Indeks Kerentanan Seismik	Kecamatan
1	-3,80	102,27	297,30	3,24	Ratu Samban
2	-3,79	102,26	297,31	3,24	Teluk Segara
3	-3,76	102,28	297,29	0,65	Muara Bangkahulu
4	-3,91	102,32	300,47	5,81	Kampung Melayu
5	-3,88	102,34	300,45	2,36	Selebar
6	-3,83	102,29	297,28	6,33	Gading Cempaka
7	-3,81	102,29	297,28	10,86	Ratu Agung
8	-3,78	102,29	297,28	0,93	Sungai Serut

Dari hasil penelitian ini juga diperoleh Peta Indeks Kerentanan Seismik seperti yang tampak pada Gambar 2.3. Adanya variasi nilai indeks kerentanan seismik ini merupakan pengaruh dari kondisi geologi di Kota Bengkulu. Daerah yang memiliki nilai indeks kerentan seismik yang tinggi maka tingkat risiko akibat gempabumi terhadap kerusakan akan semakin tinggi. Karena sebaran data indeks kerentanan seismiknya hanya satu tiap satu kecamatan maka Peta Kontur Indeks Kerentanan Seismiknya masih kurang detail dalam menggambarkan kontur indeks kerentanan tiap daerah di Kota Bengkulu.



Gambar 2.3 Peta Indeks Kerentanan Seismik Kota Bengkulu (Hadi dkk, 2012)

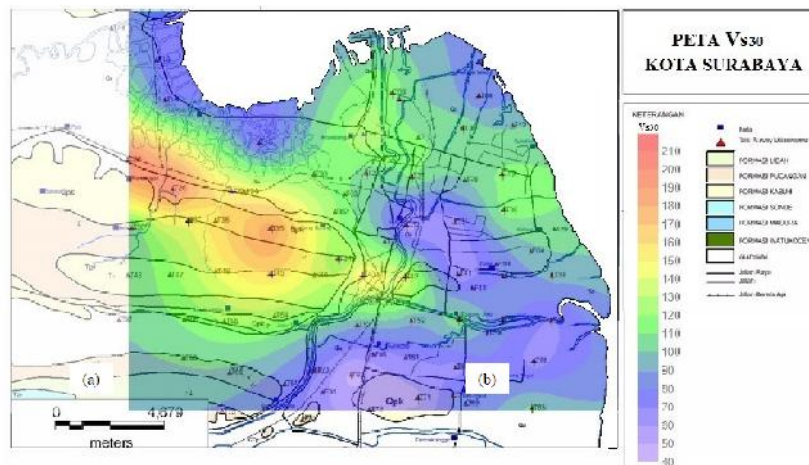
2.1.3 Febriani (2012) melakukan penelitian mengenai PGA akibat gempa Bengkulu 4 juni 2000. Penelitian ini menggunakan rumus empiris Kanai. Dalam perhitungan dengan rumus ini menggunakan data frekuensi dominan yang diperoleh dari metode HVSR. Data pengukuran mikrotremor sudah lebih rapat dibandingkan penelitian Hadi dkk (2012). Berdasarkan hasilnya diperoleh bahwa nilai PGA bervariasi antara 292 – 852 gal, nilai PGA yang terbesar berada pada formasi Bintunan dan Batugamping Terumbu sedangkan nilai PGA terkecil berada pada lithologi alluvial, endapan rawa dan undak alluvial seperti yang terlihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Peta PGA di Kota Bengkulu (Febriani, 2012)

2.1.4 Mufida dkk (2013) melakukan penelitian yang berjudul “Profiling Kecepatan Gelombang Geser (v_s) Surabaya Berdasarkan Pengolahan Data Mikrotremor”. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengestimasi nilai sebaran kecepatan gelombang geser (v_s) dengan menggunakan data mikrotremor. Data mikrotremor ini diolah dengan metode HVSR selanjutnya mendapatkan kurva HVSR dari kurva ini kemudian di inversi untuk mendapatkan sebaran nilai

v_s . Kemudian dengan menghitung V_{s30} tiap hasil inversi dapat diketahui klasifikasi tipe tanahnya. Dari hasil penelitian ini diperoleh bahwa klasifikasi tanah di wilayah Surabaya terdiri atas lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai V_s tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antara 5 m dan 20 meter, dengan V_s tipe tanah D menyebar pada hampir seluruh wilayah Surabaya terkecuali bagian tengah ke arah barat yang memiliki V_s tipe tanah C.

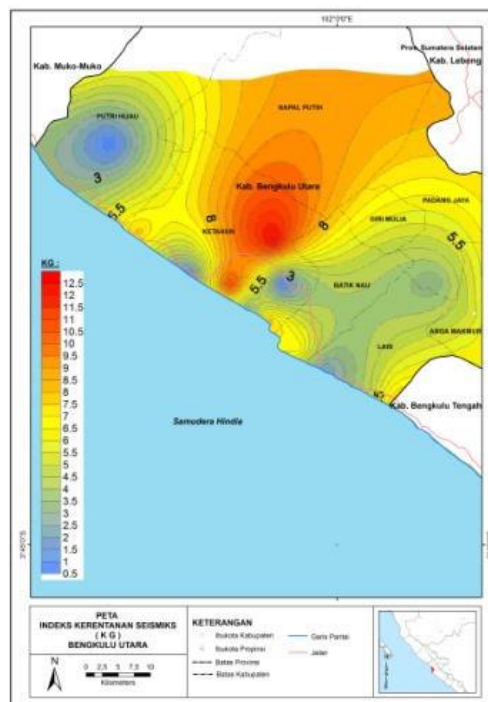


Gambar 2.5 Peta V_{s30} Kota Surabaya (Mufida dkk, 2013)

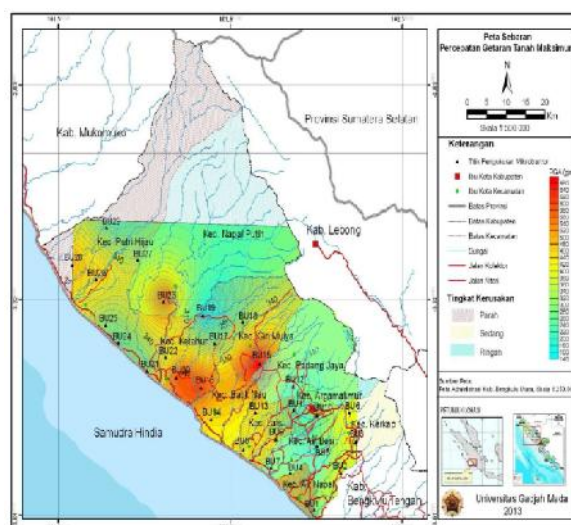
2.15 Farid dkk (2013) melakukan penelitian mengenai perubahan garis pantai dan hubungannya dengan indeks kerentanan seismik di Pantai Bengkulu Utara. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan abrasi pada beberapa lokasi yang menyebabkan perubahan garis pantai dan mengetahui variasi indeks kerentanan seismik pada beberapa pantai di Bengkulu Utara. Hasil yang diperoleh yaitu indeks kerentanan seismik bervariasi antara 1.2 - 1.6 dan kecepatan abrasi antara 1.4 – 5.7 meter/tahun. Pada pantai yang memiliki indeks kerentanan yang tinggi cenderung memiliki kecepatan abrasi yang cepat dan sebaliknya. Hasil distribusi indeks kerentanan seismik di Kab. Bengkulu Utara dapat dilihat pada Gambar 2.6.

2.1.6 Harlianto (2013) melakukan penelitian yang berjudul Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum, Indeks Kerentanan Seismik Tanah, *Ground Shear Strain* dan Ketebalan Lapisan Sedimen Untuk Mitigasi Bencana Gempabumi di Kabupaten Bengkulu Utara. Hasil yang diperoleh dari penelitian ini yaitu nilai PGA di lapisan tanah permukaan, K_g , γ yang rendah dan h yang tipis pada

umumnya terdapat pada Kecamatan Napal Putih, Argamakmur, dan Kerkap, yang mengalami tingkat kerusakan ringan. Sedangkan nilai PGA di lapisan tanah permukaan, K_g , γ yang tinggi dan h yang tebal pada umumnya terdapat pada Kecamatan Lais, Air Napal, Ketahun, dan Putri Hijau, yang mengalami tingkat kerusakan parah. Untuk lebih jelasnya mengenai distribusi PGA di Kab. Bengkulu Utara dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.6 Peta Indeks Kerentanan Seismik di Kab. Bengkulu Utara (Farid dkk, 2013)



Gambar 2.7 Peta PGA di permukaan Kab. Bengkulu Utara (Harlianto, 2013)

2.2 Keaslian Penelitian

Beberapa penelitian sejenis sebelumnya telah diidentifikasi. Masing-masing peneliti memiliki masalah, tujuan, metode, dan hasil yang berbeda. Pada penelitian yang dilakukan oleh Hadi, dkk (2012) di Kota Bengkulu ini titik pengukuran hanya di sampling satu tiap kecamatan dan data Peta Kecamatannya masih menggunakan Peta yang terdahulu sedangkan pada saat ini ada wilayah pemekaran Kecamatan baru yakni Kecamatan Singaran Pati sehingga hasilnya kurang merepresentasikan tiap kecamatan. Kemudian pada daerah penelitian yang sama Febriani (2012) hanya melakukan perhitungan PGA yang diakibatkan oleh gempa Bengkulu tahun 2000.

Penelitian sejenis lainnya memiliki daerah kajian yang berbeda (Daryono, 2011), (Mufida dkk, 2013), (Farid, 2013) dan (Harlianto, 2013). Dan ada hal-hal yang belum dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Berdasarkan pada hal tersebut diatas maka penelitian ini akan mengembangkan dan memperdalam penelitian sebelumnya. Sebagai rangkuman mengenai penelitian yang sebelumnya dan beberapa perbedaan mengenai penelitian sebelumnya dengan penelitian ini maka dibuatlah Tabel 2.2 untuk melihat perkembangan penelitian sejenis dan perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan sehingga keaslian penelitian ini dapat dipertanggung jawabkan

Tabel 2.2 Rangkuman penelitian sebelumnya dan perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan

Peneliti	Tahun	Daerah Penelitian	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Metode/ Pendekatan	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan.
Daryono	2011	Zona Graben Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta	Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuklahan di Zona Graben Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta	1.Mengetahui karakteristik indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuk lahan 2.Mengetahui persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuklahan di zona Graben Bantul.	1.Survei lapangan 2. Pendekatan Spasial 3. Pendekatan satuan bentuk lahan	1. Karakteristik indeks kerentanan seismik, ground shear-strain dan rasio kerusakan berubah mengikuti satuan bentuk lahan 2. Persebaran indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuk lahan menunjukkan bahwa variasi indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh material jenis penyusun, ketebalan sedimen dan kedalaman muka air tanah.	1.Daerah penelitiannya berbeda 2.Pemetaan Vs30 3. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain perlapisan
Hadi dkk	2012	Kota Bengkulu	Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Kerentanan Seismik Akibat Gempa Bumi untuk Mendukung Rencana Tata Ruang dan Wilayah (RTRW) Kota Bengkulu	Mengetahui nilai PGA sebagai parameter kekuatan getaran tanah akibat gempa bumi di beberapa titik di Kota Bengkulu dengan cara zonasi, menghitung indeks kerentanan seismik akibat gempa bumi di Kota Bengkulu dan membuat peta PGA dan kerentanan seismik akibat gempa bumi Kota Bengkulu	Survei lapangan	1. Semakin besar nilai magnitude gempa dan semakin dekat dengan lokasi sumber maka nilai PGAny akan semakin besar dan sebaliknya. 2. Adanya variasi nilai indeks kerentanan seimik ini merupakan pengaruh dari kondisi geologi di Kota Bengkulu. Daerah yang memiliki nilai indeks kerentan seismik yang tinggi maka tingkat risiko akibat gempabumi terhadap kerusakan akan semakin tinggi.	1. Lokasi titik pengukuran mikrotremor yang akan dilakukan lebih rapat. 2. Dilakukan perhitungan PGA di permukaan dengan pers. attenuasi Kanai 3. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain 4. Dilakukan pemetaan Vs30 5. Dilakukan pemetaan Faktor Amplifikasi 6. Dilakukan pemetaan Frekuensi Dominan
Febriani	2012	Kota Bengkulu	Pemetaan Nilai Peak Ground Acceleration (PGA) Dengan Menggunakan Metode Kanai Di Kota Bengkulu	Memetakan nilai PGA di Kota Bengkulu berdasarkan event gempa 4 juni 2000	Survei Lapangan	Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa Kota Bengkulu memiliki nilai PGA yang bervariasi dari 292 gal sampai 852 gal	1. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain perlapisan. 2. Lokasi titik pengukuran mikrotremor dilakukan lebih rapat. 3. Dilakukan pemetaan Vs30 4. Dilakukan pemetaan Indeks Kerentanan Seismik 5. Dilakukan pemetaan Frekuensi Dominan 6. Dilakukan pemetaan Faktor Amplifikasi

Mufida dkk	2013	Surabaya	Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Surabaya berdasarkan Pengolahan Data Mikrotremor	Menentukan Profil Vs bawah permukaan serta Vs30	Survei Lapangan	Kecepatan gelombang geser yang rendah (< 150 m /s) semakin menebal kearah utara dan arah selatan.	1. Daerah penelitiannya berbeda 2. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain. 3. Dilakukan pemetaan Indeks Kerentanan Seismik 4. Dilakukan pemetaan Frekuensi Dominan 5. Dilakukan pemetaan Faktor Amplifikasi
Farid dkk	2013	Bengkulu Utara	Shoreline Changes and Seismic Vulnerability Index in The Earthquake Prone Areas (The Case of Coastal North Bengkulu, Bengkulu Province-Indonesia)	1. Mengetahui kecepatan abrasi pada beberapa lokasi yang menyebabkan perubahan garis pantai 2. Mengetahui variasi indeks kerentanan seismik pada beberapa pantai di Bengkulu Utara	Survei Lapangan	Indeks kerentanan seismik bervariasi antara 1.2 - 1.6 dan kecepatan abrasi antara 1.4 – 5.7 meter/tahun. Pada pantai yang memiliki indeks kerentanan yang tinggi cenderung memiliki kecepatan abrasi yang cepat dan sebaliknya	1. Daerah penelitiannya berbeda 2. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain per lapisan. 3. Dilakukan pemetaan Vs30
Harlianto	2013	Bengkulu Utara	Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum, Indeks Kerentanan Seismik Tanah, Ground Shear Strain dan Ketebalan Lapisan Sedimen Untuk Mitigasi Bencana Gempabumi di Kabupaten Bengkulu Utara	Memetakan sebaran nilai percepatan getaran tanah maksimum (PGA) di lapisan tanah permukaan, indeks kerentanan seismik (Kg), ground shear strain (γ), dan ketebalan lapisan sedimen di wilayah Kabupaten Bengkulu Utara, yang menunjukkan tingkat kerawanan suatu daerah terhadap bahaya gempabumi	Survei Lapangan	Besarnya PGA di permukaan pada daerah Kab. Bengkulu Utara berkisar antara 152 – 672 gal. Nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0.3 – 15.5. Nilai Ground Shear Strain antara 4.4×10^{-5} – 2.5×10^{-3} . Ketebalan sedimen antara 6 – 127 m.	1. Dilakukan perhitungan Ground Shear Strain per lapisan. 2. Dilakukan pemetaan Vs30 dari inversi kurva HVSR.
Nurul Hidayat	2014	Kota Bengkulu dan Sekitarnya	Identifikasi potensi kerusakan di Kota Bengkulu dan Sekitarnya akibat gempabumi dengan metode HVSR	1. Mencari hubungan antara Indeks Kerentanan Seismik, Ground Shear Strain, PGA di permukaan dan kerusakan yang pernah terjadi di Kota Bengkulu dan sekitarnya 2. Mengetahui sebaran Indeks Kerentanan Seismik di Kota Bengkulu dan Sekitarnya	Survei Lapangan dan permodelan numerik	1. Mendapatkan hubungan antara indeks kerentanan seismik, Ground Shear Strain dan PGA dengan kerusakan yang pernah terjadi di Kota Bengkulu. 2. Peta Indeks Kerentanan Seismik 3. Peta Ground Shear Strain 4. Variasi Ground Shear Strain	Penelitian yang akan dilakukan

			<p>3. Mengetahui sebaran Ground Shear Strain di Kota Bengkulu dan Sekitarnya</p> <p>4. Mengetahui variasi Ground Shear Strain per lapisan di Kota Bengkulu dan Sekitarnya</p> <p>5. Mengetahui variasi PGA di permukaan</p> <p>6. Mengetahui variasi Faktor Amplifikasi</p> <p>7. Mengetahui variasi Faktor Dominan di Kota Bengkulu dan Sekitarnya</p> <p>8. Mengetahui variasi ketebalan sedimen di Kota Bengkulu dan Sekitarnya.</p> <p>9. Mengetahui Variasi Vs30 di Kota Bengkulu dan Sekitarnya</p>		<p>per lapisan</p> <p>5. Peta PGA di permukaan</p> <p>6. Peta Faktor Amplifikasi</p> <p>7. Peta Frekuensi Dominan</p> <p>8. Peta Ketebalan Sedimen</p> <p>9. Peta Vs30</p>	
--	--	--	---	--	--	--

BAB III

LANDASAN TEORI

3.1 Kerusakan akibat gempabumi

Kerusakan merupakan perubahan bentuk atau aset fisik dan infrastruktur milik pemerintah, masyarakat, keluarga dan badan usaha sehingga terganggu fungsinya secara parsial atau total sebagai akibat langsung dari suatu bencana (BNPB, 2011). Kerusakan akibat gempa dapat berupa kerusakan struktur tanah ataupun kerusakan sesuatu diatas tanah. Beberapa jenis kerusakan itu yaitu :

1. Likuifaksi

Likuifaksi adalah berkurangnya/hilangnya daya dukung tanah pasir akibat berkurangnya/hilangnya tekanan antara butir-butir pasir (inter-granular stress). Gempabumi akan menimbulkan gerakan siklik dan hal ini akan menaikkan tegangan air pori pada tanah pasir yang jenuh air. Tegangan air pori akan meningkat sampai batas tertentu sehingga dapat memisahkan kontak antara butir-butir pasir. Akibat yang ditimbulkan adalah hilangnya tekanan antar butir, padahal tekanan antara butir sangat diperlukan dalam rangka menimbulkan tegangan geser. Apabila tegangan geser dalam butir menjadi nol maka kekuatan tanah pasir akan hilang. Berdasarkan ukuran ground shear strain, likuifaksi akan terjadi apabila γ mencapai 10^{-1} seperti yang ditampilkan pada Tabel 3.4. Pada Gambar 3.1 menunjukkan fenomena likuifaksi yang terjadi pada bangunan apartemen Kawagishi-cho yang disebabkan oleh gempa Nigata 1964.



Gambar 3.1 Likuifaksi yang memicu kerusakan apartemen Kawagishi-cho yang disebabkan oleh gempa Nigata 1964 (Kramer, 1996)

2. Penurunan Tanah (*Soil Settlement*)

Penurunan tanah akibat gempa bumi sering terjadi. Sebagai contoh, pada gempa Kobe (1995) penurunan permukaan tanah cukup dominan karena kualitas tanahnya sangat jelek yaitu tanah bekas reklamasi. Walaupun sudah dipadatkan secara mekanis tetapi secara keseluruhan tanah reklamasi tersebut belum merupakan tanah yang kompak dan teruji akibat beban siklik. Pengaruh ground shear strain pada saat terjadi *soil settlement* ini γ mencapai 10^{-3} .

3. Tanah longsor (*landslide*) dan batu longsor (*rockslide/rockfall*)

Tanah longsor (*landslides*) dan batu longsor dapat disebabkan oleh beban statik maupun beban dinamik. Karena tidak ada kestabilan kuat geser tanah menyebabkan tanah tidak mampu menahan beban tanah itu sendiri yang menyebabkan tanah longsor dan batu longsor. Gempabumi dapat memicu longsoran tanah dan mengakibatkan perubahan struktur tanah terutama di daerah-daerah berlereng curam. Besarnya *ground shear strain* pada saat terjadi longsor yaitu 10^{-2} .

4. Retakan Permukaan Tanah (*Ground Breaking, Faulting*)

Retak-retak pada permukaan tanah merupakan kerusakan tanah akibat adanya regangan tarik tanah yang sudah melampaui batas regangan tarik sehingga timbulnya retak. Ukuran *ground shear strain* pada saat terjadi retakan yaitu 10^{-4} . Gambar 3.2 merupakan contoh retakan permukaan tanah yang terjadi di jalan Provinsi Bengkulu. Kerusakan ini terjadi akibat gempa Bengkulu 2007.



Gambar 3.2 Kerusakan jalan di Provinsi Bengkulu (BAPPENAS, 2007)

5. Kerusakan Bangunan

Sebagian besar bangunan berada diatas permukaan tanah. Apabila tanah yang ditempati bangunan mengalami gangguan baik berupa getaran, retak-retak kecil bahkan terjadi *fault*, maka bangunan yang berada diatasnya jelas akan terganggu. Gangguan tersebut mulai dari hanya bergetar mengikuti getaran tanah, dan mengakibatkan kerusakan ringan, rusak sedang, rusak berat sampai runtuh sama sekali. Kerusakan bangunan tersebut ada yang diakibatkan oleh struktur tanah maupun kerusakan akibat strukturnya sendiri.

Menurut Iman Satyarno (2011) Kategori kerusakan pada bangunan beton bertulang dapat dibagi menjadi 3 yang diantaranya :

- a. rusak ringan yaitu jika hanya terjadi keretakan atau betonnya terkelupas tetapi baja tulangannya belum kelihatan.
- b. rusak sedang yaitu jika selimut beton terkelupas tetapi baja tulangan masih lurus, belum retak, atau belum putus serta beton bagian dalam yang terlihat masih kompak.
- c. rusak berat yaitu jika selimut beton terkelupas dan terlihat ada baja tulangan yang bengkok atau putus, atau ada bagian dalam beton yang terlihat sudah tidak kompak.

3.2 Gempa merusak di Bengkulu

Dari sejarah kegempaannya Provinsi Bengkulu telah mengalami beberapa kejadian gempa yang merusak yakni sejak tahun 1883 sampai 2008. Berdasarkan kumpulan dari beberapa sumber, Data gempa merusak yang pernah terjadi di Bengkulu di tampilkan pada Tabel 3.1. Sumber Data ini berasal dari : Catatan dari Jurnal Fisika Belanda (*Natuurkundig Tijdschrift voor Nederlandsch – Indie*), *Geophysical Notes*, *Earthquake Report*, BMKG dan USGS.

Tabel 3.1 Data gempa merusak yang pernah terjadi di Provinsi Bengkulu (BMKG, 2012)

No	Tanggal/Wilayah	OT	Koordinat		Depth (km)	Mag	Wilayah yang merasakan	Korban/Kerusakan	Sumber
1	24 Nov 1833 Bengkulu Terjadi Tsunami	-	-	-	-	-	-Bengkulu VIII – IX Tsunami teramati	Kerusakan - Bangunan –bangunan rusak dan roboh.	NT
2	18 Agustus 1871 Bengkulu	-	-	-	-	-	- Bengkulu dan Tebing Tinggi : VI - VII	Kerusakan - Beberapa rumah roboh di Bengkulu dan Tebing Tinggi.	NT
3	27 Juni 1902 Lais	-	-	-	-	-	- Lais : VI	Kerusakan - Plester rontok dan dinding retak-retak.	GN-2
4	26 Juni 1914 Kepahiang	-	-	-	-	-	- Kepahiang : IX - Lais, Manna dan Seluma	Korban Meninggal 20 Orang Korban luka-luka 20 Orang Kerusakan -Semua rumah batubata rusak berat -Jalan dan jembatan rusak	GN-2
5.	18 Agustus 1938 Bengkulu	-	-3.8	102.8	-	-	-Sumatra Barat - Palembang - Bengkulu dan Kepulauan Mentawai (VII)	Kerusakkan : -Plester berjatuhan/rontok dan tembok retak di beberapa tempat di Bengkulu	GN-2

6.	15 Desember 1979 Bengkulu	00:02:42	-3.3	102.7 1	33	5.8	-Kepahiang : VII – VIII	Korban meninggal -8 orang Korban luka-luka -162 orang Kerusakkan : -2500 rumah hancur atau rusak di sekitar Bengkulu	E.R
7.	4 Juni 2000	16:28:24	-4.7	102	33	7.3	-Bengkulu : VI -Lampung dan Palembang :IV -Jakarta : III - Malaysia dan Singapura	Korban meninggal -Sedikitnya 90 Orang Korban luka-luka -1782 Orang Kerusakkan : - 1800 rumah rusak hancur - 10.196 rumah rusak berat - 18.378 rusak ringan - gedung TK : 275 hancur, 3 berat, 272 ringan - gedung SD : 149 hancur, 10 berat, 91 ringan - gedung SMP : 73 hancur, 26 ringan - gedung SMA : 12 hancur, 2 ringan - gedung Perguruan Tinggi : 3 hancur, 3 rusak - Masjid : 506 hancur, 71 ringan - Gereja : 7 hancur, 7 ringan	BMKG

								<ul style="list-style-type: none"> - Fasilitas umum : 161 hancur, 21 berat, 124 ringan - Jalan rusak di 26 lokasi, panjang total yang rusak 1666 meter. - Jembatan : 27 rusak berat - Puskesmas dan rumah sakit : 40 hancur, 11 berat, 24 ringan. 	
8	7 Juni 2000 Bengkulu	23:45:27	-4.61	101.9 05	33	6.5	<ul style="list-style-type: none"> -Bengkulu : V - Terasa di Palembang - Jakarta : II 	Korban meninggal -1 Orang Kerusakkan -Sedikitnya 600 bangunan rusak di Lahat	USGS
9	16 Januari 2001 Bengkulu	13:25:10	-4.02	101.7 76	28	6.9	<ul style="list-style-type: none"> -Bengkulu : V -Jakarta : II 	-	USGS
10	13 Februari 2001 Bengkulu	19:28:30	-4.68	102.5 62	36	7.4	<ul style="list-style-type: none"> -Bengkulu : terasa kuat - Jakarta : II 	-	USGS
11	25 Juli 2004 Bengkulu	14:35:19	-2.43	103.9 81	582	7.3	<ul style="list-style-type: none"> -Bengkulu : IV -Padangpanjang : III -Bandung, Bogor, Sawahan dan Sukabumi : III -Jakarta : II -Mataram , Lombok -Juga terasa di selatan Johor, Malaysia dan 	-	USGS

							Singapura		
12	12 September 2007 Terjadi Tsunami	11: 10:23	-4.59	101.2 2	10	7.9	-Bengkulu : VI -Padang : V -Lampung, Palembang, Pekanbaru, dan Sibolga : IV -Jambi : III - Medan, Banten dan Serang : II -Duri : IV -Jakarta, Bekasi, Kuningan : III -Malaysia : III -Singapura : III - Bangkok (Thailand)	Korban Meninggal -25 Orang Korban luka-luka -161 orang Kerusakkan : 56.425 bangunan rusak atau hancur dan jalan-jalan rusak di Bengkulu dan Sumatra Barat. Listrik dan telepon putus. Tsunami tercatat dengan ketinggian gelombang (puncak dan lembah): -Pulau Cocos (Australia) : 24 cm -Diego Garcia : 9 cm -Padang : 227 cm -Cilacap : 52 cm -Prigi : 42 cm -Sibolga : 30 cm -Sabang : 16 cm -Benoa : 4.5 cm -Lamu(Kenya) : 8 cm -Hanimadu : 23 cm -Male : 21 cm -Gan (Maladewa) : 13 cm -Rodrigues (Mauritius) : 114	BMKG dan USGS

								cm -Salalah dan Sur Masirah (Oman) : 131 cm - Point La Rue, Seychelles : 40 cm -Colombo dan Trincomalee (Srilanka) : 60 cm -Phuket (Thailand) : 8cm	
13	24 Oktober 2007 Lais	21:02:47	-4.18	100.7	10	7.0	-Argamakmur, Lais, Muaraaman dan Muko-muko : IV - Kepahiang, Bengkulu, Jakarta : III -Singapura : III	-	BMKG
14	9 September 2008 Bengkulu	03:07:29	-4.04	103.0 1	10	5.6	-Lahat : VI -Kepahiang dan Pagaralam : IV -Bengkulu : III	Korban meninggal -2 orang Kerusakan -113 rumah rusak parah di Lahat - beberapa bangunan rusak di Jarai	BMKG dan USGS

Keterangan :

N.T : *Natuurkundig Tijdschrift voor Nederlandsch – Indie*

G.N : *Geophysical Notes*

E.R : *Earthquake Report*

3.3 Faktor yang mempengaruhi tingkat kerusakan

Tingkat kerusakan akibat gempabumi ditentukan oleh karakter getaran tanah (*ground motion*) di lokasi tersebut. Menurut Seed dan Idriss (1982) karakter getaran tanah dipengaruhi oleh beberapa faktor yakni :

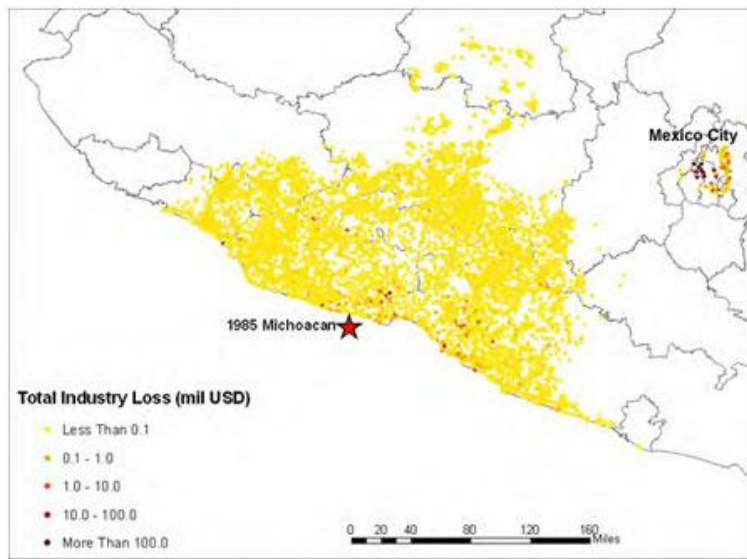
1. Magnitudo Gempabumi
2. Jarak ke sumber gempa
3. Karakter geologi batuan sepanjang jalur penjalaran gelombang seismik dari sumber ke *site*.
4. Mekanisme sumber gempabumi.
5. Efek radiasi dari fault rupture.
6. *Site effect*

3.4 *Site effect*

Kerusakan akibat gempa biasanya di tandai oleh besarnya skala magnitude gempa, di daerah sekitar episenter kadang mengalami kerusakan yang lebih parah dari pada daerah yang jauh dari lokasi episenter. Tetapi pada beberapa kasus tidak demikian seperti pada kejadian berikut :

1. Pada tanggal 19 September 1985 terjadi gempa di Michoacan (Mexico) yang memiliki Skala Magnitude ($M_s = 8.1$). Di sekitar lokasi episenter hanya mengalami kerusakan yang tingkat sedang tetapi pada kota Mexico yang jaraknya 400 km dari lokasi episenter mengalami kerusakan yang cukup parah. Terjadi kerusakan struktur bangunan, bangunan yang *collapse* yang terletak pada tanah yang lunak. Lokasi ini dulunya merupakan danau yang dikeringkan sehingga kondisi tanah disini pada dasarnya tanah lunak (Bard dan Chavez-Garcia, 1993). Pada Gambar 3.3 dibawah menunjukkan lokasi gempabumi dan Mexico City.

2. Pada tanggal 17 Oktober 1989 terjadi gempa di sekitar Gunung Loma Prieta (California) yang memiliki skala magnitude ($M_s = 7.1$). Keaktifan gempa ini diakibatkan oleh sesar San Andreas Fault yang melintasi di daerah California. Pada wilayah teluk San Fransisco yang memiliki jarak episenter 100 km dari episenter mengalami kerusakan yang cukup parah dan berdasarkan jenis tanahnya di daerah ini di dominasi oleh endapan tanah lunak (Hough dkk, 1990).



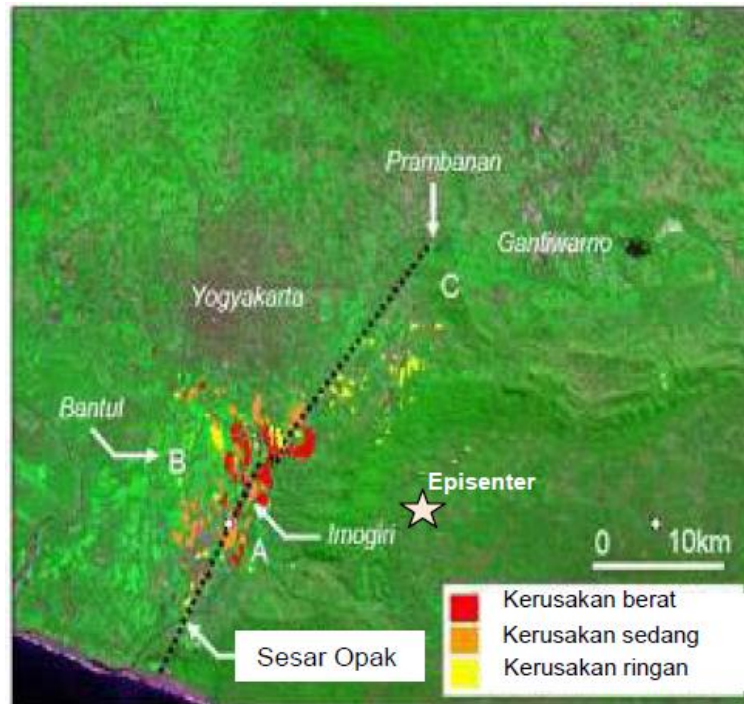
Gambar 3.3 Posisi Episenter Gempa Michoacan dan lokasi kota Mexico
(Kantiyar dkk ,2010)



Gambar 3.4 Posisi Episenter Gempa Loma Prieta dan Kota San Fransisco (USGS,1999)

3. Pada tanggal 27 Mei 2006 terjadi gempa di Bantul dengan skala Magnitudo ($M_w = 6.4$) yang menyebabkan kerusakan parah di Zona Graben Bantul. Daerah yang dekat dengan posisi episenter ini tidak mengalami kerusakan

yang cukup parah. Berdasarkan penelitian Walter et.al (2008) lebih dari 6000 orang meninggal dunia dan 1.000.0000 orang kehilangan tempat tinggal.

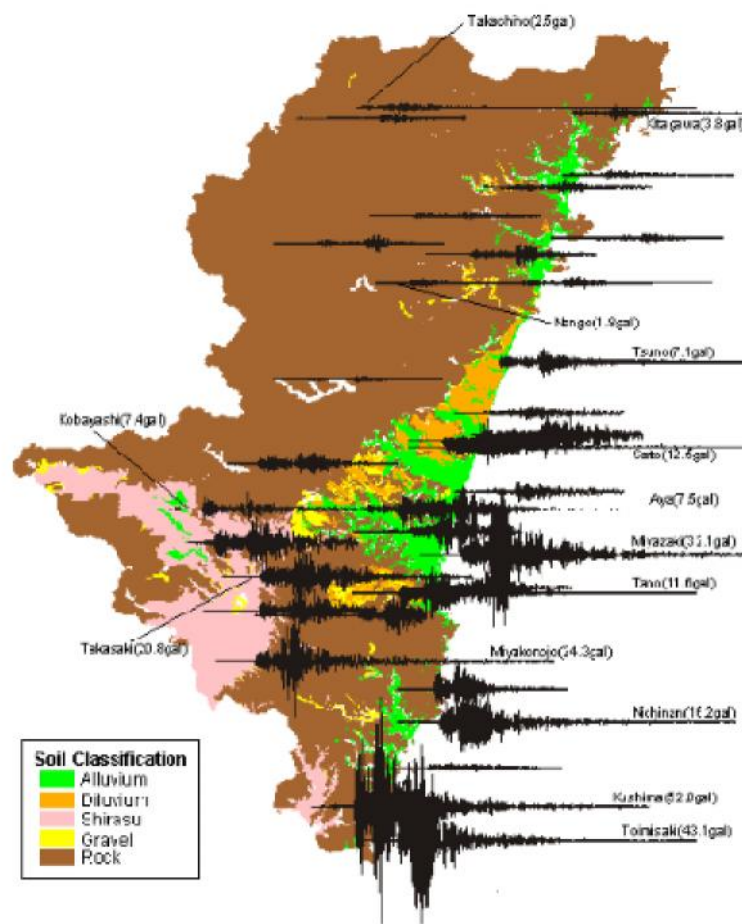


Gambar 3.5 Persebaran kerusakan akibat gempa Bantul 27 Mei 2006
(Miura dkk dalam Daryono , 2011)

Dari beberapa kejadian gempa diatas menunjukkan adanya pola kerusakan tidak teratur seperti yang diperkirakan. Ada daerah-daerah yang memiliki tingkat kerusakan yang lebih parah padahal lokasinya jauh dari sumber gempa. Hal ini terjadi karena adanya pengaruh kondisi tanah setempat. Kondisi tanah setempat yang dimaksud adalah kondisi tanah dibawah suatu bangunan atau kondisi tanah dipermukaan. Efek kondisi tanah ini berhubungan dengan adanya lapisan tanah lunak. Tingkat kerusakan bangunan juga berhubungan dengan frekuensi getaran alami tanah dalam hal ini terjadi amplifikasi karena kedekatan frekuensi alami bangunan dengan frekuensi alami tanah.

Site Effect dapat mengakibatkan perubahan karakteristik *ground motion* berupa perbesaran amplitudo getaran gempa (ampifikasi), perubahan frekuensi dan durasi gelombang seismik. Perubahan karakteristik gelombang seismik ini dipengaruhi oleh kontras impedansi yakni adanya lapisan tanah lunak diatas batuan dasar (Zaharia dkk, 2008). Untuk melihat variasi *ground motion* terhadap

lithologi Okuma dkk (2000) memetakan rekaman seismogram di setiap satuan lithologi saat terjadi gempa di Kota Miyazaki Jepang. Pada Gambar 3.6 dapat dilihat bahwa karakter gelombang seismik akibat gempa cenderung sama pada jenis tiap lithologi yang sejenis. Pada jenis lithologi berupa *rock* (Takchiho, Kitagawa dan Nango) amplitudo gelombang tidak mengalami amplifikasi tetapi pada lithologi alluvial (Miyazaki, Siato, Nichinan) terjadi amplifikasi gelombang. Amplifikasi juga terjadi pada jenis Dilluvium yakni pada rekaman di Tsuno serta pada beberapa lithologi lainnya juga mengalami amplifikasi (Gravel dan Shirasu).



Gambar 3.6 Variasi Seismogram pada jenis lithologi yang berbeda di Miyazaki, Jepang (Okuma dkk 2000 dalam Daryono, 2011)

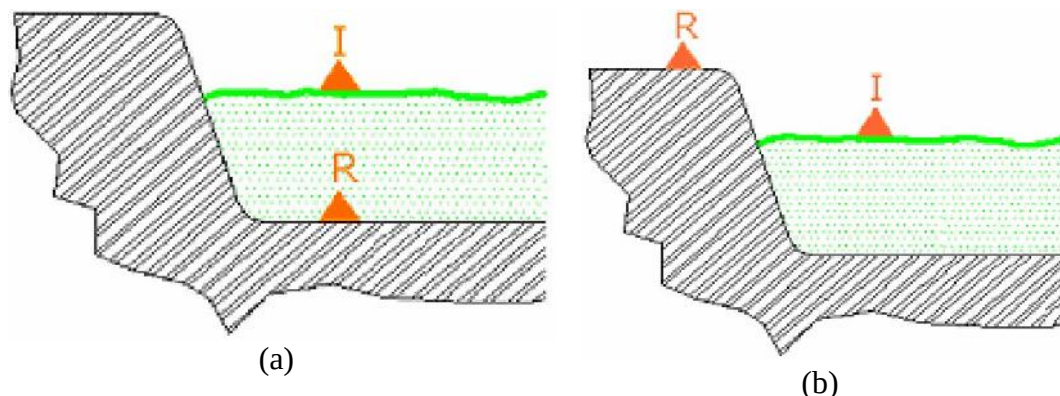
Saat ini beberapa penelitian telah dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai amplifikasi dengan rekaman *ambient* seismik noise. Penelitian ini menggunakan beberapa metode yang berdasarkan analisis spektra dari rekaman

mikrotremor. Metode ini menghasilkan spektra yang menggambarkan *transfer function* gelombang SH dari bedrock sampai ke permukaan. *Transfer function* ini berhubungan dengan parameter lapisan bawah permukaan yakni ketebalan lapisan dan kecepatan gelombang geser. *Transfer function* merupakan fungsi yang menggambarkan spektra amplifikasi getaran seismik dari bedrock sampai ke permukaan tanah.

3.5 Metode untuk mengevaluasi *Site Effect*

3.5.1 Metode SSR (*Standard Spectral Ratio*)

Metode ini diperkenalkan pertama kali oleh Borchdet (1970). Metode SSR memerlukan tempat referensi berupa *outcrop* (*bedrock* yang tersingkap di permukaan) atau dengan menggunakan seismometer *borehole*. Tempat referensi ini harus terbebas dari pengaruh *site effect* dan lokasinya harus dekat dengan tempat pengukuran yang akan dievaluasi. Gambar 3.7 menunjukkan proses pengukuran mikrotremor dengan metode SSR. Pada Gambar 3.7 (a) huruf I menunjukkan daerah yang akan diinvestigasi sedangkan R merupakan Referensi. Dengan membagi Fourier spektra tanah (I) dengan *bedrock* (R) maka diperoleh spektra amplifikasi tanah. Dari spektra amplifikasi tanah ini diperoleh berupa periode dominan dan amplifikasi.



Gambar 3.7 Pengukuran mikrotremor dengan metode SSR (Carman, 2006)

Dalam pengolahannya hasil dari *time history* komponen horisontal rekaman mikrotremor pada referensi dan *site* yang di ukur diubah kedalam spektra Fourier. Kemudian faktor amplifikasi dan frekuensi dominan tanah dapat

diperoleh dengan mencari membagi spektra Fourier *soil* terhadap referensi yang di tunjukkan dengan persamaan (3.1)

$$S(f) = \frac{A(f)_{soil}}{A(f)_{rock}} \quad (3.1)$$

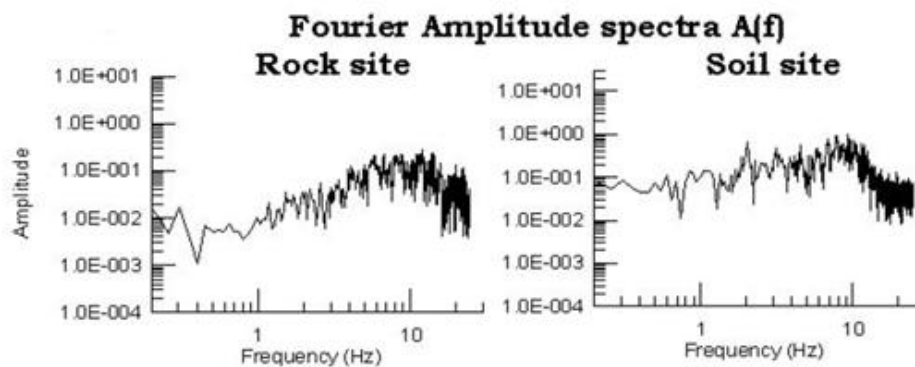
Dengan :

$S(f)$: Spectra Ratio (Transfer Function)

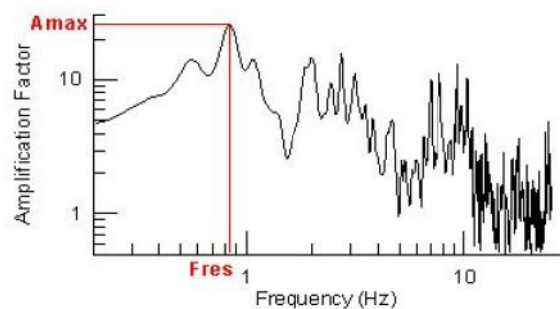
$A(f)_{soil}$: Fourier Amplitude Spectra Soil

$A(f)_{rock}$: Fourier Amplitude Spectra Rock

Gambar 3.8 menunjukkan spektra Fourier di batuan (referensi) dan spektra Fourier pada lokasi tanah.



Gambar 3.8 Fourier Amplitude Spektra pada *bedrock* (referensi) dan tanah



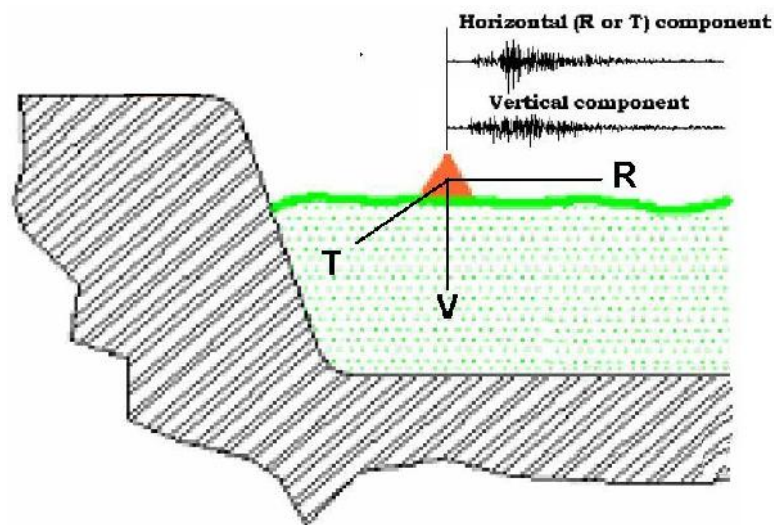
Gambar 3.9 Perbandingan antara Fourier spektra tanah dengan *bedrock* (referensi) didapatkan faktor amplifikasi dan frekuensi dominan tanah

Metode ini dilakukan Borchdet (1970) di Teluk San Fransisco. Dari hasil penelitiannya diperoleh bahwa nilai PHV (*Peak Horizontal Velocity*) meningkat sebanding dengan ketebalan lapisan alluvial muda dan nilainya mencapai puluhan

kali dari nilai PHV di *bedrock* dan hasil SSR menunjukkan amplifikasi terbesar berada di daerah Teluk San Fransisco dibandingkan di daerah pegunungan Black Mountain. Hal ini menunjukkan bahwa endapan alluvial muda memperbesar gelombang seismik. Sedangkan pada daerah pegunungan tidak terjadi amplifikasi gelombang seismik.

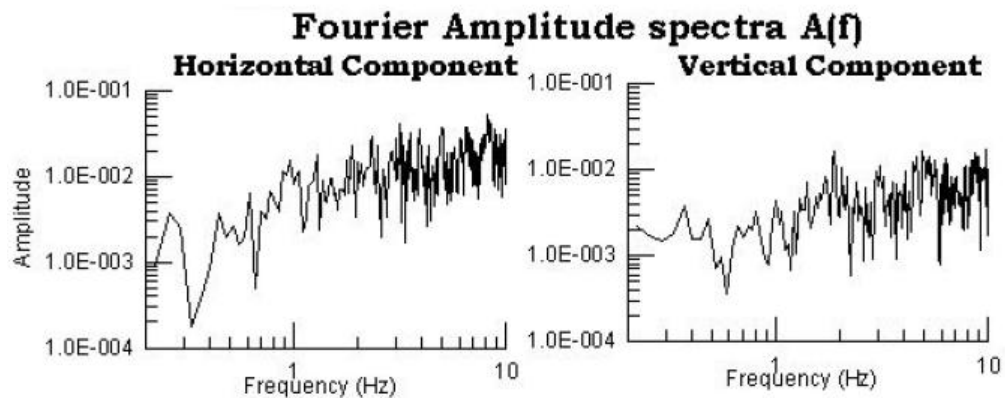
3.5.2 Metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*)

Nakamura (1989) mengusulkan metode HVSR untuk mengestimasi pengaruh *site effects*. Dengan menggunakan metode HVSR tidak perlu memerlukan tempat referensi karena pada HVSR diasumsikan bahwa komponen horisontal saja yang terpengaruh oleh tanah sedangkan pada komponen vertikal tetap (Daryono, 2011). Parameter yang dihasilkan dari metode HVSR ini yakni frekuensi dominan (f_g) dan faktor amplifikasi (A_g).



Gambar 3.10 Pengukuran mikrotremor dengan metode HVSR (Carman, 2006)

Pengukuran mikrotremor ini membutuhkan seismometer 3 komponen. Kemudian dengan mentransformasi dari domain waktu ke domain frekuensi diperoleh spektra Fourier untuk tiap komponen Horizontal (EW dan NS) dan Vertikal. Gambar 3.11 merupakan contoh Fourier amplitude spektra komponen Horizontal dan komponen vertikal.



Gambar 3.11 Fourier spektra komponen horizontal dan komponen vertikal

Dan dengan membagi Fourier spektra komponen horizontal dan vertikal maka dapat di tentukan faktor amplifikasi dan frekuensi dominan tanah seperti yang di tampilkan pada Gambar 3.12. Spektra rasio horizontal terhadap vertikal dapat di rumuskan dengan persmaan dibawah ini :

$$S(f) = \frac{A(f)_{Horizontal}}{A(f)_{Vertical}} \quad (3.2)$$

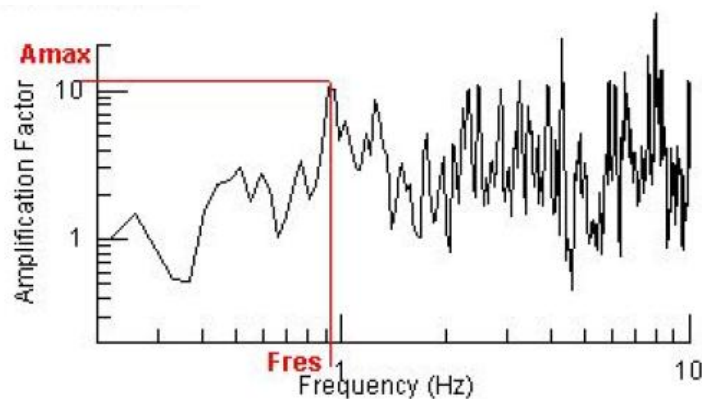
Dengan :

$S(f)$: Spectra Ratio (Transfer Function)

$A(f)_{Horizontal}$: Fourier Amplitude Spectra Horizontal

$A(f)_{Vertical}$: Fourier Amplitude Spectra Vertical

Frekuensi dominan (f_g) dan faktor amplifikasi (A_g) dapat dilihat dari grafik H/V dibawah ini. Pada grafik ditunjukkan bahwa nilai frekuensi dominan berada pada puncak faktor amplifikasi. Pada Gambar 3.12 nilai frekuensi berada pada sumbu horisontal sedangkan nilai faktor amplifikasi berada pada sumbu vertikal.



Gambar 3.12 Spektra Rasio H/V

Pada perkembangannya Theodulidis dan Bard (1995) menyimpulkan bahwa spektra HVSR berkorelasi baik dengan kondisi geologi tetapi nilai amplifikasi HVSR tidak bertepatan dengan hasil pengukuran amplifikasi dengan metode lainnya.

3.6 Mikrotremor

Mikrotremor atau (*ambient noise*) adalah gelombang seismik berukuran mikro yang memiliki sinyal semi kontinyu hingga sinyal kontinyu dengan durasi yang lama. Mikrotremor didefinisikan sebagai noise periode pendek yang berasal dari sumber *artificial*. Gelombang ini bersumber dari segala arah yang saling beresonansi. Mikrotremor dapat juga diartikan sebagai getaran harmonik alami tanah yang terjadi secara terus menerus disebabkan oleh getaran mikro di bawah permukaan tanah dan kegiatan alam lainnya (Ibrahim dkk, 2001).

Mikrotremor dapat juga diakibatkan oleh gangguan setempat seperti : lalu lintas, industri atau getaran permukaan/udara yang diteruskan ke permukaan tanah. Mikrotremor merupakan simpangan (amplitudo) getaran (vibrasi) yang sangat kecil dan terus menerus dari tanah atau struktur. Karakteristik mikrotremor mencerminkan karakteristik batuan di suatu daerah. Dengan seismograph tertentu yang memiliki perbesaran dalam orde $10^4 - 10^6$ kali, getaran tersebut dapat direkam. Getaran tersebut dapat mempunyai periode antara 0.05 det – 2.00 det atau bahkan sampai 4.00 det. Amplitudo mikrotremor biasanya berada antara 0.001 – 0.01 mm.

Pengukuran mikrotremor banyak dilakukan pada studi penelitian struktur tanah (*soil investigation*) untuk mengetahui keadaan bawah permukaan tanah. Omori mengamati mikrotremor pertama kali pada tahun 1908 dan beberapa ahli seismologi serta insinyur gempa bumi lainnya menyelidiki alam atau menerapkan hasil penyelidikan mikrotremor tersebut dalam pekerjaan masing-masing. Sebab karakteristik dinamika tanah atau struktur tanah selama terjadinya gempa dapat diperkirakan dengan menggunakan analisa mikrotremor (Olivera dkk, 2008).

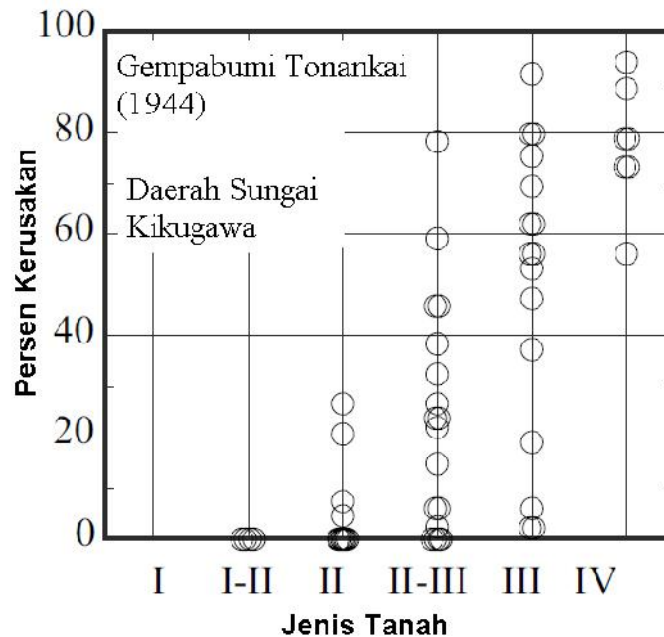
Analisis spektra mikrotremor ialah salah satu cara untuk mengkarakterisasi *site response*. Hubungan antara respons lokal dan karakter mikrotremor seperti predomnan period atau frekuensi predomnan, amplifikasi dan kerentanan likuifaksi sudah lama diteliti beberapa tahun yang lalu (Gutenberg,B., 1957; Kanai,K., and Tanaka,T., 1961).

Berdasarkan hasil rekaman mikrotremor Kanai (1954) mengklasifikasi tanah kedalam empat kategori yang digunakan dalam Japan Building Code.

Tabel 3.2 Mikrozonasi *Japan Building Code* (Kanai dan Tanaka, 1961)

Zona	Deskripsi
I	Tanah terdiri dari batuan, tanah keras dan berkerikil
II	Tanah terdiri dari kerikil berpasir, tanah keras pasir bercampur lempung, kerikil bercampur endapan alluvial dengan ketebalan 5 meter atau lebih
III	Standar tanah selain zone I, II dan IV
IV	Tanah terdiri dari endapan tanah alluvial delta, ketebalan lumpur 3 meter atau lebih dengan kurang dari 30 tahun sudah mengalami reklamasi

Kemudian dari perbedaan karakter mikrotremor ini banyak para peneliti mengamati mikrotremor untuk mengetahui pengaruh kondisi geologi terhadap *ground motion*. Dari hasil penelitian Kanai dan Tanaka (1961) menunjukkan adanya korelasi yang baik antara klasifikasi tanah dengan rata-rata kerusakan bangunan kayu (Gambar 3.13). Pada jenis tanah IV persen kerusakannya sangat besar dibandingkan dengan jenis tanah I, II dan III. Dan ini merupakan salah satu langkah mikrozonasi paling awal yang dilakukan berdasarkan kondisi tanah lokal di Jepang.

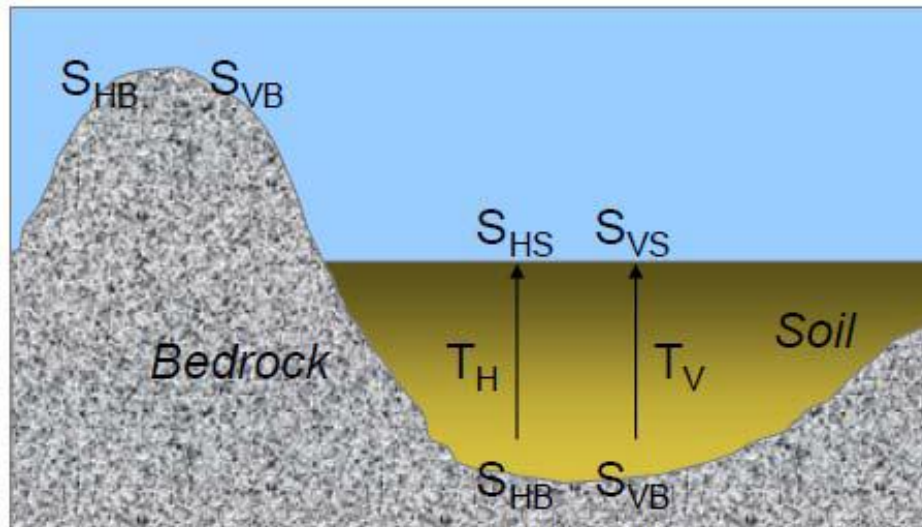


Gambar 3.13 Variasi zona tanah dan tingkat kerusakan akibat gempa Tonankai pada daerah di sekitar sungai Kikugawa (Kanai dan Tanaka, 1961)

3. 7 Dasar teori metode HVSR

Nakamura pada tahun 1989, mengembangkan analisis mikrotremor dengan mengusulkan teknik baru, umumnya disebut sebagai metode H/V atau HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). HVSR (*Horizontal to Vertical Spectra Ratio*) merupakan salah satu cara paling mudah dan paling murah untuk memahami sifat struktur lapisan bawah permukaan tanpa menyebabkan gangguan pada struktur tersebut. Perbandingan spektra H/V adalah perbandingan antara spektrum amplitudo Fourier komponen horisontal dan vertikal dari mikrotremor (Nakamura, 1989).

Beberapa asumsi dasar dalam Metode HVSR yaitu (Tuladhar, 2002) dan (Bour *et al.* 1998) : 1) mikrotremor sebagian besar terdiri-dari gelombang geser; (2) komponen vertikal gelombang tidak diamplifikasi lapisan tanah lunak dan hanya komponen horisontal yang teramplifikasi; (3) Batuan dasar (*basement*) menyebarkan gelombang ke segala arah; (4) Gelombang Rayleigh diasumsikan sebagai *noise* mikrotremor dan diusulkan metode untuk mengeliminasi efek gelombang Rayleigh.



Gambar 3.14 Sketsa *bedrock* dan lapisan tanah lunak (Daryono, 2011)

Pengaruh *site effect* pada suatu daerah dapat di sederhanakan kedalam fungsi transfer gelombang SH dari bedrock sampai ke permukaan lapisan tanah permukaan. Dengan membandingkan spektra komponen horisontal rekaman seismogram di permukaan tanah (T_H) terhadap spektra komponen horisontal rekaman seismogram pada singkapan *bedrock* (S_H) maka didapat fungsi transfer (T_H).

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.3)$$

Dengan :

T_H : Fungsi transfer gelombang SH dari *bedrock* ke lapisan tanah permukaan

S_{HS} : Spektra Fourier komponen horisontal di lapisan tanah permukaan

S_{HB} : Spektra Fourier komponen horisontal di *bedrock*

Karena gelombang Rayleigh juga berpengaruh terhadap spektra getaran horisontal dan vertikal dipermukaan maka perlu dilakukan cara untuk mengatasi gangguan dari gelombang Rayleigh yakni dengan cara menghitung rasio spektrum komponen vertikal di permukaan (S_{VS}) dan di bedrock (S_{VB}). Rasio perbandingan ini merupakan besarnya pengaruh gelombang rayleigh (E_s) yang dapat dirumuskan :

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VE}} \quad (3.4)$$

Dengan :

E_S : *Transfer function* gelombang vertikal / gelombang Rayleigh

S_{VS} : Spektra Fourier komponen vertikal di lapisan tanah permukaan

S_{VB} : Spektra Fourier komponen vertikal di *bedrock*

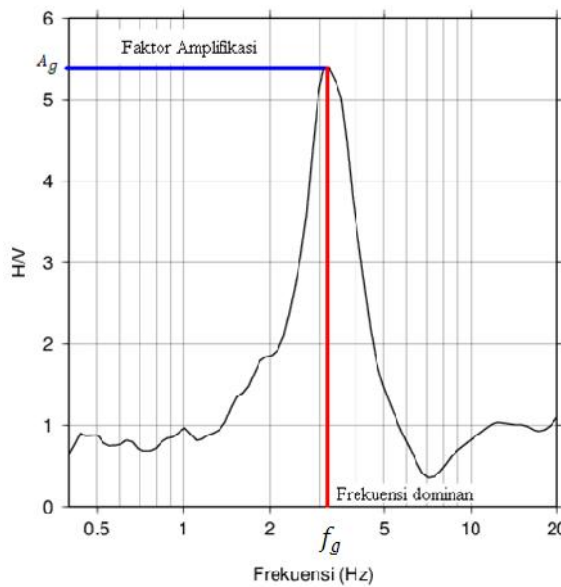
Selanjutnya persamaan *transfer function* yang baru (S_{TT}) dapat dituliskan dalam persamaan berikut :

$$S_{TT} = \frac{T_H}{E_S} = \frac{R_S}{R_B} \quad (3.5)$$

Dengan :

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3.6)$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \quad (3.7)$$



Gambar 3.15 Contoh Spektrum H/V

Nakamura (2008) mengasumsikan bahwa pada *bedrock* simpangan getaran vertikal dan horizontalnya sama, sehingga rasio spektrum horisontal dan vertikal di *bedrock* sama dengan satu. Maka persamaan *transfer function* gelombang SH yang baru (S_{TT}) identik dengan *transfer function* (T_H). Hasil dari *transfer function*

(T_H) ini merupakan spektrum H/V dengan puncak spektrum (A_g) dan frekuensi dominan (f_g). Puncak spektrum (A_g) merupakan faktor amplifikasi di *site* pengukuran. Kedua parameter ini (A_g dan f_g) mencerminkan pengaruh *site effect* di suatu daerah penelitian.

Hasil dari faktor amplifikasi (A_g) merupakan faktor amplifikasi kecepatan getaran partikel akibat gelombang SH yang merambat secara vertikal dari bedrock menuju ke permukaan. Faktor amplifikasi yang diperoleh dari pengukuran mikroteremor ini merupakan perbandingan kecepatan getaran pada permukaan terhadap kecepatan getaran pada *bedrock*. Karena gelombang P yang merambat dari *bedrock* menuju ke permukaan tidak dipengaruhi oleh lapisan sedimen maka kecepatan getaran pada *bedrock* ditentukan dari gelombang P yang terekam di permukaan yakni pada komponen vertikal seismogram. Dalam penggunaannya, parameter faktor amplifikasi (A_g) digunakan untuk menghitung *ground shear strain* (γ). *Ground shear strain* (γ) ini memerlukan faktor amplifikasi (A_g) dan *displacement* pada bedrock (d_b) yang akan dibahas pada subbab 3.14.

Menurut Kanai (1966) faktor amplifikasi merupakan parameter yang sama digunakan untuk menentukan parameter ground motion dipermukaan yang berupa *displacement* (d_s), kecepatan (k_s) dan percepatan (a_s). Kanai memberikan notasi $G(T)$ sebagai faktor amplifikasi. Untuk menentukan *displacement* getaran dipermukaan (d_s) dari *displacement* getaran di bedrock (d_b) dirumuskan dengan :

$$d_s = G(T)d_b \quad (3.8)$$

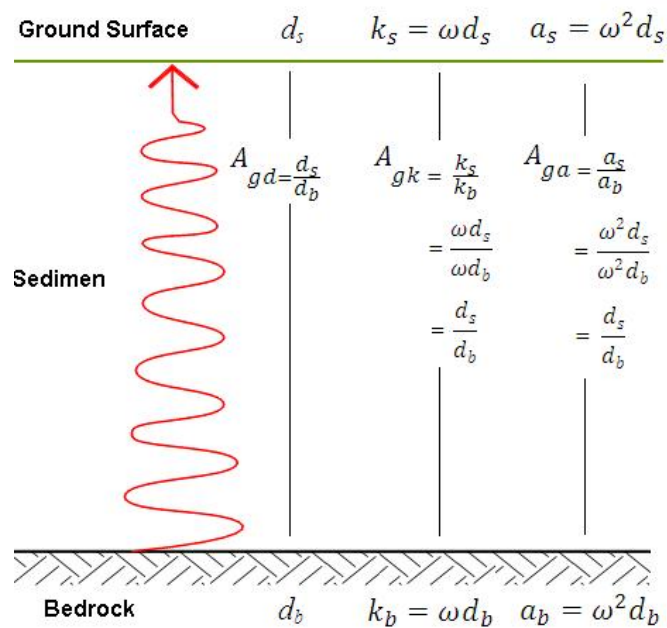
Untuk menentukan kecepatan getaran dipermukaan (k_s) dari kecepatan getaran di *bedrock* (k_b) dirumuskan dengan :

$$k_s = G(T)k_b \quad (3.9)$$

Sedangkan percepatan getaran dipermukaan (a_s) dari percepatan getaran di *bedrock* (a_b) dirumuskan dengan :

$$a_s = G(T)a_b \quad (3.10)$$

Untuk menunjukkan bahwa faktor amplifikasi merupakan nilai yang sama untuk memperbesar *displacement* dipermukaan (d_s), kecepatan dipermukaan (k_s) dan percepatan dipermukaan (a_s) dapat dilihat pada gambar 3.16. Pada Gambar 3.16 getaran di bedrock dan di permukaan diasumsikan memiliki frekuensi getar yang sama yakni frekuensi resonansi (f_g) sehingga nilai ω di permukaan dan di bedrock sama. Dari Gambar 3.16 ini ditunjukkan bahwa faktor amplifikasi untuk *displacement* (A_{gd}), faktor amplifikasi untuk kecepatan (A_{gk}) dan faktor amplifikasi untuk percepatan (A_{ga}) memiliki nilai yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa faktor amplifikasi (A_g) merupakan nilai yang sama untuk *displacement*, kecepatan dan percepatan getaran.



Gambar 3.16 Sketsa faktor amplifikasi dan penurunan rumus untuk menunjukkan bahwa faktor amplifikasi (A_g) berlaku untuk *displacement*, kecepatan dan percepatan.

3.8 Frekuensi dominan (Frekuensi resonansi)

Frekuensi dominan tanah (f_g) merupakan salah satu parameter penting dalam mitigasi bencana gempabumi. Frekuensi resonansi di suatu tempat dapat digunakan dalam perencanaan bangunan tahan gempa (Tuladhar dkk, 2004). Pada bangunan yang memiliki frekuensi dominan yang sama dengan frekuensi tempat

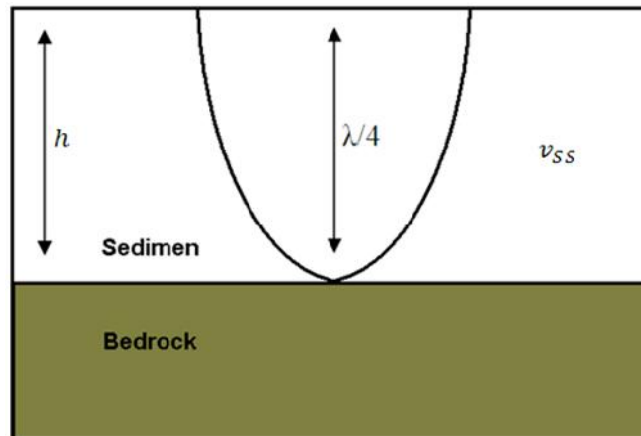
bangunan tersebut maka akan terjadi peristiwa resonansi, efek dari resonansi ini akan memperkuat simpangan bangunan sehingga bangunan tersebut akan mudah rusak. Selain bahaya resonansi dan amplifikasi akibat getaran gempabumi, karakteristik dinamik tanah dengan nilai f_g yang rendah juga sangat rentan terhadap bahaya getaran perioda panjang yang dapat mengancam gedung-gedung bertingkat tinggi (Tuladhar, 2002).

Hal ini dikarenakan pada bangunan tinggi memiliki frekuensi dominan struktur yang rendah. Sehingga akan menimbulkan resonansi apabila bangunan ini dibangun pada daerah yang memiliki frekuensi dominan yang rendah pula. Dengan mengetahui persebaran frekuensi resonansi pada suatu daerah dan memanfaatkannya dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, diharapkan akan dapat mengurangi risiko kerusakan akibat gempabumi yang mungkin terjadi pada masa yang akan datang.

3.9 Hubungan frekuensi dengan ketebalan lapisan

Spektra mikrotremor dapat menjadi alat yang sangat baik dalam menentukan ketebalan lapisan tanah lunak (sedimen) hal ini karena frekuensi puncak spektrum H/V memiliki korelasi yang baik dengan ketebalan sedimen (Ibs-von dan Jurgen, 1999). Perbandingan antara frekuensi resonansi observasi dan numerik juga menunjukkan adanya hubungan pengukuran mikrotremor yang tergantung pada kedalaman dan kecepatan gelombang geser. Dengan ilustrasi sederhana, model struktur tanah dua lapis yakni *bedrock* yang tertutupi lapisan tanah lunak (sedimen) di atasnya memiliki ketebalan lapisan sedimen (h) dan kecepatan gelombang geser rata-rata (v_{ss}) pada lapisan tanah lunak (sedimen). Maka persamaan frekuensi dominannya (f_g) yaitu

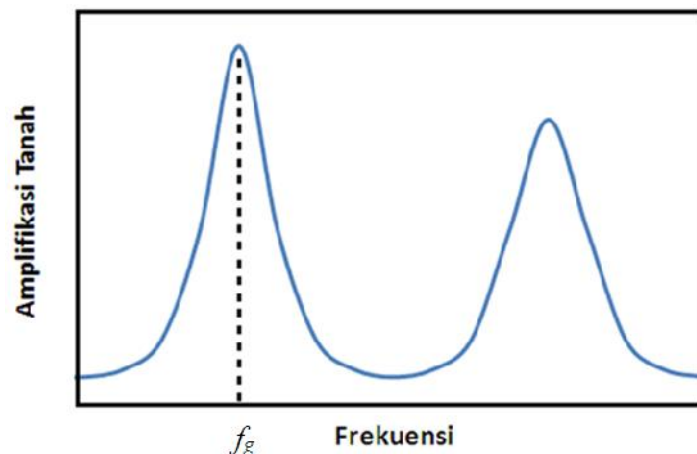
$$f_g = \frac{v_{ss}}{4h} \quad (3.11)$$



Gambar 3.17 Model dua lapisan *bedrock* dan tanah lunak (sedimen)

(Ibs-von dan Jurgen, 1999)

Grafik spektrum H/V berdasarkan struktur dua lapis sedimen dan *bedrock* dapat ditunjukkan oleh Gambar 3.18 pada bahwa f_g merupakan parameter frekuensi dominan di lokasi tersebut.

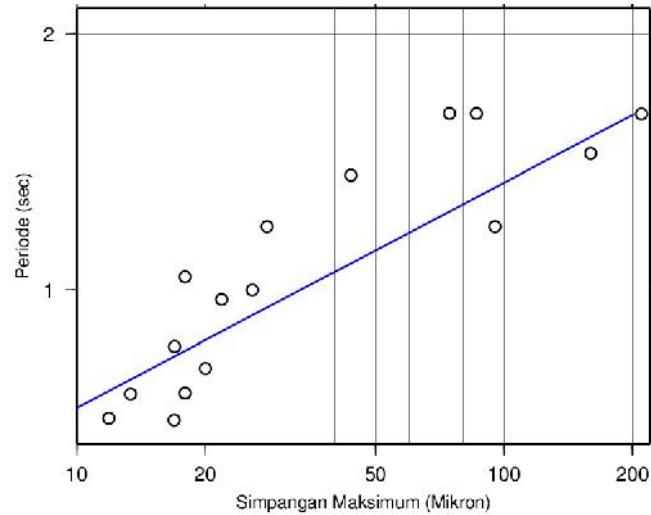


Gambar 3.18 Spektra amplifikasi tanah (Ibs-von dan Jurgen, 1999)

3.10 Percepatan Getaran Tanah Maksimum (PGA)

Percepatan getaran tanah maksimum atau PGA merupakan besaran yang menunjukkan tingkat percepatan yang paling besar yang pernah dialami pada suatu daerah akibat gempabumi. Percepatan getaran tanah maksimum di suatu daerah bergantung pada karakteristik lapisan tanah permukaan di daerah tersebut, sehingga pemahaman terhadap karakteristik dinamik lapisan tanah permukaan menjadi hal yang sangat penting dalam analisis bahaya gempabumi. Percepatan

tanah permukaan di suatu tempat yang disebabkan oleh getaran seismik bergantung pada perambatan gelombang seismik dan karakteristik lapisan tanah (alluvial deposit) di tempat tersebut (Kanai,1966).



Gambar 3.19 Hubungan antara simpangan maksimum dengan periode
(Kanai dan Yoshizawa,1958)

Kanai dan Yoshizawa (1958) melakukan penelitian empiris mengenai hubungan antara simpangan maksimum dengan periode getaran gempabumi dengan jarak hiposenter 100 km. Untuk menghindari pengaruh *site effect* pemasangan seismometer dilakukan pada daerah tambang Hitachi (daerah Ibaraki) yang berada 300 meter dibawah tanah. Gambar 3.19 merupakan sebaran data simpangan maksimum (A_m) dalam mikrometer dengan periode (T_m) dalam sekon. Dengan menggunakan analisis statistik regresi linear $y = mx + c$ maka dengan menggunakan log basis 10 diperoleh hubungan linear

$$\log A_m = 2,56 \log T_m + \log 53 \quad (3.12)$$

Kemudian untuk menyederhanakan logaritma maka persamaan diatas dapat ditunjukkan seperti pada persamaan (3.13)

$$A_m = 53 T_m^{2.56} \quad (3.13)$$

Tsuboi (1934) menemukan hubungan empiris antara simpangan maksimum (A_m), Magnitude (M) dan jarak hiposenter (Δ) dalam km persamaan ini ialah

$$\log A_n = M - 1.73 \log \Delta + 0.83 \quad (3.14)$$

Dengan mengkombinasikan persamaan (3.13) dan (3.14) serta dengan menganggap jarak hiposenter (Δ) = 100 km maka diperoleh persamaan

$$\log T_n = 0.39M - 1.7 \quad (3.15)$$

Dari persamaan (3.14) dan (3.15)

$$\log \frac{A_n}{T_n} = 0.61M - 1.73 \log \Delta + 2.53 \quad (3.16)$$

Dengan asumsi bahwa simpangan getaran mikrotremor (A) dan periode (T) maka kanai mengasumsikan bahwa :

$$\frac{A_n}{T_n} = \frac{A}{T} = \text{konstan} \quad (3.17)$$

Dengan demikian nilai simpangan dalam mikrometer untuk setiap periode dapat dirumuskan dengan

$$A = 10^{0.61M - 1.73 \log \Delta + 2.53} T \quad (3.18)$$

Pers. simpangan (3.18) mempunyai satuan mikrometer sedangkan pers.(3.19) mempunyai satuan cm (1 mikrometer = 10^{-4} cm).

$$A = 10^{0.61M - 1.73 \log \Delta - 1.47} T \quad (3.19)$$

Karena hubungan percepatan (a) dengan *displacement* (A)

$$a = \omega^2 A \quad (3.20)$$

$$a = (2\pi/T)^2 A \quad (3.21)$$

Karena pers. (3.13) dan (3.14) merupakan studi empiris pada batuan dasar sehingga percepatan yang diperoleh ialah percepatan pada batuan dasar. Dengan menurunkan pers (3.19) dan (3.21) maka percepatan pada batuan dasar (a_b) dalam gal yaitu

$$a_b = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 10^{0.61M - 1.73 \log \Delta - 1.47} T \quad (3.21)$$

Persamaan (3.21) dapat disederhanakan lagi menjadi

$$a_b = \frac{10^{0.61M - 1.73 \log \Delta + 0.13}}{T} \quad (3.22)$$

PGA di permukaan (α_s) oleh Kanai (1966) dirumuskan dengan

$$a_s = G(T) \alpha_b \quad (3.23)$$

Dengan $G(T)$ merupakan faktor perbesaran yang dirumuskan dengan

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_g}\right)^2\right\}^2 + \left\{\xi \frac{T}{T_g}\right\}^2}} \quad (3.24)$$

Dari persamaan (3.24) terdapat rasio redaman (ξ) dan predominant period /periode dominan tanah (T_g) yang mempengaruhi perbesaran gelombang seismik. Kemudian Kanai melakukan penelitian mengenai hubungan ini yang dapat dilihat pada Gambar 3.20. Dengan analisa statistik yang menggunakan pendekatan regresi linear didapat hubungan

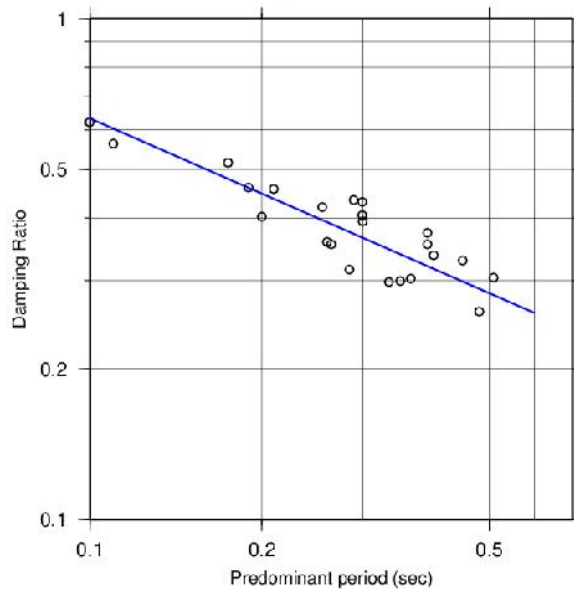
$$\log \xi = \log 0.2 - 0.5 \log T_g \quad (3.25)$$

$$\log \xi = \log 0.2 - \log T_g^{0.5} \quad (3.26)$$

$$\log \xi = \log \frac{0.2}{T_g^{0.5}} \quad (3.27)$$

$$\xi = \frac{0.2}{T_g^{0.5}} \quad (3.28)$$

$$\xi = \frac{0.2}{\sqrt{T_g}} \quad (3.29)$$



Gambar 3.20 Hubungan antara predominant period dengan rasio redaman
(Kanai, 1957)

Dengan mensubstitusikan pers. (3.29) kedalam pers.(3.24) didapat hubungan

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_g}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0.2}{\sqrt{T_g}} \left(\frac{T}{T_g}\right)\right\}^2}} \quad (3.30)$$

Maka PGA dipermukaan (dalam gal) dapat diturunkan dengan pers. (3.22), (3.23) dan (3.30)

$$a_s = \left(\frac{10^{0.61M - 1.73 \log \Delta + 0.13}}{T} \right) \left(\frac{1}{\sqrt{\left\{1 - \left(\frac{T}{T_g}\right)^2\right\}^2 + \left\{\frac{0.2}{\sqrt{T_g}} \left(\frac{T}{T_g}\right)\right\}^2}} \right) \quad (3.31)$$

Nilai percepatan maksimum terjadi apabila periode getaran gempa (T) dengan periode dominan tanah (T_g) memiliki nilai yang sama (resonansi) sehingga faktor perbesaran menjadi $G(T) = \frac{\sqrt{T_g}}{0.2}$ dan pers. (3.31) menjadi

$$a_s = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M - 1.73 \log \Delta + 0.13} \quad (3.32)$$

Persamaan (3.32) merupakan persamaan yang digunakan pada kasus gempa kuat dengan jarak hiposenter menengah (sekitar 50 - 100 km) dan tidak sertamerta dapat digunakan di tiap lokasi, maka untuk mendapatkan nilai atenuasi percepatan yang cocok untuk tiap jarak hiposenter Kanai dkk (1966) melakukan penelitian mengenai konstanta 1.73 dan 0.13 yang ada pada pers. (3.32) dengan menggantinya dengan variabel P dan Q. Sehingga pers. (3.32) menjadi

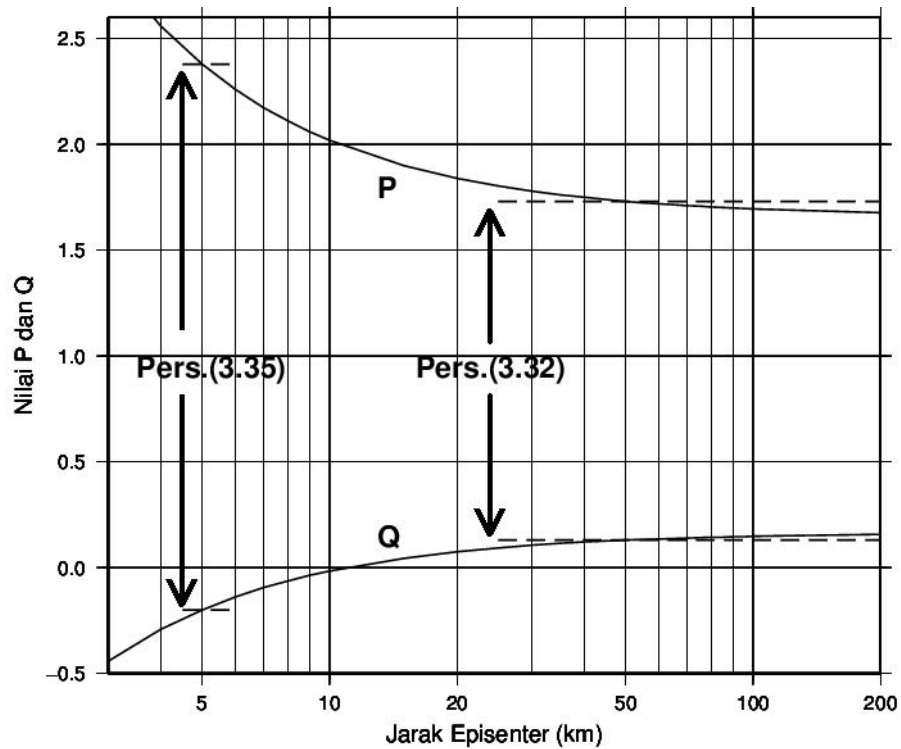
$$a_s = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M - P \log \Delta + Q} \quad (3.33)$$

Kemudian persamaan ini diubah kedalam bentuk

$$\log \left(\frac{a_s \sqrt{T_g}}{5} \right) = 0.61M - P \log \Delta + Q \quad (3.34)$$

Dengan menggunakan data PGA observasi dipermukaan (a_s), periode dominan tanah (T_g), jarak hiposenter (Δ) dan magnitude pada daerah Hoshina dan Wakaho diperoleh nilai P dan Q menjadi 2.35 dan -0.186. Persamaan PGAny menjadi

$$a_s = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M - 2.35 \log \Delta - 0.186} \quad (3.35)$$



Gambar 3.21 Hubungan variabel P dan Q terhadap jarak hiposenter
(Kanai dkk,1966)

Kemudian dengan mencari hubungan antara jarak hiposenter dan konstanta P dan Q didapat hubungan :

$$P = 1.66 + \frac{3.6}{\Delta} \quad (3.36)$$

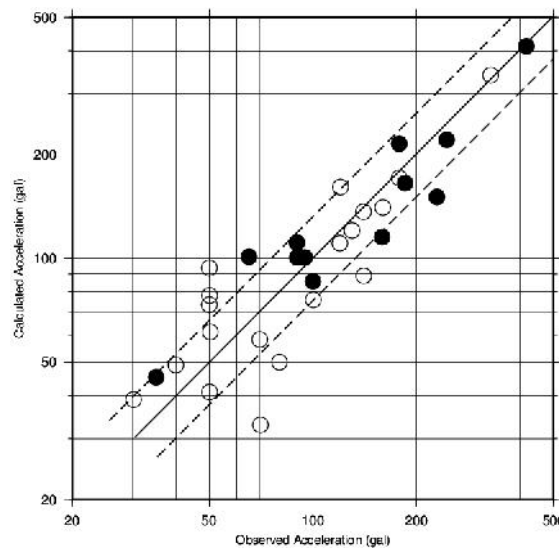
$$Q = 0.167 - \frac{1.83}{\Delta} \quad (3.37)$$

Pers. (3.36) dan (3.37) dapat disubstitusikan kedalam pers. (3.33) sehingga menjadi

$$a_s = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{0.61M - \left(1.66 + \frac{3.6}{\Delta}\right) \log \Delta + 0.167 - \frac{1.83}{\Delta}} \quad (3.38)$$

Sekali lagi asumsi yang digunakan pada pers. (3.38) terjadi pada saat resonansi yakni T (periode gempa di *bedrock*) sama dengan T_g (periode dominan tanah) dan apabila tidak demikian maka perhitungan PGA menggunakan pers. (3.31). Selanjutnya membandingkan hasil percepatan kalkulasi dengan pers. (3.38) dan percepatan observasi pada wilayah matsushiro didapatkan hubungan cukup dekat. Pada Gambar 3.22 dapat dilihat yakni lingkaran hitam merupakan

percepatan akibat gempa di daerah Hoshina dan Wakaho sedangkan lingkaran polos merupakan percepatan akibat gempa diluar wilayah jepang. Selanjutnya magnitude yang digunakan pada pers. (3.38) merupakan magnitude momen (M_w) karena jenis magnitude ini tidak mengalami saturasi.



Gambar 3.22 Hubungan percepatan kalkulasi dan observasi (Kanai dkk,1966)

Selain persamaan atenuasi percepatan kanai diatas ada juga beberapa fungsi atenuasi percepatan yang hanya menghitung percepatan hanya sampai *bedrock* (a_b). Fukushima dan Tanaka (1990) mengembangkan persamaan atenuasi percepatan tanah di Jepang. Persamaan ini hanya mempertimbangkan besarnya magnitude dan jarak kesumber gempa dengan parameter jarak hiposenter (R_{hs}). Dari hasil penelitiannya selama 30 tahun (4500 data *accelerograph*) maka didapatkan persamaan atenuasi yang dirumuskan :

$$\log a_b = 0,41M_w - \log(R_{hs} + 0,032 \times 10^{0,41M_w}) - 0,0034R_{hs} + 1,3 \quad (3.39)$$

Perhitungan PGA di batuan dasar (gal) ini digunakan dalam memperhitungkan *ground shear strain* karena berdasarkan penelitian Nakamura (1996, 2000) dalam perhitungan *ground shear strain* harus melibatkan percepatan getaran tanah di batuan dasar.

3.11 Hubungan PGA dipermukaan dengan tingkat kerusakan

Semakin tinggi PGA dipermukaan pada suatu daerah maka semakin tinggi kerusakan (dalam skala MMI) pada daerah tersebut (David dkk, 1999). Skala

MMI merupakan ukuran intensitas gempa atau tingkat kerusakan akibat gempa. Skala MMI terbagi menjadi 12 skala. Setiap kenaikan skala MMI tingkat kerusakan yang ditimbulkan menjadi lebih berat. Berdasarkan Tabel 3.3 dapat dilihat bahwa kenaikan nilai PGA (gal) akan sebanding dengan Skala MMI.

Tabel 3.3 Perbandingan nilai PGA dengan skala MMI (David dkk, 1999)

No	PGA (gal)	MMI
1	< 1.7	I
2	1.7 – 14	II – III
3	14 – 39	IV
4	39 – 92	V
5	92 – 180	VI
6	180 – 340	VII
7	340 – 650	VIII
8	650 – 1240	IX
9	>1.240	X+

3.12 Indeks Kerentanan Seismik

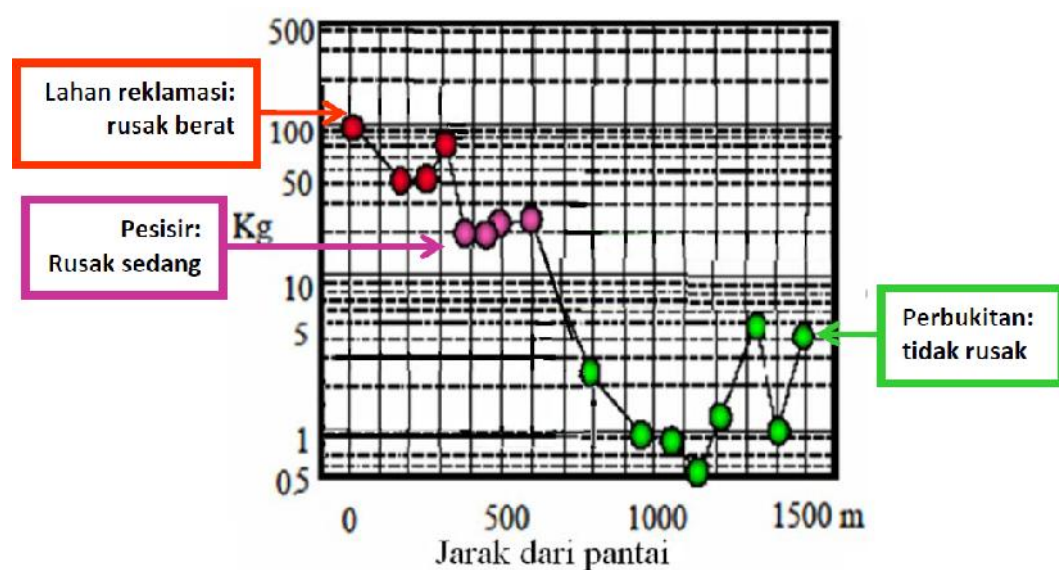
Indeks kerentanan seismik (K_g) merupakan indeks yang menunjukkan tingkat kerentanan suatu lapisan tanah mengalami deformasi. Oleh karenanya, indeks ini berguna untuk pendeteksian daerah yang merupakan zona lemah pada saat terjadinya gempa bumi. Beberapa penelitian seperti Daryono (2011) dan Nakamura (2000) menunjukkan adanya korelasi yang baik antara indeks kerentanan seismik (K_g) dan distribusi kerusakan akibat gempa bumi. Indeks kerentanan seismik dengan faktor amplifikasi (A_g) dan frekuensi dominan tanah (f_g) ini dapat dirumuskan dengan

$$K_g = A_g^2 / f_g \quad (3.40)$$

Nilai faktor amplifikasi (A_g) dan frekuensi dominan (f_g) diperoleh dari kurva H/V yang ditunjukkan pada Gambar 3.15. Kurva H/V ini merupakan hasil observasi dengan metode HVSR.

3.13 Hubungan Indeks Kerentanan seismik dengan tingkat kerusakan

Pada penelitian di distrik marina Nakamura memperoleh hasil bahwa tingkat kerusakan akibat gempa Loma Prieta sebanding dengan besarnya tingkat kerentanan seismik yang didapatkan dari metode HVSR. Pada gambar 3.23 ditunjukkan bahwa daerah reklamasi mengalami kerusakan yang berat kemudian semakin menuju daerah perbukitan kerusakan semakin menurun (tidak mengalami kerusakan) karena nilai indeks kerentanannya semakin mengecil.



Gambar 3.23 Variasi indeks kerentanan seismik di San Fransisco
(Nakamura,2008 dalam Daryono , 2011)

3.14 *Ground shear strain*

Ground shear strain merupakan parameter yang menggambarkan kemampuan material lapisan tanah untuk saling meregang atau bergeser saat terjadi gempabumi, semakin tinggi nilai *ground shear strain* akan menyebabkan tanah semakin mudah terjadi deformasi. Dari hasil penelitian Isihara didapatkan hubungan antara *ground shear strain* dengan sifat dinamik tanah untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai Ground Shear Strain dan fenomena yang terjadi pada tanah (Isihara, 1996)

Size of Strain	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}	10^{-1}
Phenomena	Wave	Vibration	Crack	Settlement	Landslide, Soil Compaction	Liquefaction
Dynamic Properties	Elasticity		Elasto-Plasticity		Collapse	Repeat – and Speed – Effect Loading

Secara sederhana *ground shear strain* dapat ditunjukkan seperti pada Gambar

3.24, *ground shear strain* rata-rata dapat dirumuskan

$$\gamma = A_g \times d_b / h \quad (3.41)$$

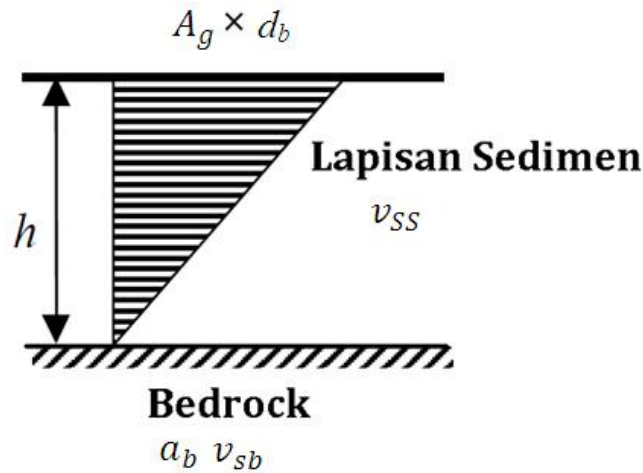
Dengan

γ : *ground shear strain*

A_g : faktor amplifikasi

h : ketebalan lapisan sedimen

d_b : displasemen pada *bedrock*



Gambar 3.24 Sketsa *ground shear strain* (Nakamura, 2000)

Dengan memasukkan kecepatan gelombang S di bedrock (v_{sb}) dan di sedimen (v_{ss}). Maka frekuensi dominannya menjadi

$$f_g = v_{sb} / (4A_g \times h) \quad (3.42)$$

Maka

$$h = \frac{v_{sb}}{(4A_g f_g)} \quad (3.43)$$

Percepatan pada *bedrock* yaitu

$$a_b = \omega^2 d_b \quad (3.44)$$

$$\text{karena } \omega = 2\pi f_g \quad (3.45)$$

maka

$$a_b = (2\pi f_g)^2 d_b \quad (3.46)$$

sehingga

$$d_b = \frac{a_b}{(2\pi f_g)^2} \quad (3.47)$$

Ground shear strain menjadi

$$\gamma = \left(A_g \times \frac{a_b}{(2\pi f_g)^2} \right) \times \left(4A_g \times \frac{f_g}{v_{sb}} \right) \quad (3.48)$$

$$= \left(\frac{A_g^2}{f} \right) \times \left(\frac{a_b}{(\pi^2 v_{sb})} \right) \quad (3.49)$$

Nakamura (1996) mengasumsikan kecepatan gelombang S di batuan dasar adalah 600 m/s, maka $1/(\pi^2 v_{sb}) = 1,69 \times 10^{-6}$ (s/m). Kemudian dengan mengasumsikan bahwa *ground shear strain* efektif adalah 60% dari *ground shear strain* maksimum. Maka *ground shear strain* efektif menjadi

$$\gamma = \left(\frac{A_g^2}{f_g} \right) \times \left(\frac{a_b}{(\pi^2 v_{sb})} \right) \times 60\% \quad (3.50)$$

$$= K_g \times (10^{-6}) \times a_b \quad (3.51)$$

3.15 Hubungan *Ground Shear Strain* dengan tingkat kerusakan

Penelitian mengenai nilai *ground shear strain* lapisan tanah permukaan untuk pengkajian bahaya gempabumi sudah dilakukan oleh Nakamura et al. (2000). Dalam penelitiannya di Kobe, Nakamura et al. (2000) berhasil menjawab mengapa gempabumi Kobe 1995 (M 6,9) menyebabkan kerusakan parah di kota Kobe dan sekitarnya. Hasil penelitian Nakamura et al. (2000) menunjukkan bahwa saat terjadi gempabumi Kobe 1995, perhitungan *ground shear strain* lapisan tanah di zona kerusakan parah mencapai $\gamma = 1 \sim 2 \times 10^{-3}$. Nilai *ground shear strain* sebesar ini berdasarkan penelitian Nakamura et al. (2000) sudah dapat memicu terjadinya deformasi tanah hingga merusakkan pondasi bangunan rumah.

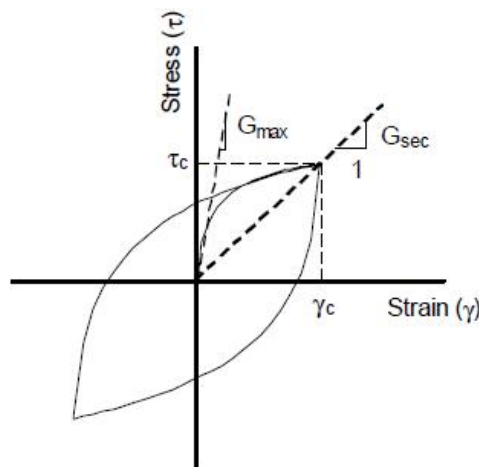
3.16 Properti Dinamik Tanah

Penentuan respon tanah selama terjadinya gempa, sangat ditentukan oleh modulus geser dan damping ratio dari tanah yang bersangkutan. Modulus geser G dan damping ratio D tergantung pada beberapa faktor, seperti jenis tanah, tekanan keliling (*confining pressure*), tingkat regangan dinamik, derajat kejenuhan, frekuensi, dan derajat amplifikasi pembebanan, magnituda tegangan dinamik, dan regangan dinamik (Hardin & Black, 1969).

3.16.1 Modulus Geser (G)

Dari hasil penelitian yang pernah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa besarnya kekakuan tanah, secara umum sangat dipengaruhi oleh tingkat regangan siklis, angka pori, tegangan efektif rata-rata, indeks plastisitas, *over consolidated ratio*, dan frekuensi pembebanan siklis. Harga modulus geser *secant* pada elemen tanah (selanjutnya disebut modulus geser G), bervariasi terhadap amplitudo regangan geser siklis. Pada tingkat regangan kecil, G mempunyai harga yang besar dan selanjutnya mengecil untuk regangan yang semakin besar. Modulus geser G pada kondisi regangan $< 3 \times 10^{-4} \%$, dinyatakan sebagai modulus geser maksimum (disebut G_{max}) yang berhubungan dengan massa jenis (ρ) dan kecepatan gelombang geser (v_s).

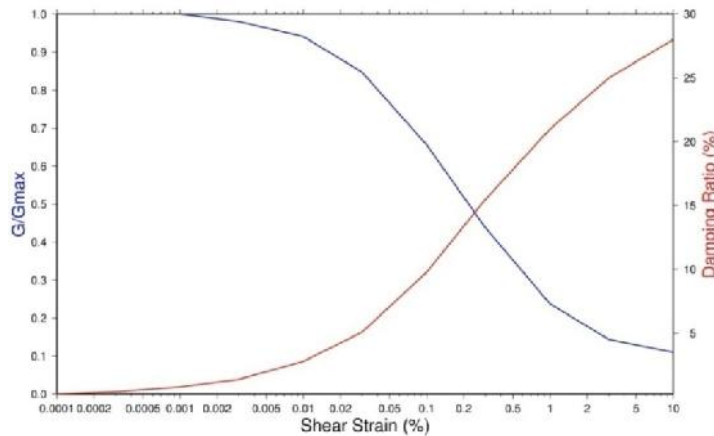
$$G_{max} = \rho v_s^2 \quad (3.52)$$



Gambar 3.25 Hubungan G_{max} dan G_{sec}

Karena modulus geser berubah menurut besarnya *shear stress* dan *shear strain* sehingga modulus geser di sederhanakan kedalam *secant shear modulus* (G_{sec}). Parameter G_{sec} ini dirumuskan dengan

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (3.53)$$



Gambar 3.26 Grafik *Modulus Reduction* dan *Damping Ratio* (Bardet dan Tobita, 2001)

Shear Modulus Reduction (G/G_{max}) merupakan rasio modulus geser yang mempunyai nilai semakin kecil dibawah 1 (satu). Variasi harga rasio modulus geser terhadap beban siklis dan *damping ratio* ditunjukkan pada gambar 3.26.

3.16.2 Damping Ratio (ξ)

Damping ratio adalah parameter bahan yang menunjukkan sifat redaman dalam tanah. Parameter ini didasarkan kepada kemampuan suatu sistem untuk menyerap energi dinamik. Damping ratio juga dipengaruhi oleh regangan geser. Secara teori tidak ada energi disipasi pada regangan geser yang kecil. Energi disipasi merupakan perubahan energi mekanik kebentuk energi lainnya yang biasanya berupa energi panas. Energi disipasi (W_d) selama satu siklus pembebanan merupakan luasan kurva stress-strain.

$$W_d = \oint \tau d\gamma \quad (3.54)$$

Sedangkan energi regangan maksimum (W_s) yang tersimpan pada sistem yaitu

$$W_s = \frac{1}{2} \tau_c \gamma_c = \frac{1}{2} G \gamma_c^2 \quad (3.55)$$

Critical Damping Ratio (ξ) dapat dinyatakan dalam energi disipasi (W_d) dan energi regangan maksimum yang tersimpan dalam sistem (W_s) yaitu :

$$\xi = \frac{W_d}{4\pi W_s} \quad (3.56)$$

3.17 Ground Motion Synthetic

Ground Motion Synthetic merupakan getaran tanah *artificial* yang digunakan untuk memperhitungkan beban gempa terhadap struktur bangunan yang akan dibuat dipermukaan atau juga sebagai dasar untuk melakukan *assessment* terhadap struktur dari bangunan yang telah didirikan sebelumnya. Dalam menentukan *ground motion synthetic* diperlukan data *time history* percepatan aktual dan spektra target, tahapan dalam membuat *ground motion synthetic* yaitu:

1. Menghitung spektra target dengan atenuasi Young (1997). Atenuasi Young digunakan karena atenuasi ini untuk menghitung spektra percepatan akibat gempa subduksi.
2. Merubah *time history* percepatan aktual dengan transformasi Fourier sehingga menjadi spektra aktual.
3. Mencocokkan spektra aktual dengan spektra target sehingga menjadi spektra desain melalui tahap *spectral matching*.
4. Mentransformasi Fourier spektra desain menjadi *time history* percepatan desain. Perhitungan spektra target menggunakan pers. atenuasi Young (1997) pada batuan yaitu:

$$\ln(y) = 0.2418 + 1.414M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.7818e^{0.554M}) + 0.00607H + 0.3846Z_T \quad (3.57)$$

Persamaan ini menggunakan menggunakan M (Magnitudo), y (percepatan dalam g), r_{rup} (jarak *rupture ke site* dalam km), H (kedalaman gempa dalam km) dan Z_T (jenis sumber, 0 untuk gempa *interface* dan 1 untuk gempa *intraslab*). Selanjutnya nilai standar deviasi (SD) dari percepatan ini dirumuskan dengan :

$$SD = C_4 + C_5M \quad (3.58)$$

Tabel 3.5 Tabel nilai parameter C_1 , C_2 , C_3 , C_4 dan C_5 untuk batuan (Young, 1997)

Period (s)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
PGA	0.0	0.0	-2.552	1.45	-0.1
0.075	1.275	0.0	-2.707	1.45	-0.1
0.1	1.188	-0.0011	-2.655	1.45	-0.1
0.2	0.722	-0.0027	-2.528	1.45	-0.1
0.3	0.246	-0.0036	-2.454	1.45	-0.1

0.4	-0.115	-0.0043	-2.401	1.45	-0.1
0.5	-0.400	-0.0048	-2.360	1.45	-0.1
0.75	-1.149	-0.0057	-2.286	1.45	-0.1
1.0	-1.736	-0.0064	-2.234	1.45	-0.1
1.5	-2.634	-0.0073	-2.160	1.50	-0.1
2.0	-3.328	-0.0080	-2.107	1.55	-0.1
3.0	-4.511	-0.0089	-2.033	1.65	-0.1

Selain pada batuan ada juga pers. atenuasi Young (1997) untuk menghitung PGA pada tanah. Persamaan ini yaitu :

$$\ln(y) = -0.6687 + 1.438M + C_1 + C_2(10 - M)^3 + C_3 \ln(r_{rup} + 1.097e^{0.617M}) + 0.00648H + 0.3643Z_T \quad (3.59)$$

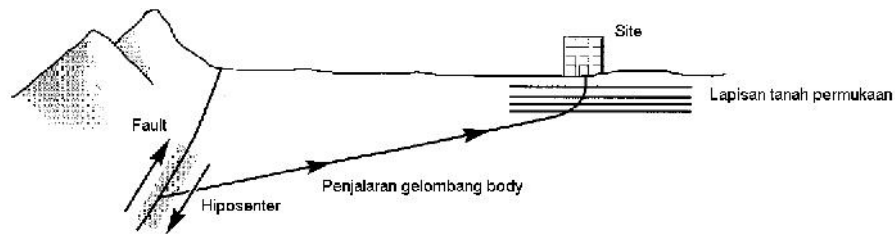
Tabel 3.6 Tabel nilai parameter C_1 , C_2 , C_3 , C_4 dan C_5 untuk tanah (Young, 1997)

Period (s)	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
PGA	0.0	0.0	-2.329	1.45	-0.1
0.075	2.400	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.1	2.516	-0.0019	-2.697	1.45	-0.1
0.2	1.549	-0.0019	-2.464	1.45	-0.1
0.3	0.793	-0.0020	-2.327	1.45	-0.1
0.4	0.144	-0.0020	-2.230	1.45	-0.1
0.5	-0.438	-0.0035	-2.140	1.45	-0.1
0.75	-1.704	-0.0048	-1.952	1.45	-0.1
1.0	-2.870	-0.0066	-1.785	1.45	-0.1
1.5	-5.101	-0.0114	-1.470	1.50	-0.1
2.0	-6.433	-0.0164	-1.290	1.55	-0.1
3.0	-6.670	-0.0221	-1.347	1.65	-0.1
4.0	-7.618	-0.0235	-1.272	1.65	-0.1

3.18 Analisis respon tanah 1D

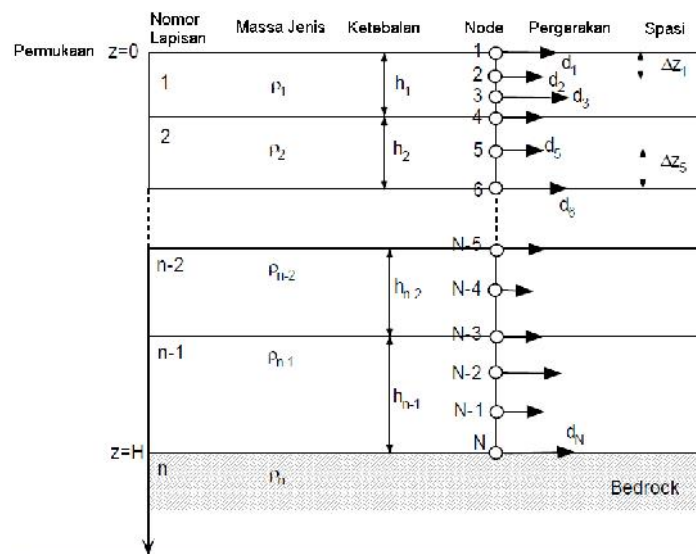
Saat terjadi gempa pada kerak bumi, gelombang *body* menjalar dari sumber (hiposenter) ke segala arah. Ketika mencapai batas material geologi yang berbeda gelombang *body* akan mengalami pemantulan dan pembiasan. Saat menuju kepermukaan gelombang *body* ini akan mengalami pembiasan sehingga arah rambat gelombang *body* mendekati arah vertikal. Hal ini didasarkan karena secara umum kecepatan gelombang P (v_p) dan S (v_s) semakin menuju kepermukaan nilainya semakin mengecil sehingga pembiasan gelombang *body* akan dibiaskan menuju garis normal yang akhirnya arah rambat gelombang *body* akan mendekati vertikal. Salah satu teori rambat gelombang yang dipakai adalah

teori rambat gelombang S satu dimensi. Teori rambat gelombang S satu dimensi ini digunakan dalam analisis respon tanah satu dimensi.



Gambar 3.27 Penjalaran gelombang body dari hiposenter ke permukaan (Kramer, 1996)

Analisis respons tanah 1D untuk n lapis tanah dengan lapisan ke- n ialah *bedrock*. Analisis ini mengasumsikan bahwa gelombang seismik menjalar dalam arah vertikal dan lapisan tanah mempunyai panjang tak terbatas dalam arah horizontal. Parameter yang digunakan dalam analisis ini yaitu massa jenis (ρ), kedalaman (z), waktu (t), tegangan geser (τ) dan viskositas (η). Dalam analisis respons tanah, terdapat ketentuan bahwa pada kondisi batas lapisan dipermukaan tanah ($z = 0$) tegangan gesernya sama dengan nol ($\tau = 0$) dan pada batas lapisan dengan *bedrock* ($z = H$) tegangan gesernya sama dengan tegangan geser *bedrock* ($\tau = \tau_B$).



Gambar 3.28 Satu dimensi sistem lapisan tanah dan diskritisasi spasial (Bardet dan Tobita, 2001)

Tegangan geser pada *bedrock* dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa *bedrock* elastic. Gelombang S yang menjalar dari *bedrock* ke permukaan memiliki kecepatan v_s . Simpangan partikel d_I saat gelombang datang pada *bedrock* ialah

$$d_I = d_I(z + V_s t) \quad (3.60)$$

Persamaan untuk simpangan partikel d_R saat gelombang pantul pada pertemuan *bedrock* dan tanah

$$d_R = d_R(z - V_s t) \quad (3.61)$$

Tegangan geser pada *bedrock* (τ_B) dapat dirumuskan

$$\tau_B = \mu \left(\frac{\partial d_I}{\partial z} + \frac{\partial d_R}{\partial z} \right) \quad (3.62)$$

Dengan μ ialah modulus geser pada *bedrock*. Dengan menurunkan pers.

$$\frac{\partial d_I}{\partial z} = \frac{v_I}{v_s} \quad (3.63)$$

Dan

$$\frac{\partial d_R}{\partial z} = - \frac{v_R}{v_s} \quad (3.64)$$

Karena v_I dan v_R ialah kecepatan getaran partikel akibat gelombang datang dan pantul. Kecepatan getaran partikel v_B pada $z = H$ ialah

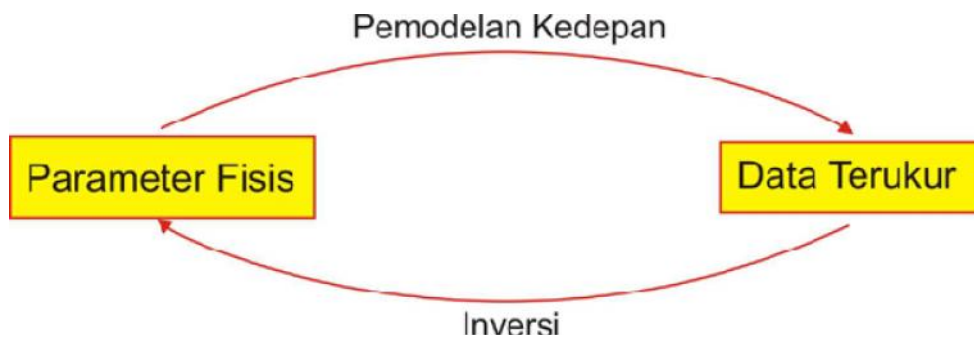
$$v_B = v_I + v_R \quad (3.65)$$

Dengan menggunakan pers. Tegangan geser pada *bedrock* (τ_B) menjadi

$$\tau_B = \frac{\mu}{v_s} (2v_I - v_B) = \rho v_s (2v_I - v_B) \quad (3.66)$$

3.19 Inversi kurva H/V

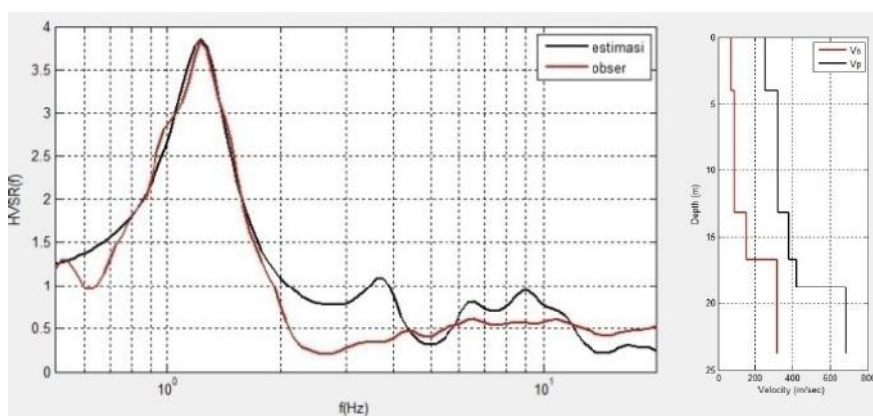
Inversi dilakukan melalui suatu penjabaran matematis untuk memperoleh informasi sistem fisika berdasarkan data observasi terhadap suatu sistem tersebut (Grandis, 2009). Inversi digunakan untuk menyediakan kerangka matematika dalam mentransformasi data pengukuran suatu data ruang model untuk memperkirakan parameter model seperti pada gambar 3.29



Gambar 3.29 Inversi dan pemodelan inversi

Dalam geofisika, pemecahan masalah inversi bertujuan untuk menentukan struktur bumi. Tergantung pada metode geofisika yang digunakan, struktur bumi dapat dijelaskan dengan menggunakan distribusi listrik resistivitas (geolistrik dan metode elektromagnetik), kecepatan gelombang (seismik dan seismologi), densitas (Gravimetri), dll. Sifat-sifat fisis inilah yang digunakan untuk menggambarkan struktur bawah permukaan. Kurva H/V merupakan salah satu metode untuk mengestimasi frekuensi natural dan faktor amplifikasi setempat.

Herak (2008) memodelkan kurva H/V berdasarkan gelombang badan. Hasil frekuensi natural pendekatan ini cocok dengan frekuensi H/V observasi (Herak dkk, 2009). Sebagaimana dipaparkan oleh Herak dalam pengembangan software ModelHVSRe bahwa kurva HVSR dipengaruhi oleh 6 parameter, yaitu v_s , v_p , Q_s , Q_p , h dan ρ yang menunjukkan ketidakunikan yang sangat tinggi sebagaimana dipaparkan pula oleh Dal Moro (2010).



Gambar 3.30 Hasil inversi dengan menggunakan ModelHVSRe (Mufida dkk, 2013)

Maka untuk mendapatkan nilai v_s yang akurat, diperlukan konstrain saat proses inversi kurva HVSR, dalam hal ini digunakan data bor yang diberikan untuk inisialisasi atau input yang dimasukkan saat menginversi. Mufida dkk (2013) melakukan penelitian mengenai *profiling* kecepatan gelombang geser (V_s) di Surabaya berdasarkan data mikrotremor. Data v_s tiap lapisan di peroleh dari inversi kurva H/V seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.30.

3.20 Penentuan Vs30 dan Site Class

Vs30 merupakan kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m . Vs30 dapat diperoleh dari hasil inversi kurva H/V sampai kedalaman 30 meter. Berdasarkan Tabel 3.7 maka site class tanah dapat ditentukan sesuai dengan Vs30.

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{v_{s,i}}} \quad (3.67)$$

Dengan :

V_{S30} : Kecepatan rata gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m

h_i : ketebalan lapisan ke – i diantara 0 sampai 30 m

v_{si} : kecepatan gelombang geser pada lapisan ke – i

Tabel 3.7 Penggolongan *site class* berdasarkan v_s , $\bar{N}$ dan $\bar{S}_u$ Eurocode 8

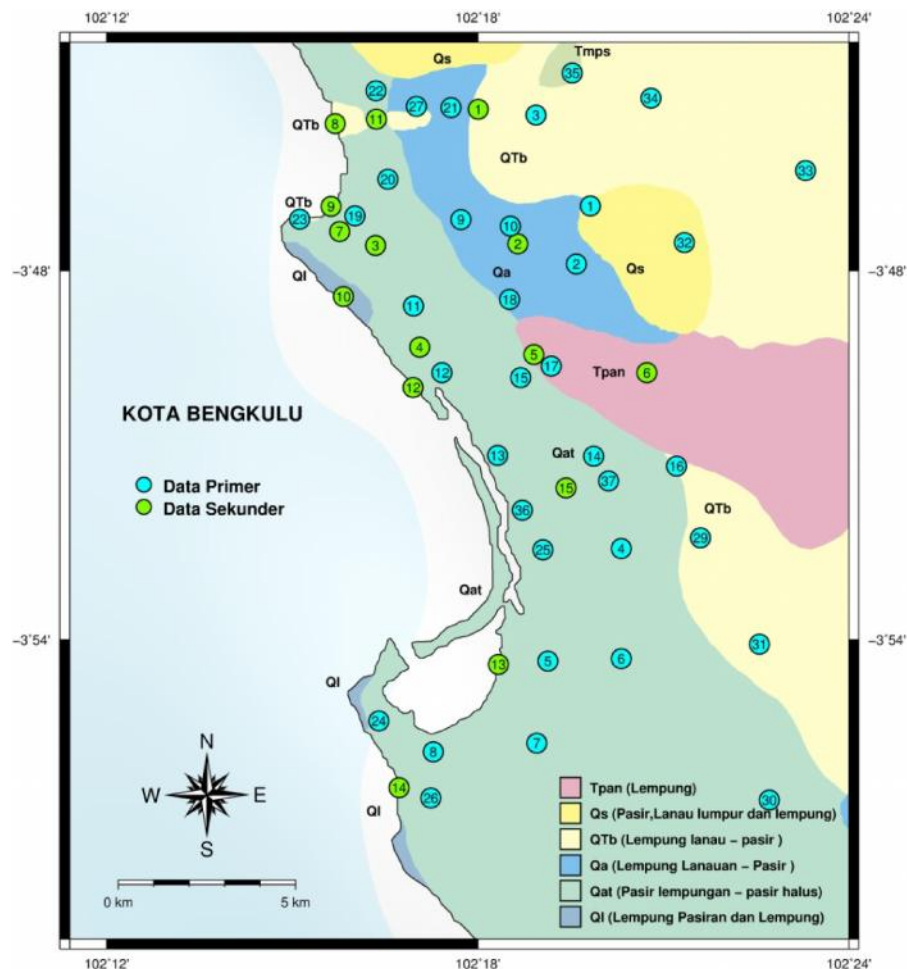
Site Class	Deskripsi	Parameter		
		Kecepatan gelombang geser rata-rata $\bar{v}_s$ (m/s)	Nilai hasil Test Penetrasi Standar rata-rata $\bar{N}$	Kuat geser nilai alir rata-rata $\bar{S}_u$
A	Hard rock	> 1500	-	-
B	Rock	760 – 1500	-	-
C	Very dense soil and soft rock	360 – 760	> 50	≥ 100
D	Stiff soil profile	180 - 360	15 – 50	50 – 100
E	Soft soil profile	< 180	< 15	≤ 50
F	Soil require site-specific evaluation	Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi		

BAB IV

METODOLOGI PENELITIAN

4.1 Lokasi, Cakupan Wilayah Penelitian dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian dalam penelitian ini adalah data mikrotremor yang diambil di Kota Bengkulu dengan menggunakan portabel seismograf (TDL-303). Selain itu digunakan juga menggunakan data sekunder. Data sekunder ini merupakan data mikrotremor yang pernah diukur sebelumnya. Data pengukuran ini diatur dengan mempertimbangkan kondisi geologi di Kota Bengkulu. Jumlah keseluruhan data yang akan diperoleh yakni 52 data dengan 37 data primer dan 15 data sekunder. Untuk lebih jelasnya lokasi pengukuran mikrotremor dapat dilihat pada gambar 4.1. Waktu penelitian dilakukan pada 20 Oktober 2014 – 20 Nopember 2014.



Gambar 4.1 Peta lokasi pengukuran mikrotremor berdasarkan satuan geologi

4.2 Data yang diperlukan

Data yang diperlukan dalam melakukan penelitian ini yakni :

1. Data rekaman mikrotremor
2. Data bor
3. Data *time history* percepatan
4. Data Peta Dasar dan Peta Geologi Kota Bengkulu dan Sekitarnya.

4.3 Alat yang digunakan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah :

1. Laptop dengan ketentuan minimal RAM : 1G dan Processor : 2,0 GHZ dengan Sistem Operasi Windows XP SP2.
2. Software pengolahan yaitu DataPro, Geopsy, ArcGis dan Surfer
 - Geopys merupakan software analisa spektra
 - GMT, Google Earth, dan ArcGIS 9.3 digunakan untuk pemetaan
 - Model HVSR digunakan untuk mencari nilai Vs perlapisan
 - Software NERA untuk mencari variasi *ground shear strain* perlapisan
 - Software SeismoMatch untuk membuat *ground motion synthetic*
3. Seperangkat Seismometer portable short period tipe TDL-303 (3 Komponen)
 - Seismometer digunakan untuk mengambil data mikrotremor.
4. Global Position System (GPS) Portable
 - GPS digunakan untuk memberikan informasi lintang dan bujur titik penelitian.
5. ACCU dan Inverter
 - Accu dan Inverter digunakan sebagai sumber daya peralatan.

4.4 Cara memperoleh data

Data mikrotremor di peroleh dengan cara pengukuran dengan Seismometer TDL-303. Pengukuran dengan menggunakan mikrotremor ini dilakukan dalam dua tahap yaitu penentuan titik lokasi penelitian dan pelaksanaan pengukuran mikrotremor. Penentuan titik lokasi penelitian dilakukan dengan bantuan *Google Earth* untuk memplot titik lokasi penelitian. Titik penelitian ini

diatur dengan mempertimbangkan kondisi geologi dan akses jalan yang ada di Kota Bengkulu. Dari penentuan titik ini akan didapatkan 37 titik lokasi pengambilan data yang selanjutnya akan dilaksanakannya pengukuran data mikrotremor.

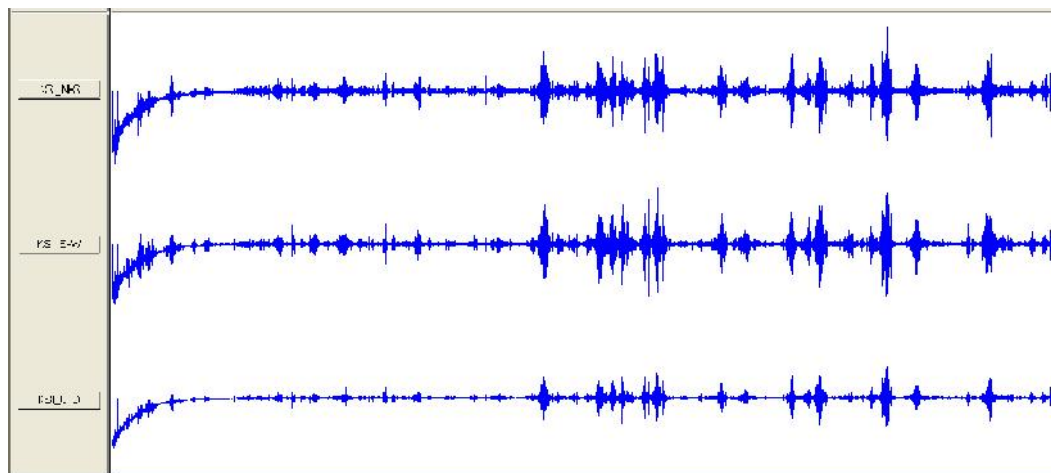
Tabel 4.1 Panduan pengukuran mikrotremor (SESAME, 2004)

	Saran yang dianjurkan	
	f_a minimum yang diharapkan (Hz)	Durasi perekaman minimum (menit)
Durasi perekaman	0,2	30
	0,5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
Parameter Perekaman	<ul style="list-style-type: none"> Atur level sensor seismograf (leveling) seperti yang telah disarankan Tetapkan level gain semaksimal mungkin tanpa saturasi (jenuh) sinyal 	
<i>Coupling soil-sensor</i>	<ul style="list-style-type: none"> Atur sensor langsung pada permukaan tanah Hindari menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan 	
Coupling soil-sensor buatan/artificial	<ul style="list-style-type: none"> Hindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa. Pada kemiringan yang curam dimana sulit mendapatkan level Sensor yang baik, pasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir 	
Keberadaan bangunan/pohon	<ul style="list-style-type: none"> Hindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi, jika tiupan angin di atas ± 5 m/s. Kondisi ini sangat mempengaruhi hasil analisis HVSR yang ditunjukkan dengan suatu kemunculan frekuensi rendah pada kurva. Hindari pengukuran di lokasi tempat parkir, pipa air dan gorong-gorong. 	
Kondisi cuaca	<ul style="list-style-type: none"> Angin : lindungi sensor jika kecepatan angin di atas ± 5 m/s. Hujan : hindari pengukuran mikrotremor di bawah terpaan hujan lebat, jika hujan ringan tidak akan terlalu berpengaruh. Temperatur : periksa sensor seismograf dan catat instruksi pabrik. 	
Gangguan	<ul style="list-style-type: none"> Sumber monokromatik : hindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industry, pompa air, generator yang sedang beroperasi. Sumber sementara : jika terdapat getaran <i>transient</i> (jejak langkah kaki, mobil lewat) tingkatan durasi pengukuran untuk memberikan jendela yang cukup untuk analisis setelah gangguan tersebut hilang. 	

Pelaksanaan pengambilan data mikrotremor mengacu pada standar *Site Effects Assesment Using Ambient Excitation* (SESAME). SESAME merupakan proyek riset para peneliti di Eropa yang meneliti tentang getaran mikrotremor. Standar mengenai prosedur, analisis dan interpretasi sudah disusun oleh para peneliti ini. Sehingga untuk mendapatkan hasil dengan kualitas yang baik dapat mengacu pada standar yang telah ditetapkan para peneliti ini. Pada Tabel 4.1 terdapat panduan mengenai pelaksanaan pengambilan data mikrotremor. Lamanya

pengambilan data akan memberikan hasil yang baik apabila frekuensi dominan tempat penelitian cukup rendah. Sehingga dalam pengambilan data dilapangan diambil data selama 30 menit untuk semua lokasi penelitian. Dengan asumsi bahwa selama waktu tersebut data yang diperoleh baik (representatif).

Data hasil pengukuran mikrotremor berupa data gelombang mikrotremor yang dapat dilihat pada gambar

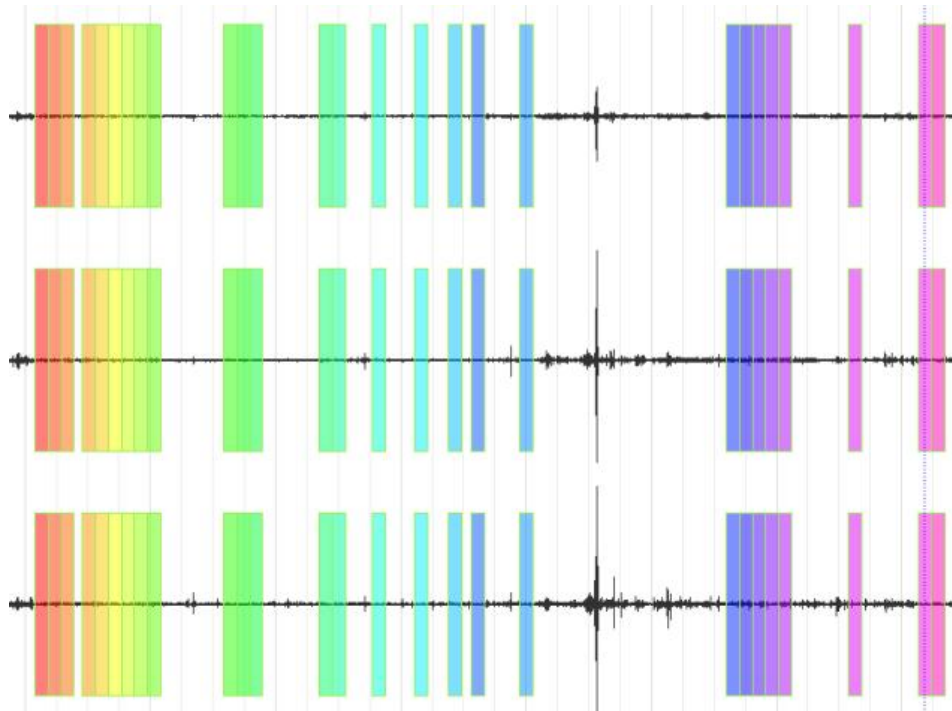


Gambar 4.2 Contoh data hasil pengukuran mikrotremor

4.5 Analisis Data Mikrotremor

Setelah melakukan pengukuran mikrotremor kemudian dilakukan proses pengolahan. Proses pengolahan ini menggunakan software geopsy. Data hasil pengukuran merupakan data yang berformat .trc kemudian dengan program data pro di konversi kedalam format ASCII. Proses konversi ini menghasilkan empat file yakni file header, file data komponen Vertikal (U-D), file data komponen Horizontal (E-W) dan file data komponen Horizontal (N-S). Setelah itu data ini diubah kedalam format SAF (*Sesame Ascii Format*). Data ini kemudian dapat olah dengan software geopsy. Tahapan pengolahan dengan software geopsy yakni :

1. Dilakukan low pass filter 20 Hz karena pada frekuensi lebih dari 20 Hz tidak digunakan dalam analisis risiko gempabumi (Chateline dkk,2007).
2. Proses *windowing* (penjendelaan sinyal dalam kawasan waktu) dilakukan dengan manual. Waktu dalam windowing ini diatur dalam 20 sekon , karena panjang window minimal $I_w > 10/f_0$ dengan f_0 diasumsikan $> 0,5$ Hz.



Gambar 4.3 Proses windowing data mikrotremor

3. Setelah dilakukan windowing selanjutnya data sinyal ini di transformasi Fourier.

Tiap – tiap komponen (Vertikal, Horizontal (N-S) dan Horizontal (E-W) di transformasi Fourier. Spektrum Fourier komponen horizontal dirata-ratakan menggunakan akar kuadrat. Kurva H/V diperoleh dari pembagian spektrum Fourier komponen horizontal terhadap spektrum komponen vertikal yang dirumuskan dengan

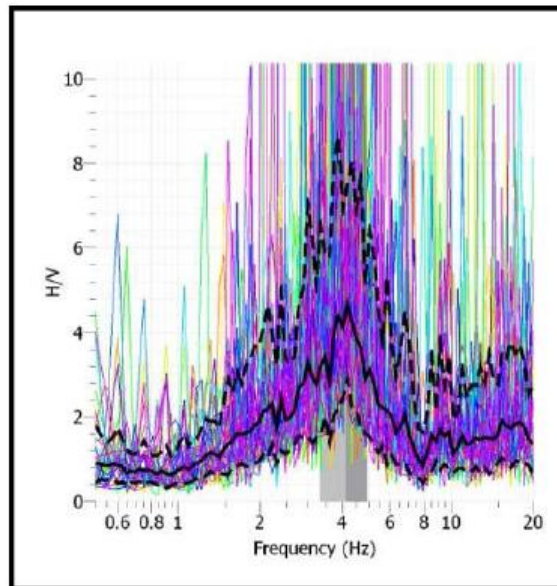
$$\frac{H}{V} = \frac{\sqrt{[(S_{NS})^2 + (S_{EW})^2]}}{S_{vertikal}} \quad (4.1)$$

Dengan :

H : komponen Horizontal

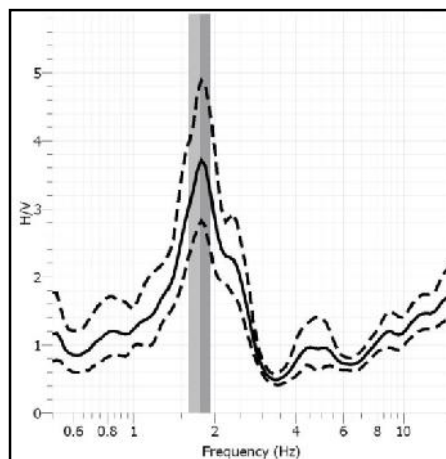
V : komponen Vertikal

S : Spektrum



Gambar 4.4 Kurva H/V setelah dilakukan proses transformasi Fourier (Harlianto, 2013)

Setelah hasil transformasi ini kurva H/V masih terlihat kasar sehingga perlu dilakukan smoothing/ penghalusan. Proses penghalusan ini dilakukan berdasarkan metode Kono-Omachi sehingga hasil kurva H/V menjadi halus seperti pada gambar.



Gambar 4.5 Kurva H/V setelah dilakukan penghalusan Kono-Omachi
(SESAME, 2004)

4.6 Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik

Perhitungan Indeks kerentanan seismik dilakukan berdasarkan persamaan (3.40) dan diperoleh 52 sebaran nilai indeks kerentanan seismik. Dari hasil ini

kemudian dilakukan interpolasi data untuk mendapatkan sebarannya dalam bentuk peta indeks kerentanan seismik.

4.7 Perhitungan PGA

Perhitungan PGA ini dibagi menjadi dua yakni PGA dipermukaan yang menggunakan rumus atenuasi Kanai dan PGA di *bedrock* yang menggunakan rumus atenuasi Fukushima dan Tanaka. Untuk perhitungan PGA di permukaan tahapannya yaitu :

1. Menghitung jarak tiap *site* ke lokasi hiposenter gempa 12 september 2007, *site* ini merupakan tempat pengukuran mikrotremor.
2. Melakukan perhitungan PGA dengan data frekuensi dominan hasil pengukuran mikrotremor dengan data jarak hiposenter gempa 12 september 2007 dengan persamaan (3.38).
3. Kemudian menginterpolasi data PGA dipermukaan untuk dilakukan proses pemetaan untuk melihat distribusi PGA pada kejadian Gempa 12 September 2007.

Proses perhitungan PGA di *bedrock* dilakukan dengan persamaan atenuasi Fukushima dan Tanaka (1990) yaitu :

1. Melakukan perhitungan jarak hiposenter dari *site* lokasi.
2. Menghitung PGA di batuan dasar dengan persamaan atenuasi Fukushima dan Tanaka dengan persamaan (3.39).

4.8 Perhitungan v_s tiap lapisan dan Vs30

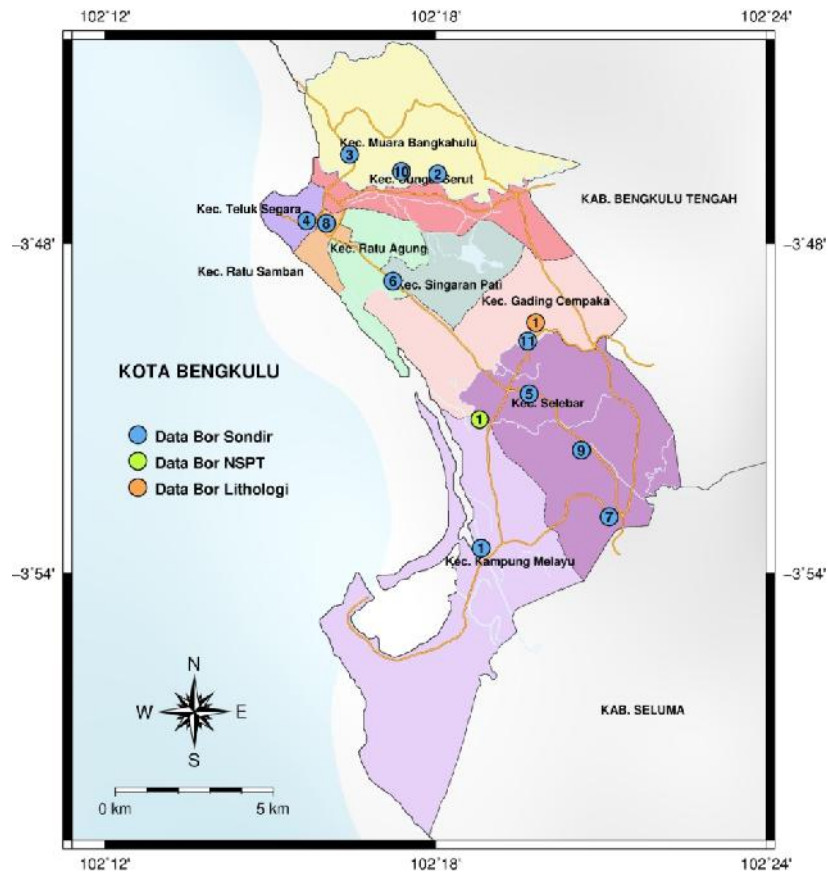
Untuk mendapatkan Vs tiap lapisan, kurva H/V di inversi terlebih dahulu dengan data bor yang berdekatan dengan lokasi pengukuran mikrotremor. Konversi v_s untuk data bor sondir menggunakan persamaan Piratheepan (2002), dengan q_c dan f_s dalam satuan kPa serta kedalaman (D) dalam satuan meter.

$$v_s = 32.3 \times q_c^{0.089} \times f_s^{0.121} \times D^{0.215} \quad (4.2)$$

Sedangkan konversi v_s untuk data NSPT menggunakan persamaan Imai dan Tonouchi (1982)

$$v_s = 91.7 \times N^{0.26} \quad (4.3)$$

Selain sondir dan NSPT didapatkan juga data bor lithologi batuan nya saja. Sebaran data bor sondir dan NSPT dapat dilihat pada gambar 4.6



Gambar 4.6 Sebaran data bor di Kota Bengkulu

Setelah di dapatkan data kecepatan geser tiap lapisan maka dapat ditentukan Vs30 berdasarkan persamaan (3.67). Untuk melihat sebaran Vs30 nya dilakukan interpolasi Vs30 dan di buat dalam bentuk Peta Vs30.

4.9 Perhitungan Ketebalan Sedimen

Perhitungan ketebalan sedimen ini dapat dilakukan dengan menggunakan data frekuensi dominan dan nilai Vs30. Untuk perhitungannya dapat dilakukan dengan persamaan (3.11). Hasil dari ketebalan sedimen ini kemudian di interpolasi dan dibuat dalam bentuk peta untuk memudahkan interpretasi data.

4.10 Perhitungan *Ground Shear Strain*

Perhitungan nilai *ground shear strain* gempa 12 september 2007 dilakukan berdasarkan persamaan sebelumnya yaitu mengalikan indeks kerentanan seismik dengan PGA di *bedrock* sesuai dengan persamaan (3.50). Selanjutnya dilakukan pemetaan *ground shear strain* gempa 12 september 2007.

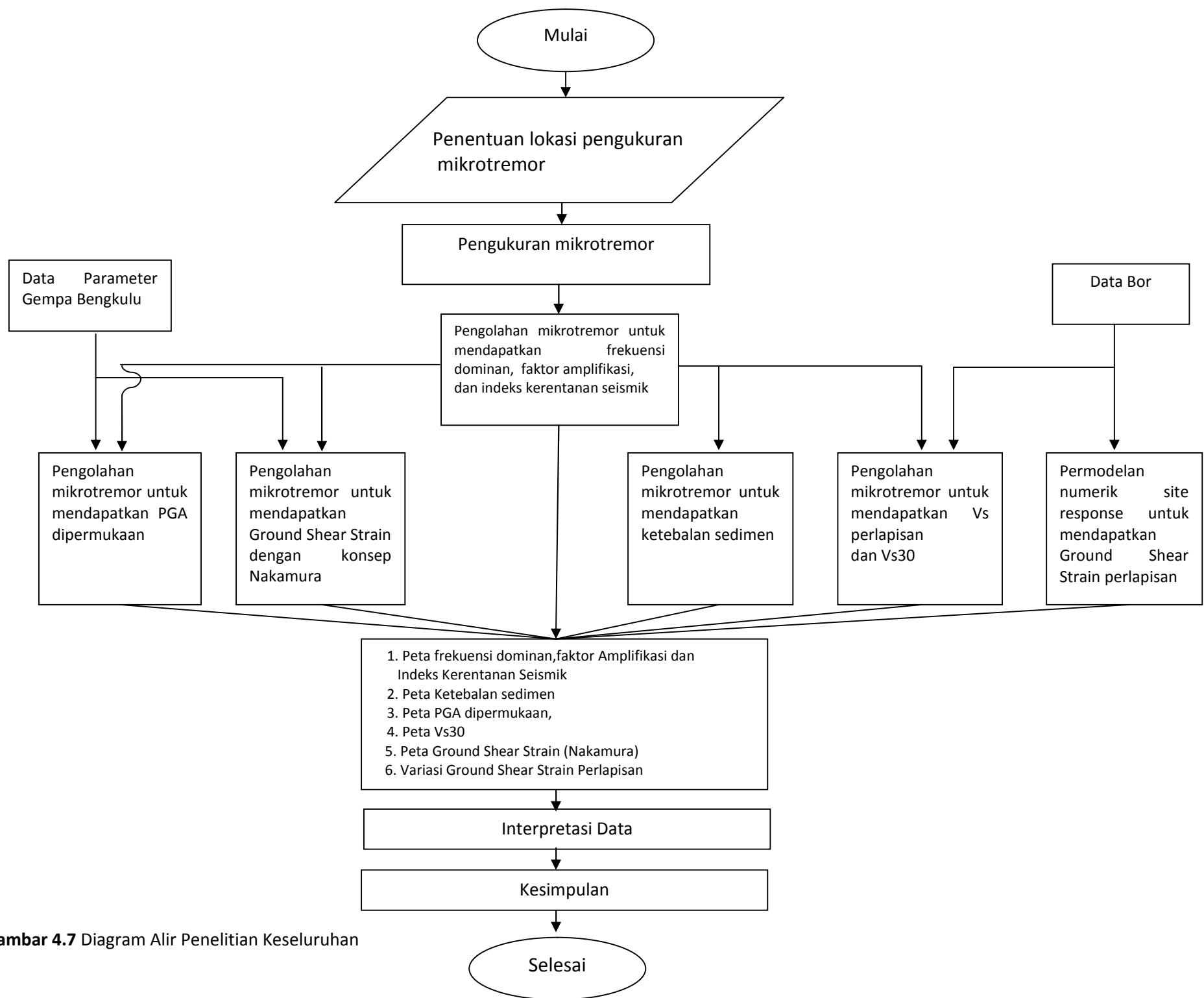
4.11 Data parameter gempa yang digunakan

Gempa Bengkulu 12 September 2007 memiliki parameter magnitudo (Mw) 8.4 SR, lokasi pada 4.44 LS dan 101.37 dan kedalaman 34 km. Sesuai dengan posisinya gempa ini terjadi pada daerah subduksi dan secara kedalaman gempa ini merupakan gempa *interface*. Gempa *interface* merupakan gempa subduksi yang terjadi pada kedalaman kurang dari 50 km (Young dkk, 1997).

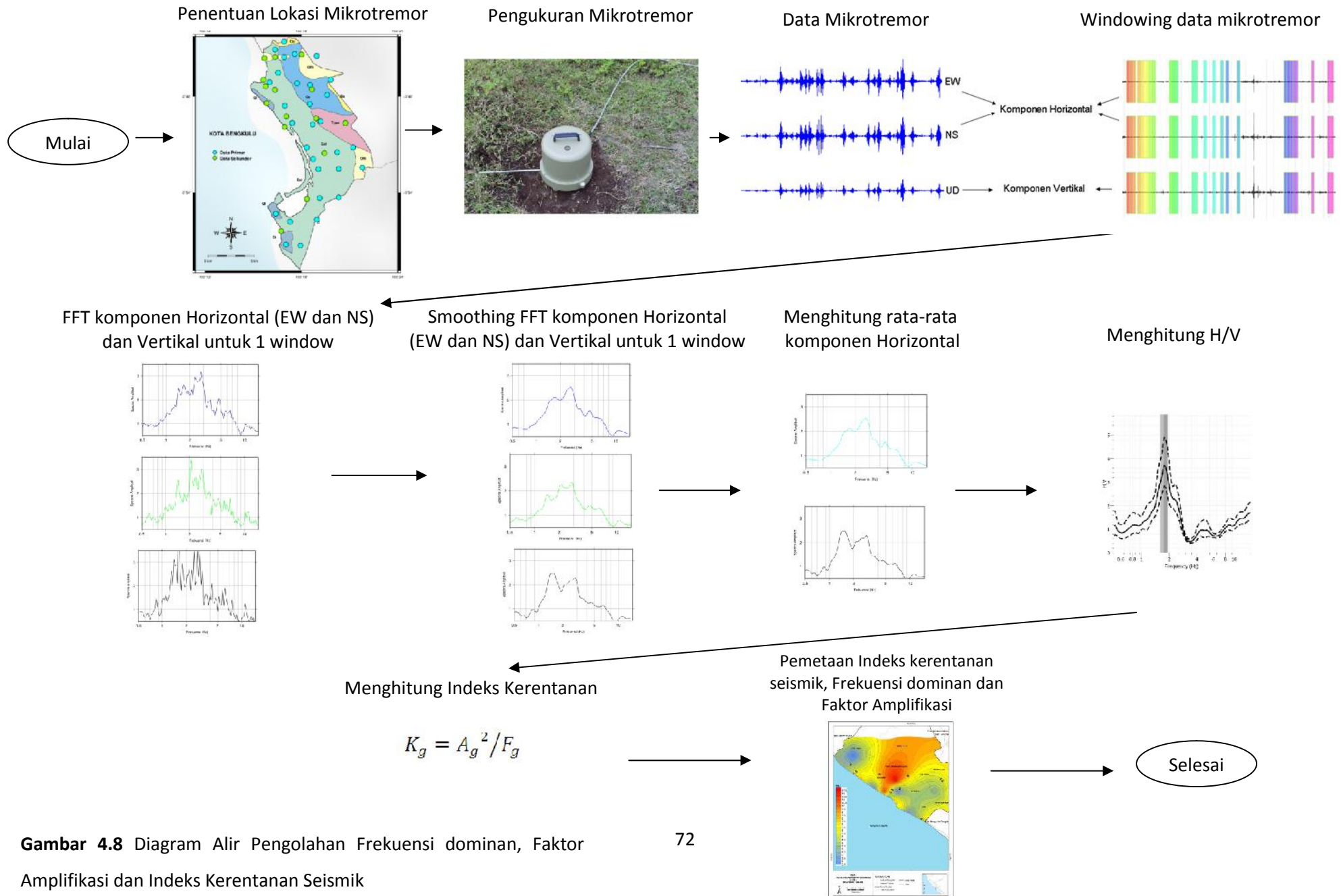
4.12 Perhitungan *Ground Shear Strain* perlapisan berdasarkan permodelan numerik

Perhitungan *ground shear strain* perlapisan dilakukan dengan bantuan *software* NERA (*Nonlinear Earthquake Site Response Analyses*). Input data yang diperlukan yaitu : data kecepatan gelombang S tiap lapisan, data berat jenis tiap lapisan, ketebalan tiap lapisan, jenis material tanah dan *time history* percepatan desain pada *bedrock* atau *outcrop*. Untuk data kecepatan gelombang S tiap lapisan dan berat jenis dapat diperoleh dari hasil inversi kurva H/V.

Jenis material tanah dapat diasumsikan sama dengan jenis material data bor yang paling dekat. Untuk menentukan *time history* desain diperlukan data *time history* percepatan aktual yang diperoleh dari situs <http://peer.berkeley.edu/nga/search.html>. Dari situs ini dicari *time history* percepatan yang parameter gempanya Mw 8.4 SR dan jarak episenternya sekitar 145 km. Data *time history* percepatan yang mendekati gempa ini yakni gempa Landers yang terjadi pada tanggal 26 Juni 1992 jam 11:58 UTC dengan Magnitudo 7.28 SR dan jarak episenter 164.85 km. Kemudian dengan menggunakan metode *spectral mathing* frekuensi didapatkan *time history* desain yang cocok dengan gempa Bengkulu.



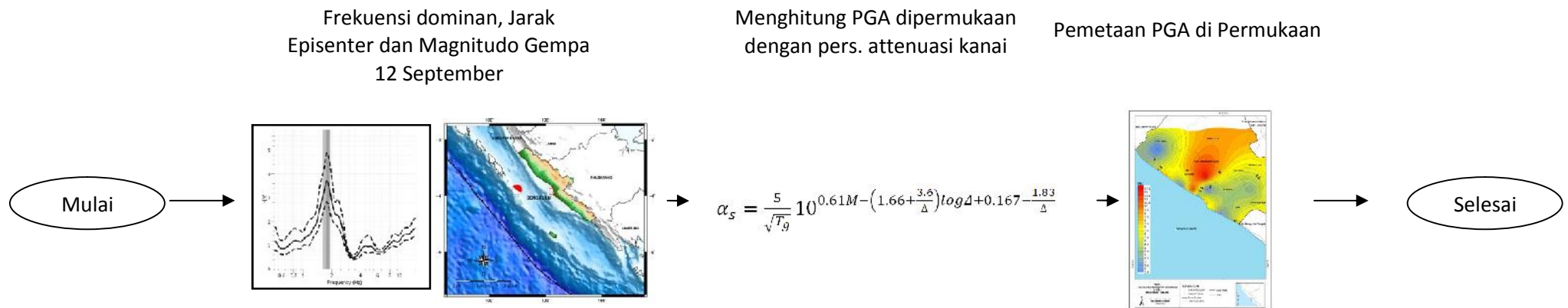
Gambar 4.7 Diagram Alir Penelitian Keseluruhan



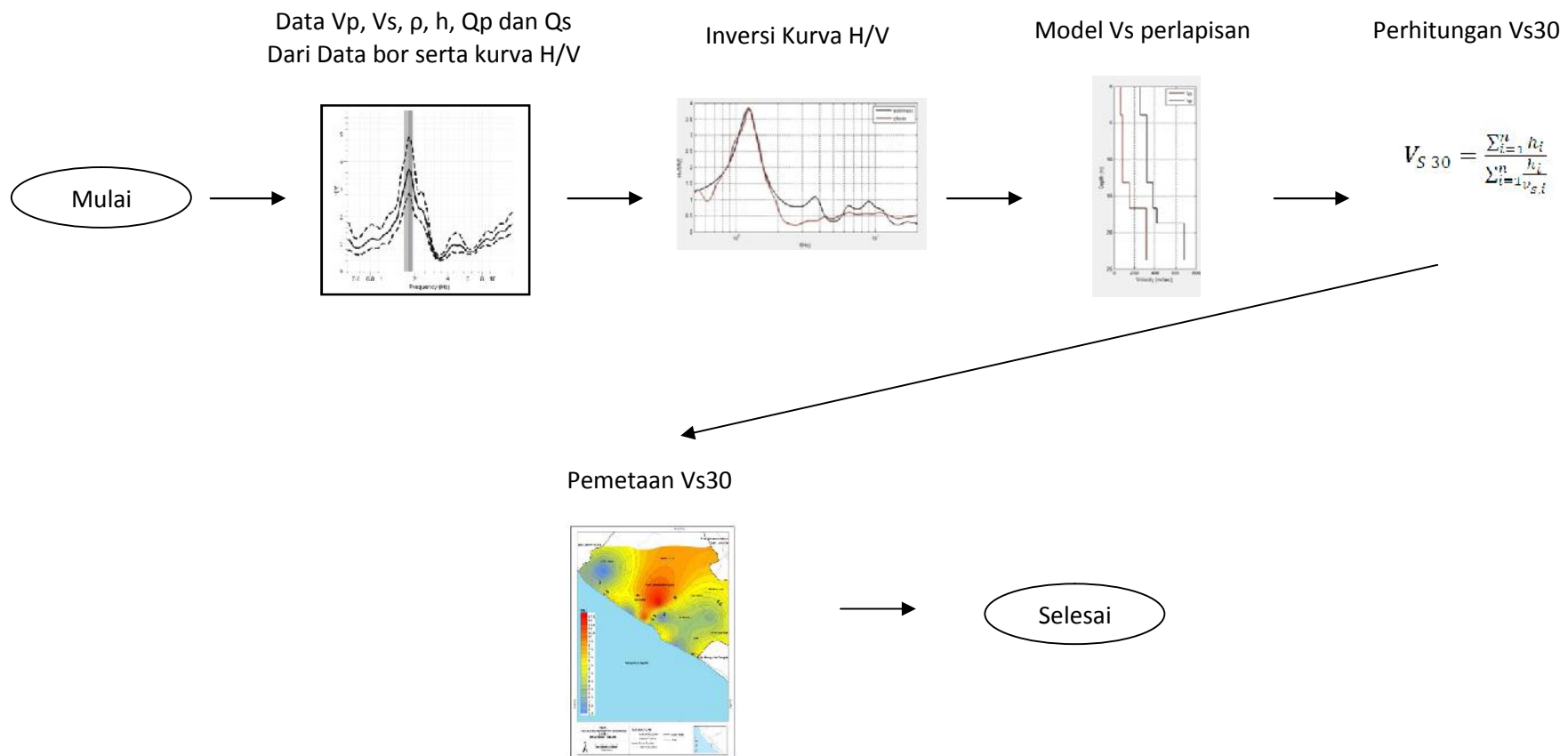
Gambar 4.8 Diagram Alir Pengolahan Frekuensi dominan, Faktor Amplifikasi dan Indeks Kerentanan Seismik



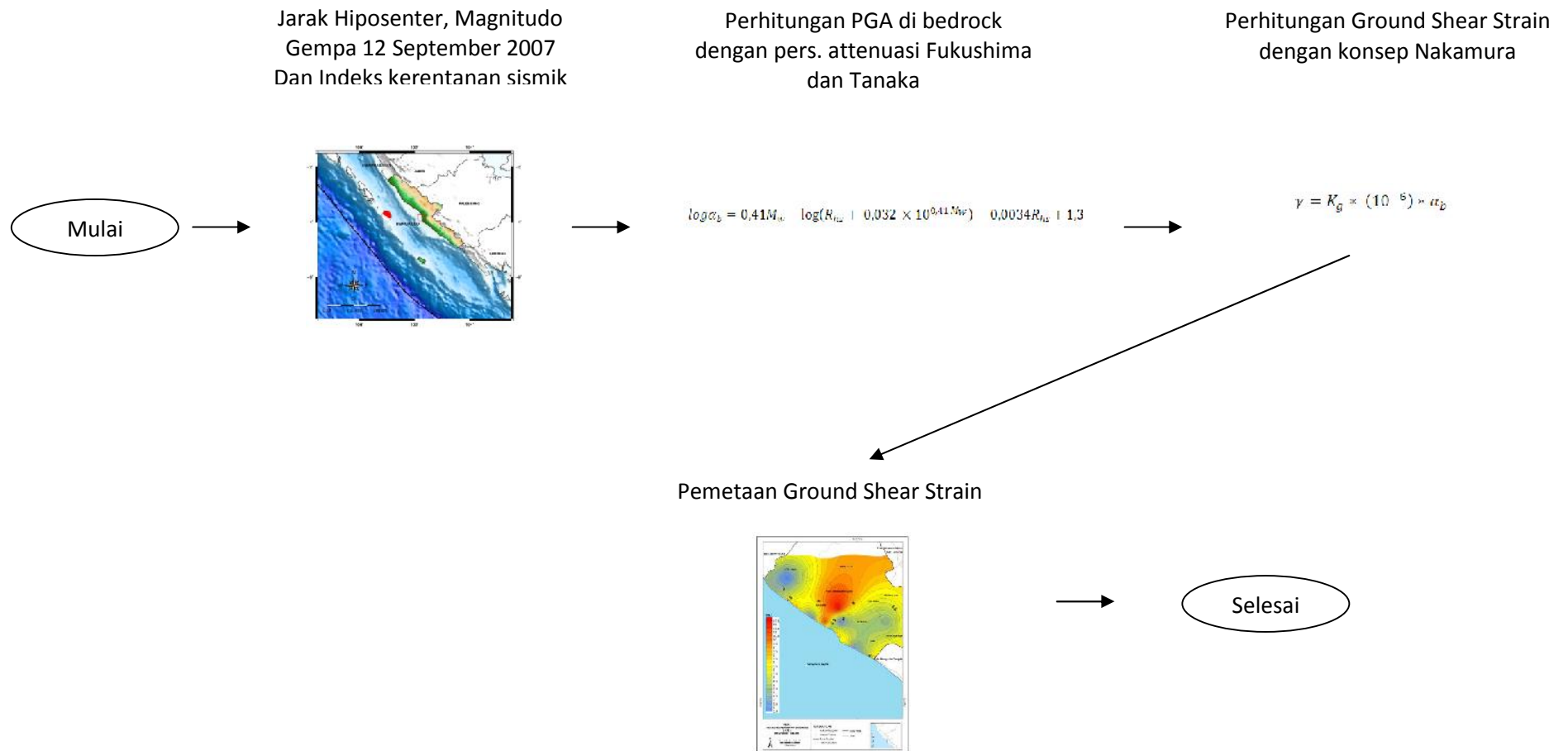
Gambar 4.9 Diagram Alir Pengolahan Ketebalan Sedimen



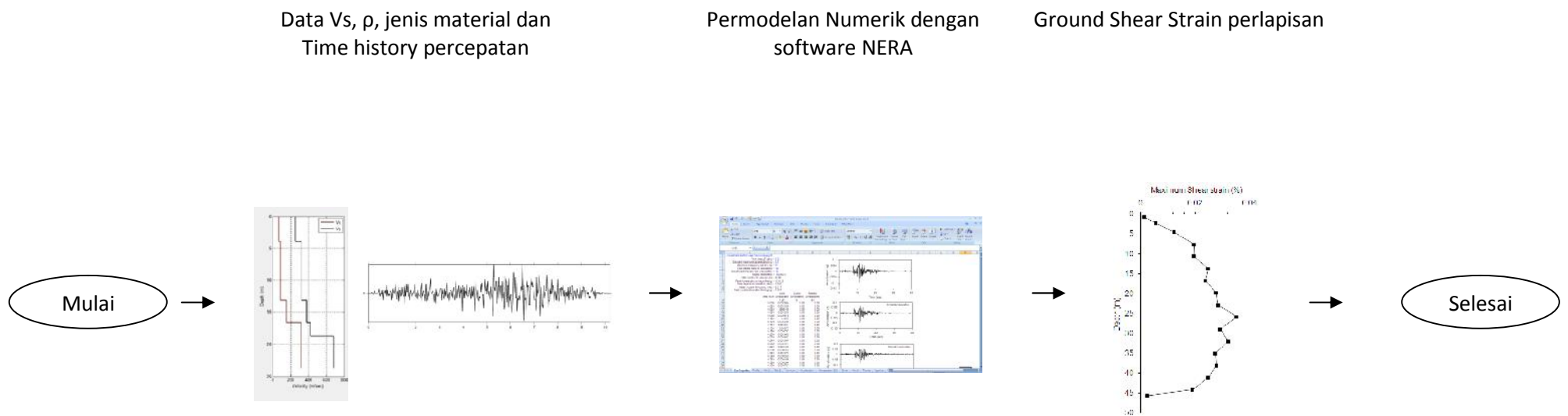
Gambar 4.10 Diagram Alir Pengolahan PGA dipermukaan



Gambar 4.11 Diagram Alir Pengolahan Vs30



Gambar 4.12 Diagram Alir Pengolahan Ground Shear Strain



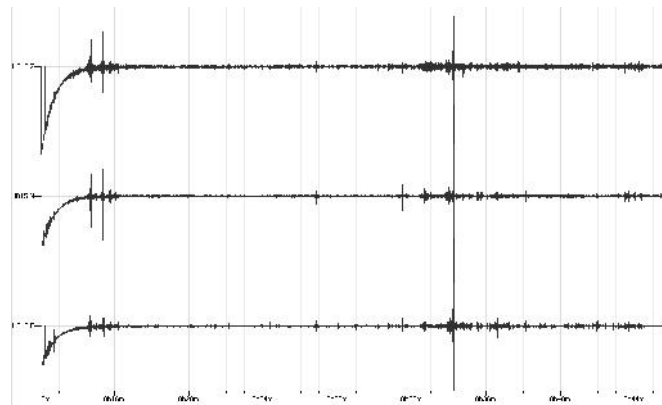
Gambar 4.13 Diagram Alir Pengolahan Ground Shear Strain perlapisan

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

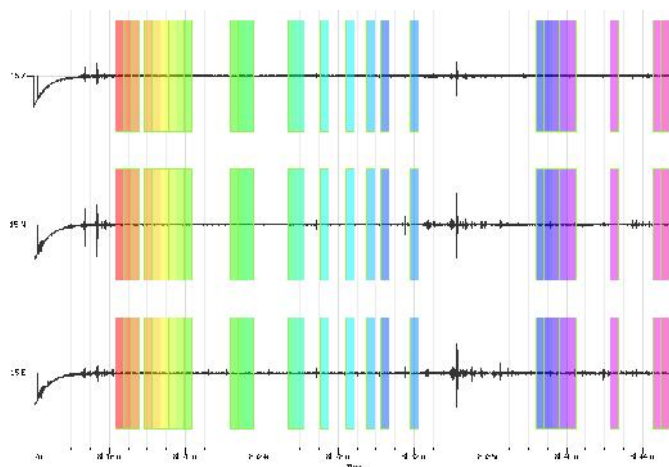
5.1 Proses Pengolahan Data

Hasil dari pengukuran mikrotremor berupa waveform gelombang dan hasil dari pengolahan waveform gelombang ini berupa kurva H/V, Secara umum proses pengolahan data dari berupa *waveform* (Gambar 5.1) sampai menjadi kurva H/V dapat ditunjukkan pada gambar dibawah ini dan contoh ini merupakan data mikrotremor lokasi ke-2. Lokasi ke-2 dapat dilihat pada Gambar 4.1.



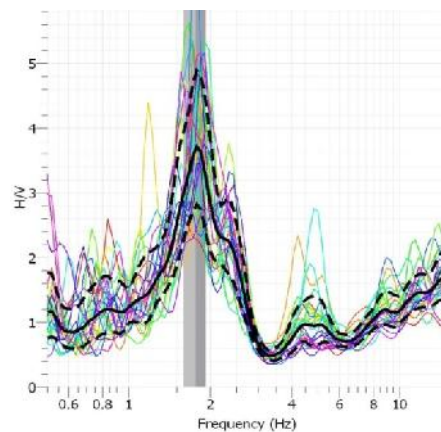
Gambar 5.1 *Waveform* mikrotremor

Proses pengolahan data yakni pertama data *waveform* mikrotremor diseleksi (Gambar 5.2) untuk mencari getaran yang tidak terpengaruh *noise* kemudian tiap waveform yang diseleksi ditransformasi *Fourier* menjadi spektra horisontal dan vertikal.



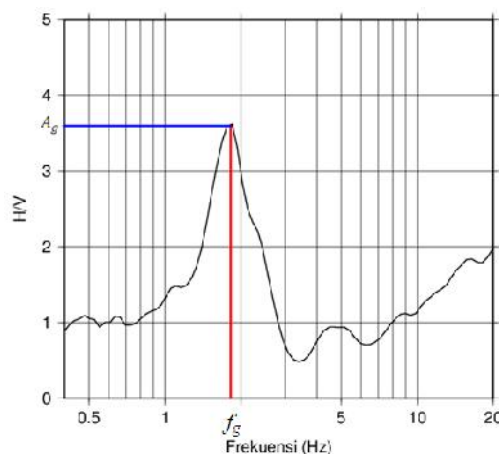
Gambar 5.2 Seleksi *waveform*

Selanjutnya dilakukan pembagian spektra horisontal terhadap spektra vertikal sehingga menjadi kurva H/V. Tiap *waveform* yang diseleksi akan menunjukkan kurva H/V dan hasil kurva ini dirata-ratakan yang ditunjukkan dengan garis tebal berwarna hitam (Gambar 5.3). Garis putus-putus yang berada diatas dan dibawah garis hitam merupakan deviasi dari kurva H/V sedangkan garis yang berwarna menunjukkan spektra H/V untuk tiap seleksi *waveform*.



Gambar 5.3 Kurva H/V rata-rata (garis warna hitam) dan kurva H/V untuk tiap *waveform* yang diseleksi (garis-garis yang berwarna)

Selanjutnya untuk mempermudah dalam pembacaan faktor amplifikasi (A_g) dan frekuensi dominan (f_g) maka kurva H/V cukup ditampilkan nilai rata-ratanya saja yang selanjutnya dapat disebut juga kurva H/V.



Gambar 5.4 Kurva H/V

Sebagai contoh pada kurva H/V diatas maka nilai faktor amplifikasi (A_g) yakni 3.6 dan nilai frekuensi dominannya (f_g) yakni 1.8 Hz. Perhitungan selanjutnya yaitu menghitung indeks kerentanan seismik (K_g). Dengan menggunakan pers. (3.40) menjadi :

$$K_g = \frac{3.6^2}{1.8}$$

$$= 7.21$$

Pengolahan selanjutnya yakni menghitung percepatan di batuan dasar (a_b) dengan pers. (3.39).

$$\log a_b = 0.41 \times 8.4 - \log(132.3 + 0.032 \times 10^{0.41 \times 8.4}) - 0.0034 \times 132.3 + 1.3$$

$$\log a_b = 1.94$$

$$a_b = 88.98 \text{ gal}$$

Setelah mendapat PGA di batuan dasar (a_b) selanjutnya menghitung *Ground Shear Strain*. Perhitungan ini menggunakan pers. (3.50) untuk mendapatkan akurasi yang cukup baik.

$$\gamma = \left(\frac{3.6^2}{1.8} \right) \times \left(\frac{88.98}{(\pi^2 \times 60000)} \right) \times 60\%$$

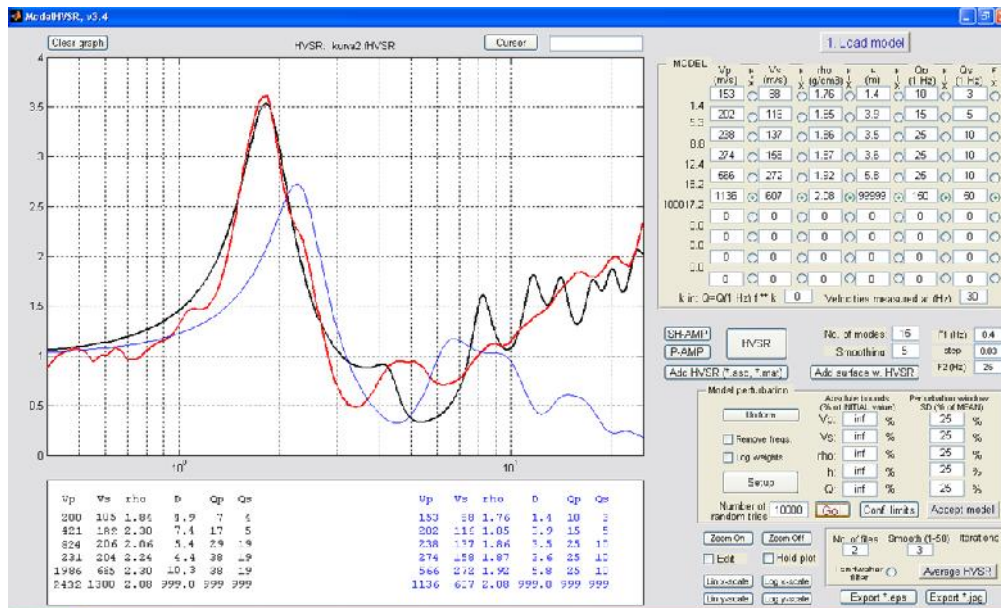
$$\gamma = 0.00065$$

Perhitungan PGA Kanai menggunakan persamaan (3.38)

$$a_s = \frac{5}{\sqrt{0.55}} 10^{0.61 \times 8.4 - \left(1.66 + \frac{3.6}{132.3}\right) \log 132.3 + 0.167 - \frac{1.83}{132.3}}$$

$$a_s = 334.6 \text{ gal}$$

Untuk melakukan perhitungan Vs30 maka perlu dilakukan inversi kurva H/V. Inversi ini menggunakan software ModelHVSR dan model v_s awal. Model v_s awal diperoleh dari data sondir dan NSPTdi Kota Bengkulu. Untuk mendapatkan korelasi ke nilai v_s dapat menggunakan pers (4.2) dan pers (4.3). Sebagai contoh maka hasil untuk pengolahan data ke -2 dapat dilihat pada gambar 5.5. Setelah didapat v_s perlapisan maka nilai Vs30 dapat dihitung dengan pers. (3.67).



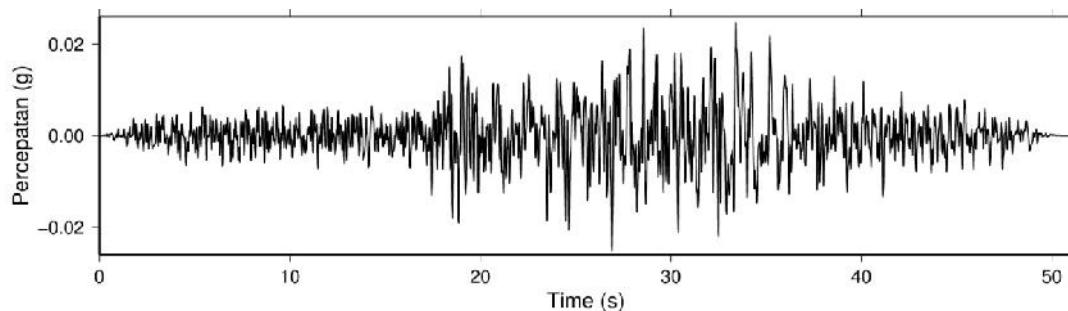
Gambar 5.5 Pengolahan inversi v_s perlapisan dengan modelHVSR

Maka perhitungan V_{s30} yaitu :

$$V_{s30} = \frac{30}{\frac{4.9}{105} + \frac{7.4}{182} + \frac{5.4}{206} + \frac{4.4}{204} + \frac{7.9}{665}}$$

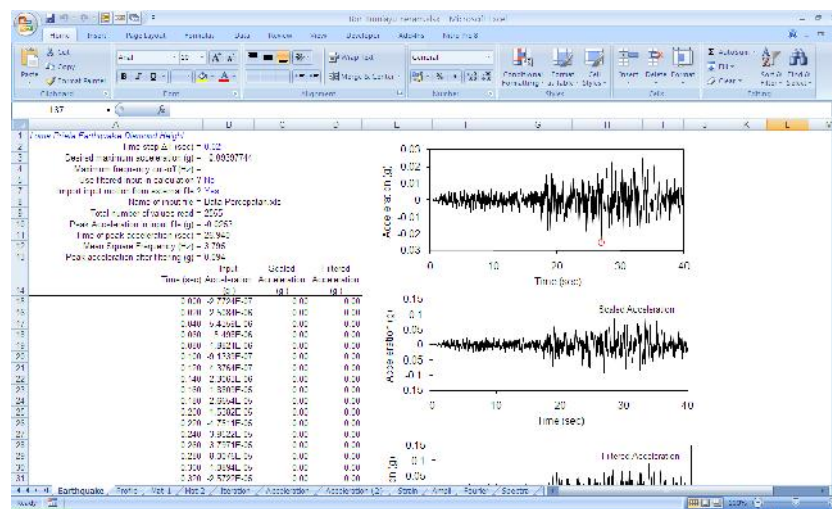
$$V_{s30} = 204 \text{ m/s}$$

Selanjutnya perhitungan *ground shear strain* perlapisan dihitung dengan menggunakan *software* NERA. Dengan menggunakan data *ground motion synthetic* dari percepatan gempa Landers dengan Magnitud 7.28 dan jarak episenter 164.85 km. Gambar 5.6 dibawah ini merupakan rekaman *waveform* percepatan gempa Landers.

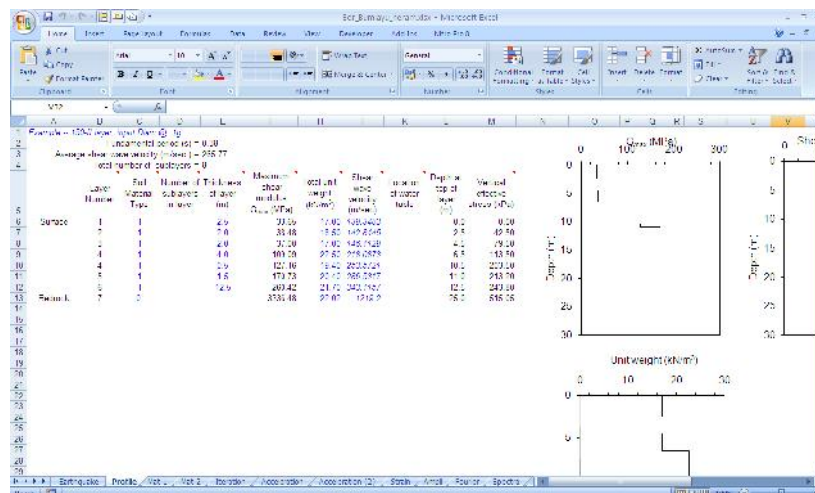


Gambar 5.6 *Waveform* percepatan gempa Landers

Data time history percepatan yang dimasukkan ke dalam *software* NERA merupakan data *time history* desain. *Time history* desain ini diperoleh melalui tahap *spectral matching*. Selanjutnya untuk input profil lapisan tanah digunakan data NSPT yang telah di konversikan kedalam v_s dengan menggunakan pers (4.2) dan (4.3).



Gambar 5.7 Input data percepatan *software* NERA



Gambar 5.8 Input soil profile pada *software* NERA

Setelah diolah dengan menggunakan *software* NERA hasilnya berupa *ground shear strain* per lapisan dan akan dibahas pada beberapa poin selanjutnya. Kemudian untuk mempermudah dalam melihat sebaran data maka hasil pengukuran mikrotremor dan perhitungan ditampilkan pada Tabel 5.1 dan 5.2

Tabel 5.1 Hasil data primer f_g , A_g , K_g , γ , R_{hip} , a_s , V_{s30} dan H

Data	f_g (Hz)	A_g	K_g	γ	R_{hip} (km)	a_s (gal)	V_{s30} (m/s)	h (m)
1	2.68	2.46	2.25	0.00020	133.59	402.35	368.48	34.32
2	1.80	3.61	7.21	0.00065	132.30	334.69	204.10	28.30
3	9.22	2.92	0.92	0.00008	133.84	743.73	196.09	5.32
4	1.64	2.32	3.27	0.00031	128.99	331.81	221.50	33.75
5	1.50	3.32	7.38	0.00072	125.53	330.11	185.26	30.97
6	3.96	2.37	1.41	0.00014	127.42	525.38	217.76	13.74
7	0.93	2.69	7.79	0.00078	124.10	264.45	214.68	57.90
8	0.58	1.87	6.01	0.00062	121.37	216.95	308.72	132.32
9	2.20	3.16	4.53	0.00042	130.29	378.75	221.15	25.08
10	3.11	2.42	1.88	0.00017	131.35	444.73	416.13	33.40
11	1.04	1.39	1.87	0.00018	127.73	268.23	226.94	54.51
12	6.30	6.67	7.07	0.00068	127.31	663.10	187.31	7.44
13	7.23	2.59	0.92	0.00009	127.36	709.93	249.31	8.63
14	7.82	7.57	7.33	0.00068	129.69	718.39	236.37	7.56
15	5.74	7.79	10.57	0.00099	129.13	619.62	324.89	14.15
16	2.45	4.49	8.25	0.00075	131.59	392.99	202.95	20.75
17	7.56	3.72	1.83	0.00017	130.06	703.52	511.95	16.92
18	4.50	3.18	2.24	0.00021	130.13	542.37	160.87	8.93
19	8.58	4.22	2.08	0.00020	127.88	768.86	236.30	6.88
20	2.95	2.60	2.29	0.00021	129.27	443.25	314.04	26.63
21	6.43	2.21	0.76	0.00007	131.98	634.08	448.08	17.43
22	6.02	2.05	0.70	0.00006	130.54	624.27	169.22	7.02
23	7.81	4.30	2.37	0.00023	126.54	745.13	234.99	7.52
24	0.33	2.68	21.99	0.00230	120.46	164.21	242.75	185.83
25	3.40	3.15	2.91	0.00028	127.03	488.52	295.66	21.77
26	2.38	4.86	9.93	0.00103	120.66	442.15	261.99	27.52
27	1.87	3.53	6.65	0.00061	131.20	345.18	222.16	29.70
28	5.23	7.34	10.29	0.00092	132.86	566.34	252.23	12.06
29	3.43	5.25	8.03	0.00073	131.12	467.92	234.97	17.13
30	2.29	2.38	2.47	0.00023	129.29	390.63	197.42	21.55
31	2.80	2.08	1.55	0.00014	131.10	422.86	330.65	29.52
32	2.81	3.27	3.80	0.00033	135.25	403.99	254.43	22.64
33	3.46	3.52	3.59	0.00030	139.34	428.38	286.54	20.70
34	3.01	2.15	1.53	0.00013	136.83	410.81	208.24	17.30
35	6.00	4.00	2.67	0.00023	135.40	589.35	219.65	9.15
36	2.41	2.57	2.75	0.00026	127.12	411.17	217.30	22.54
37	3.04	2.72	2.44	0.00023	129.68	448.00	267.75	22.02

Tabel 5.2 Hasil pengolahan data sekunder f_g , A_g , K_g , γ , R_{hip} , a_s , V_{s30} dan h

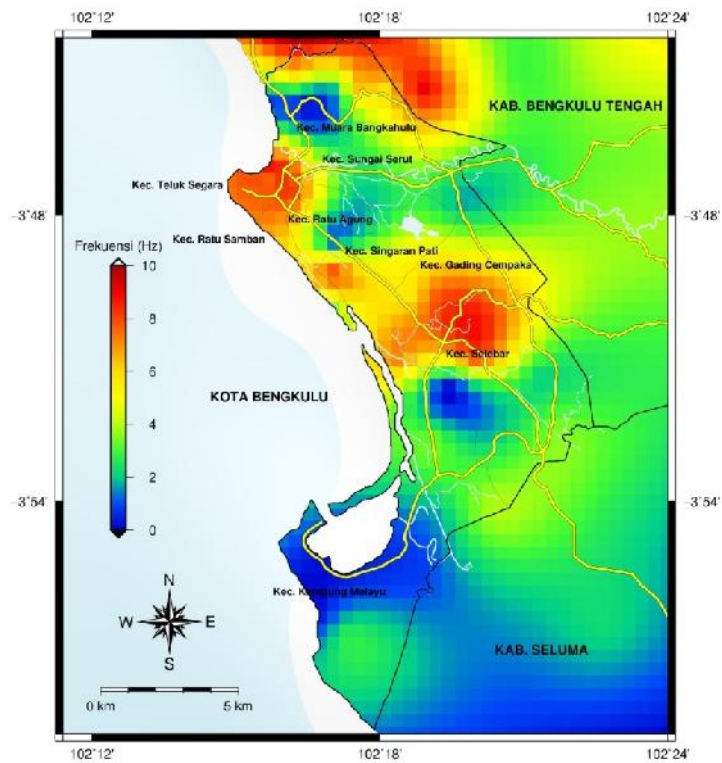
Data	f_g (Hz)	A_g	K_g	γ	R_{hip}	a_s	V_{s30}	h
1	5.51	2.90	1.53	0.00014	132.58	583.11	466.22	21.16
2	2.75	2.64	2.53	0.00023	131.24	418.36	225.72	20.53
3	7.86	5.28	3.55	0.00034	127.85	736.22	200.37	6.37
4	8.55	5.03	2.95	0.00028	127.20	773.69	213.37	6.24
5	6.23	6.37	6.51	0.00061	129.82	640.05	321.00	12.89
6	6.46	3.21	1.60	0.00014	132.28	633.82	468.36	18.12
7	6.96	4.78	3.28	0.00032	127.26	697.35	326.60	11.74
8	0.80	4.77	28.35	0.00266	129.03	231.89	111.04	34.60
9	8.96	5.84	3.81	0.00036	127.50	789.01	188.25	5.26
10	6.60	7.39	8.28	0.00080	126.24	687.65	171.95	6.51
11	0.61	1.57	4.01	0.00037	130.06	200.07	277.23	113.29
12	3.30	5.30	8.50	0.00082	126.39	485.64	211.45	16.00
13	1.19	5.54	25.75	0.00257	124.24	299.50	148.01	31.01
14	0.35	3.10	27.19	0.00286	120.01	171.73	148.21	104.90
15	0.35	8.75	15.37	0.00145	128.53	154.79	268.91	13.48

5.2 Pembahasan

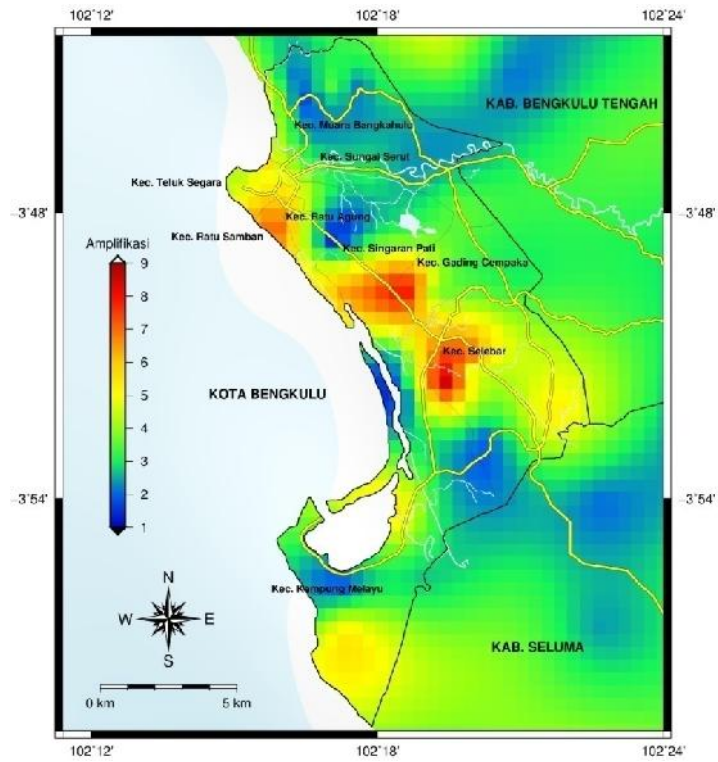
5.2.1 Sebaran Frekuensi Dominan (f_g) dan Faktor Amplifikasi (A_g)

Frekuensi dominan (f_g) dan faktor amplifikasi (A_g) diperoleh dari kurva H/V. Nilai sebaran frekuensi dominan (f_g) kemudian di interpolasi dan di tampilkan dalam bentuk peta sebaran frekuensi dominan (f_g). Berdasarkan gambar 5.9 nilai frekuensi terkecil berada pada Kecamatan Kampung Melayu yakni 0.32 Hz sedangkan frekuensi terbesar berada di Kecamatan Muara Bangkahulu 9.2 Hz. Nilai Frekuensi dominan ini berkaitan dengan tebal sedimen dan V_{s30} . Dengan asumsi V_{s30} dianggap sama maka dapat diestimasi bahwa wilayah Kecamatan Kampung Melayu memiliki ketebalan sedimen yang paling besar. Dan pada wilayah Kecamatan Muara Bangkahulu memiliki ketebalan sedimen paling kecil.

Nilai faktor amplifikasi dapat dilihat pada gambar 5.10. Nilai faktor amplifikasi terbesar berada pada wilayah kecamatan Selebar yakni 8.75. Sehingga pada daerah ini menunjukkan kontras impedansi yang cukup besar. Kontras impedansi ini berhubungan erat dengan lithologi. Disini merupakan daerah aliran sungai yang diperkirakan memiliki sedimen halus. Karena adanya sedimen halus ini maka nilai kontras impedansi disini akan menjadi besar. Nilai faktor amplifikasi yang terkecil berada di wilayah kecamatan Ratu Agung yakni 1.39. Pada wilayah ini menunjukkan bahwa kontras impedansi di wilayah sini rendah.



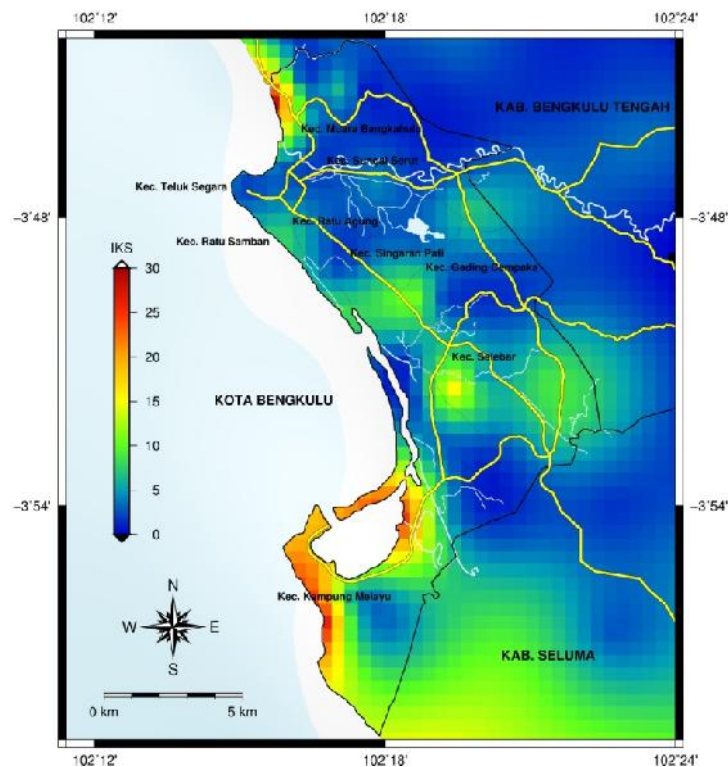
Gambar 5.9 Peta Sebaran Frekuensi Dominan



Gambar 5.10 Peta Faktor Amplifikasi

5.2.2 Sebaran Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

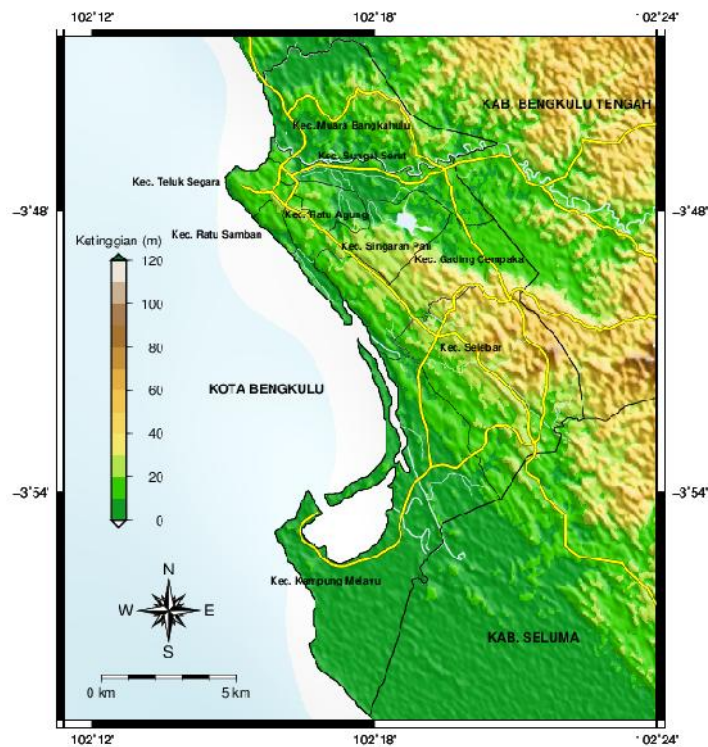
Hasil dari indeks kerentanan seismik dapat dilihat pada Gambar 5.11. Menurut hasil ini dapat dilihat bahwa nilai indeks kerentanan seismik terbesar berada di wilayah sekitar pantai Kecamatan Muara Bangkahulu yakni 28.34 sedangkan nilai indeks kerentanan seismik terkecil berada di wilayah Kecamatan Muara Bangkahulu juga yakni 0.69. Nilai indeks kerentanan seismik ini dipengaruhi oleh faktor amplifikasi (A_g) dan frekuensi dominan (f_g). Pada daerah pantai Muara Bangkahulu nilai indeks kerentanan yang besar disebabkan frekuensi dominan yang rendah sedangkan untuk nilai indeks kerentanan terkecil disini karena nilai frekuensi yang sedang (6 Hz) dan faktor amplifikasi yang rendah (2.0) sehingga daerah sini memiliki nilai indeks kerentanan yang rendah.



Gambar 5.11 Peta Indeks Kerentanan Seismik di Kota Bengkulu

Di daerah Kec. Selebar dan Gading Cempaka memiliki nilai indeks kerentanan yang sedang hal ini dipengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi yang cukup tinggi pada daerah sini. Sebagai gambaran umum kondisi topografi di Kota

Bengkulu dapat dilihat pada gambar 5.12. Dengan melihat peta topografi ini menunjukkan bahwa pada wilayah yang semakin tinggi atau wilayah perbukitan nilai indeks kerentanannya semakin menurun. Sedangkan pada daerah cekungan, sekitar sungai dan sekitar pantai cenderung memiliki nilai yang besar. Hasil ini sesuai dengan penelitian Nakamura di San Fransisco. Bahwa daerah perbukitan memiliki nilai indeks kerentanan yang kecil dan semakin menuju daerah pantai nilai indeks kerentanannya berangsur membesar.



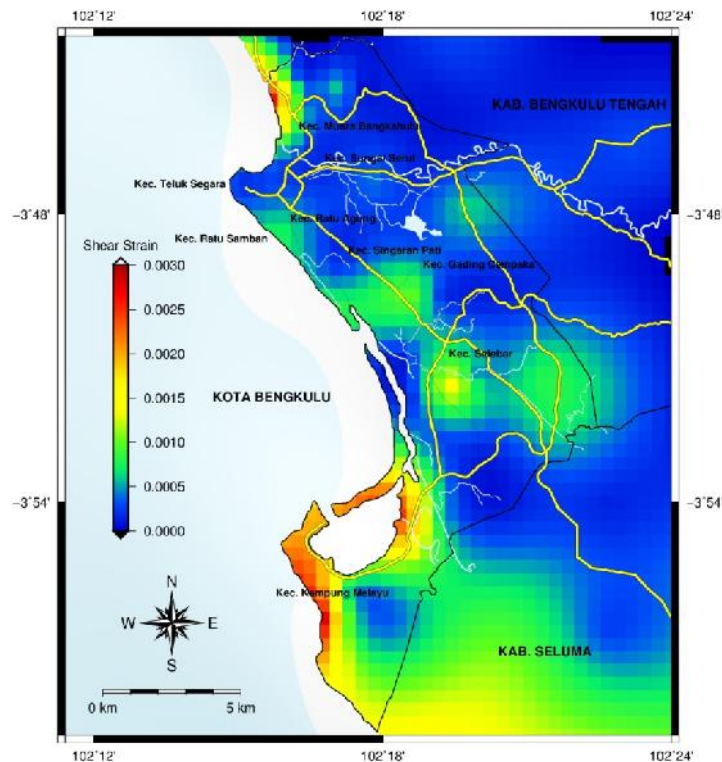
Gambar 5.12 Peta topografi Kota Bengkulu (USGS, 2014)

Perbandingan dengan hasil indeks kerentanan seismik di Kabupaten Bengkulu Utara menunjukkan adanya kesamaan pola sebaran indeks kerentanan seismik. Di daerah sekitar pantai nilai indeks kerentanan seismiknya cenderung besar (Gambar 5.13). Sedangkan semakin menjauhi pantai nilai indeks kerentanan seismiknya semakin mengecil. Hal ini menunjukkan adanya kesamaan pola sebaran indeks kerentanan seismik di Kota Bengkulu dan di Kabupaten Bengkulu Utara.

Gambar 5.15 merupakan hasil pemetaan nilai *ground shear strain*. Daerah yang memiliki nilai *ground shear strain* tertinggi berada pada wilayah Kecamatan Kampung Melayu yakni 0.0028 dan daerah yang memiliki nilai *ground shear strain* yang terendah berada di wilayah Kecamatan Muara Bangkahulu yakni 0.00006. Berdasarkan Tabel 3.4 pada daerah Kampung Melayu sudah mengalami kerusakan tanah yakni berupa *settlement* atau terjadi penurunan tanah sedangkan pada wilayah Muara Bangkahulu tidak terjadi kerusakan tanah melainkan hanya mengalami getaran saja.

Nilai *ground shear strain* ini sangat dipengaruhi oleh nilai indeks kerentanan seismiknya. Sehingga pola distribusi *ground shear strain* ini mirip dengan distribusi indeks kerentanan seismiknya. Karena indeks kerentanan seismik juga mengikuti pola topografi maka nilai *ground shear strain* ini juga mengikuti pola topografi yakni pada daerah yang lebih tinggi atau daerah perbukitan nilai *ground shear strain* lebih kecil dibandingkan dengan daerah yang dekat dengan wilayah pantai. Pengaruh PGA pada *bedrock* juga memiliki pengaruh terhadap besarnya *ground shear strain* tetapi karena variasi PGA cukup rendah maka hanya indeks kerentanan saja yang lebih dominan terhadap sebaran *ground shear strain*.

Selanjutnya untuk melihat hubungan kerusakan dengan *ground shear strain* maka dibuat peta sebaran kerusakan terhadap *ground shear strain*. Pada gambar 5.16 menunjukkan bahwa pada titik kerusakan ke-3 dan ke-4 memiliki kerusakan ringan. Sedangkan pada titik kerusakan ke-1, ke-2 dan ke-5 memiliki kerusakan yang cukup berat. Dari hasil perhitungan *ground shear strain* pada titik kerusakan ke-3 dan ke-4 memiliki nilai yang cukup ringan sedangkan pada daerah yang tingkat kerusakannya cukup berat seperti pada titik kerusakan ke-1, ke-2 dan ke-5 nilai *ground shear strain*nya cukup besar. Sehingga hasil ini menunjukkan adanya hubungan antara *ground shear strain* dengan tingkat kerusakan seperti pada beberapa penelitian sebelumnya.

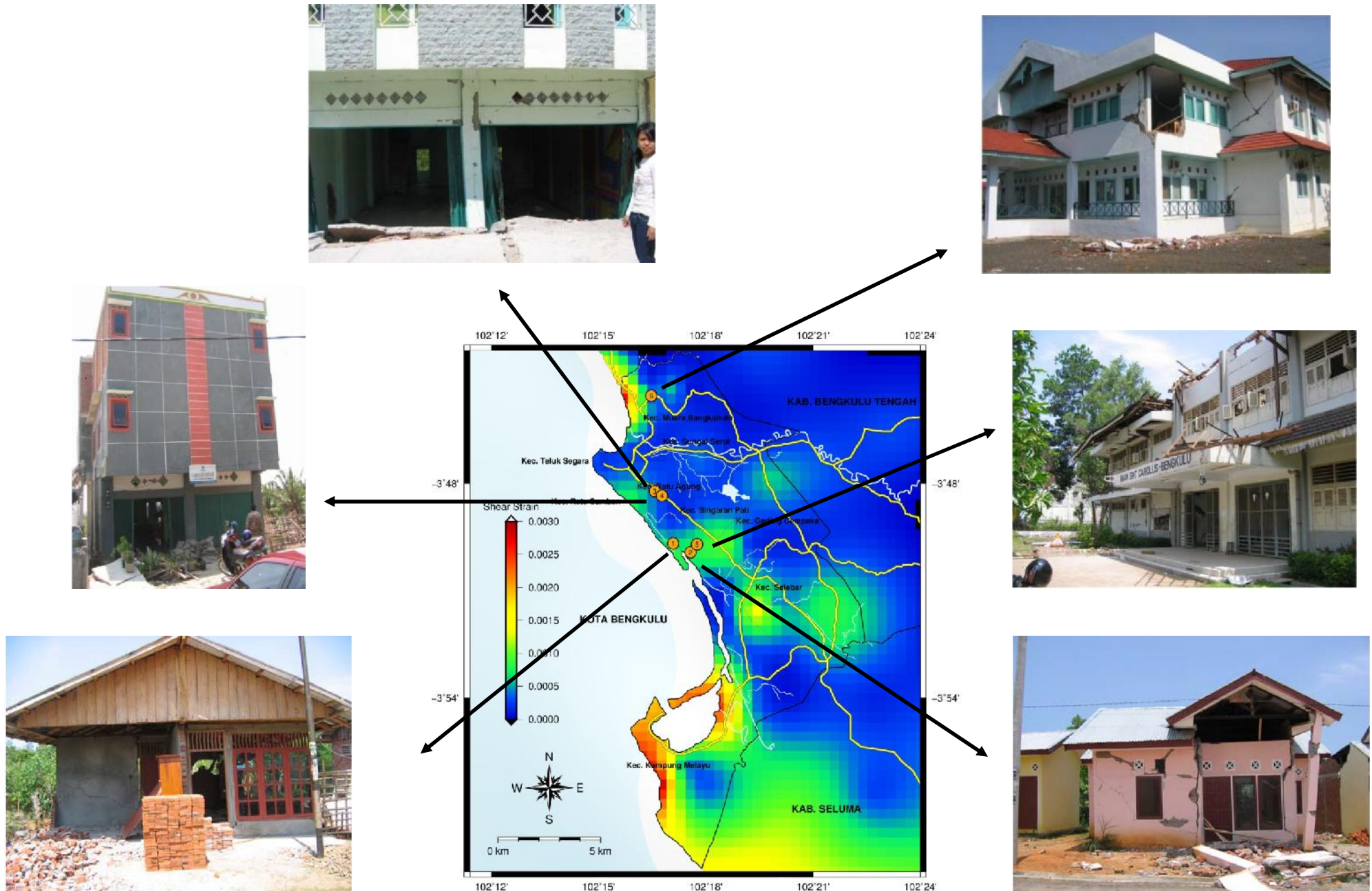


Gambar 5.15 Peta *Ground Shear Strain*

5.2.4 Sebaran PGA Kanai

Hasil PGA Kanai dapat dilihat pada gambar 5.17. Berdasarkan gambar 5.17 daerah yang memiliki nilai PGA yang terbesar berada di kecamatan Teluk Segara yaitu sebesar 789 gal sedangkan PGA terkecil di Kecamatan Selebar yakni 154 gal. Besarnya PGA Kanai ini dipengaruhi oleh frekuensi dominan (f_g), jarak hiposenter (Δ) dan Magnitudo (M_w) gempa. Pada daerah Kec. Teluk Segara memiliki nilai PGA yang besar hal ini disebabkan karena frekuensi dominan di wilayah ini yang tinggi sehingga percepatan di wilayah ini menjadi besar. Dan pada wilayah Kec. Selebar frekuensi dominannya yang kecil sehingga PGA di wilayah ini menjadi rendah.

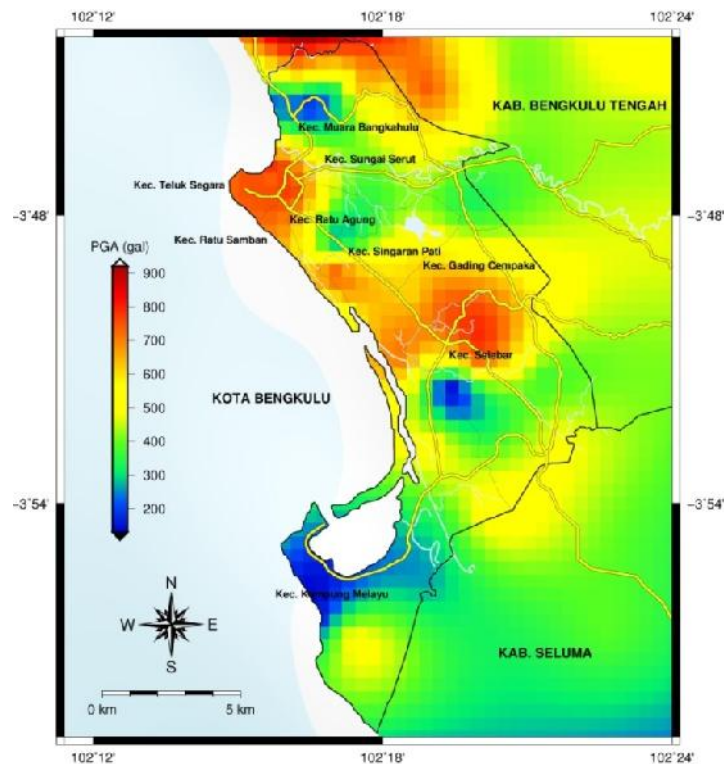
Pada wilayah di sekitar pantai Kecamatan Kampung Melayu memiliki nilai PGA yang relatif rendah, hal ini dikarenakan nilai frekuensi yang rendah,



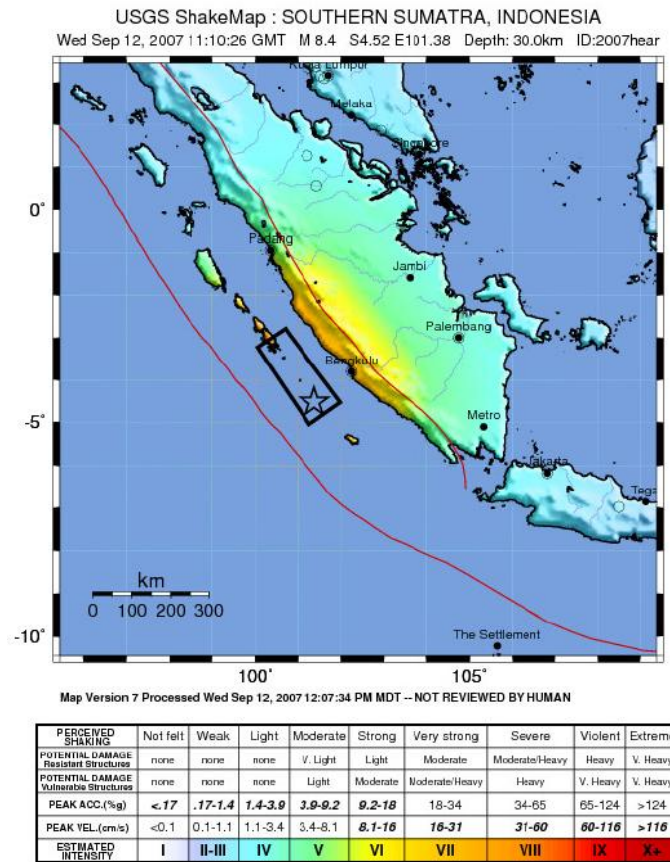
Gambar 5.16 Sebaran kerusakan dan Ground Shear Strain akibat gempa Bengkulu 2007

Sehingga menyebabkan wilayah disekitar sini menjadi rendah. Selanjutnya hasil dari pemetaan PGA Kanai ini dibandingkan dengan Peta ShakeMap yang telah dirilis oleh USGS (Gambar 5.18). Peta ShakeMap ini berisi informasi mengenai PGA, PGV (*Peak Ground Velocity*) dan Intensitas gempa. Secara umum pada Peta ShakeMap daerah yang mendekati sumber gempa yakni sekitar pantai memiliki nilai PGA yang semakin besar dan daerah yang menjauhi pantai memiliki PGA yang semakin mengecil.

Hasil PGA yang ditunjukkan oleh ShakeMap memiliki nilai yang lebih kecil dari pada nilai PGA yang dihasilkan oleh perhitungan ini yakni sekitar 34% g atau sebesar 340 gal. Karena pada perhitungan Kanai diasumsikan terjadi resonansi yakni frekuensi getaran gempa sama dengan frekuensi dominan tanah sehingga nilai dari PGA kanai menjadi lebih besar dari pada Peta ShakeMap yang dirilis oleh USGS.



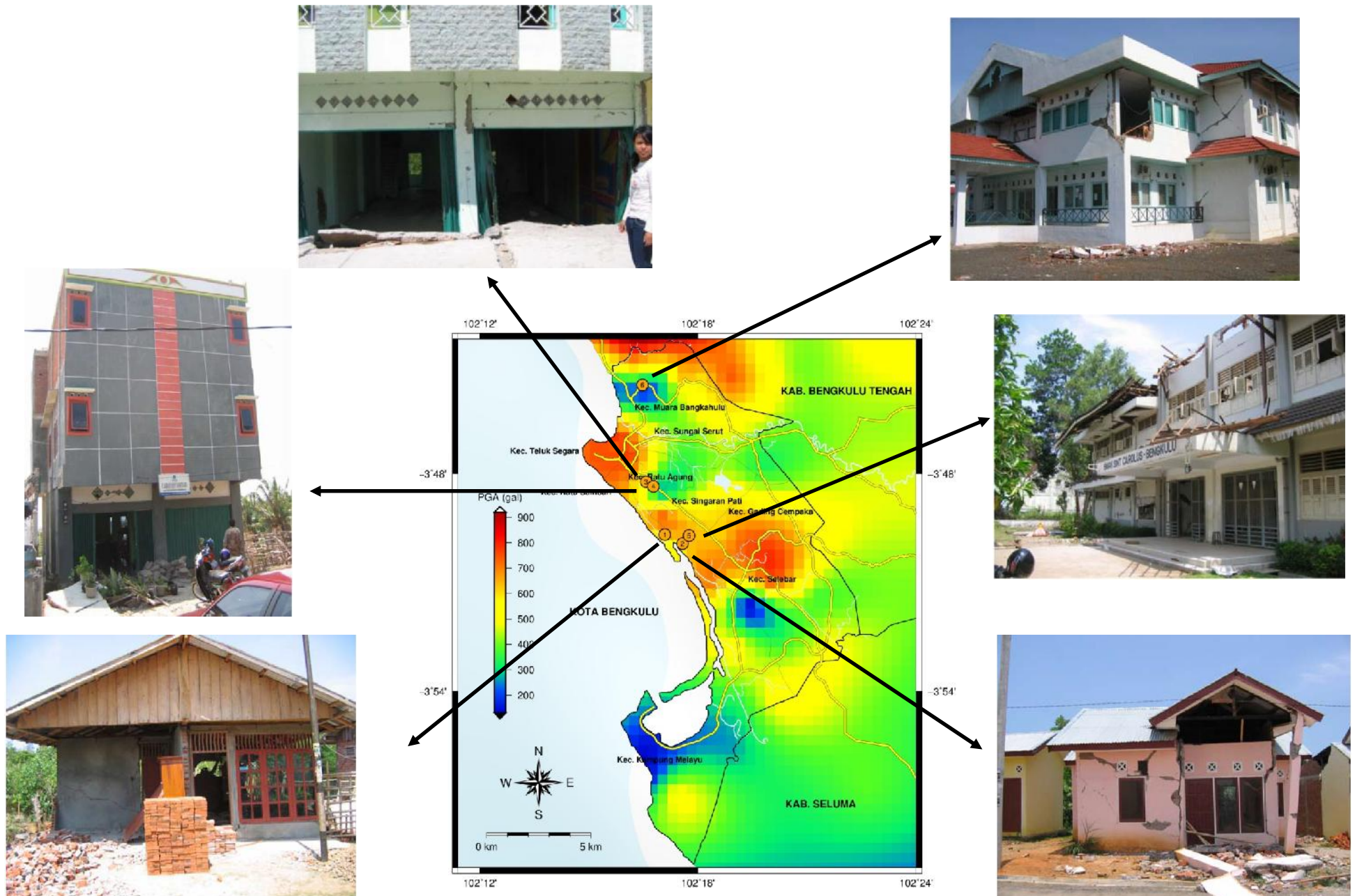
Gambar 5.17 Peta PGA Kanai



Gambar 5.18 Peta ShakeMap Gempa Bengkulu 2007 (USGS, 2007)

Untuk mengetahui hubungan antara tingkat kerusakan dengan PGA Kanai maka dibuatlah peta distribusi kerusakan dengan PGA Kanai yang dapat dilihat pada gambar 5.19. Dari sini dapat dilihat bahwa pada titik kerusakan ke-3 dan ke-4 memiliki tingkat kerusakan yang cukup ringan dibandingkan titik kerusakan ke-2 dan ke-5. Hal ini karena pada titik ke-3 dan ke-4 nilai PGAnya cenderung lebih kecil dari pada nilai PGA di titik ke-2 dan ke-5. Selanjutnya titik kerusakan ke-1 merupakan daerah yang memiliki titik kerusakan yang terparah dan berdasarkan nilai PGAnya disini memiliki nilai PGA yang paling besar apabila dibandingkan dengan nilai PGA di titik kerusakan yang lainnya.

Selain menggunakan atenuasi Kanai (1966) digunakan juga atenuasi Young (1997) dan pemodelan numerik 1D untuk memperkirakan besarnya PGA di Kota Bengkulu. Hal ini dilakukan untuk melihat pengaruh *site effect* terhadap PGA berdasarkan pendekatan yang berbeda.



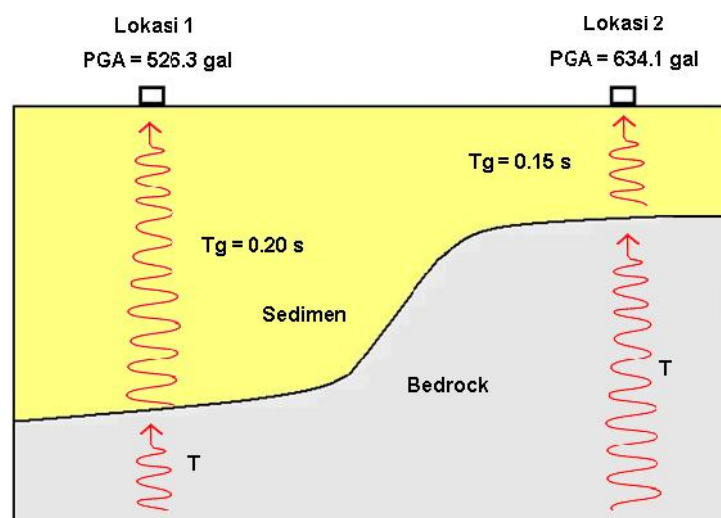
Gambar 5.19 Sebaran kerusakan dan PGA Kanai akibat gempa Bengkulu 2007

Gambar 5.25 menunjukkan dua lokasi untuk perhitungan PGA. Dua lokasi ini ditentukan berdasarkan ketersediaan data. Data yang dimaksud yakni data bor NSPT. Data bor NSPT ini digunakan dalam perhitungan nilai PGA secara numerik. Perhitungan PGA ini menggunakan *software* NERA. Perhitungan PGA dengan atenuasi Young (1997) menggunakan pers (3.59). Selanjutnya hasil perhitungan PGA dapat dilihat pada Tabel 5.3.

Tabel 5.3 Hasil perhitungan PGA pada lokasi 1 dan 2

Daerah	Kanai (1966)	Young (1997)	NERA
lokasi 1	526.3 gal	166.2 gal	201.6 gal
lokasi 2	634.1 gal	160.8 gal	188.4 gal

Dari hasil perhitungan diatas dapat dilihat bahwa pada lokasi 1 dan 2 untuk perhitungan dengan PGA kanai menunjukkan hasil yang terbesar dibandingkan dengan perhitungan dengan atenuasi Young (1997) dan NERA. Selanjutnya pada lokasi 1 pada atenuasi Young (1997) dan NERA menunjukkan hasil yang lebih kecil dari lokasi 2 tetapi pada atenuasi Kanai (1966) malah sebaliknya hal ini dikarenakan pada perhitungan Kanai (1966) mempergunakan periode dominan tanah dan mengasumsikan bahwa periode dominan tanah sama dengan periode dominan gelombang seismik.

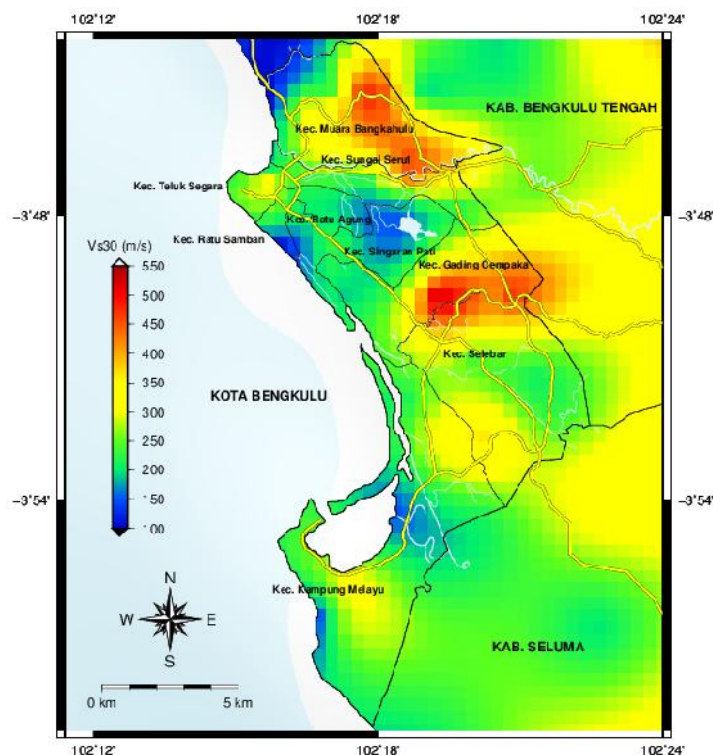


Gambar 5.20 Sketsa lokasi 1 dan 2 serta perbedaan periode dominan pada lokasi 1 dan 2

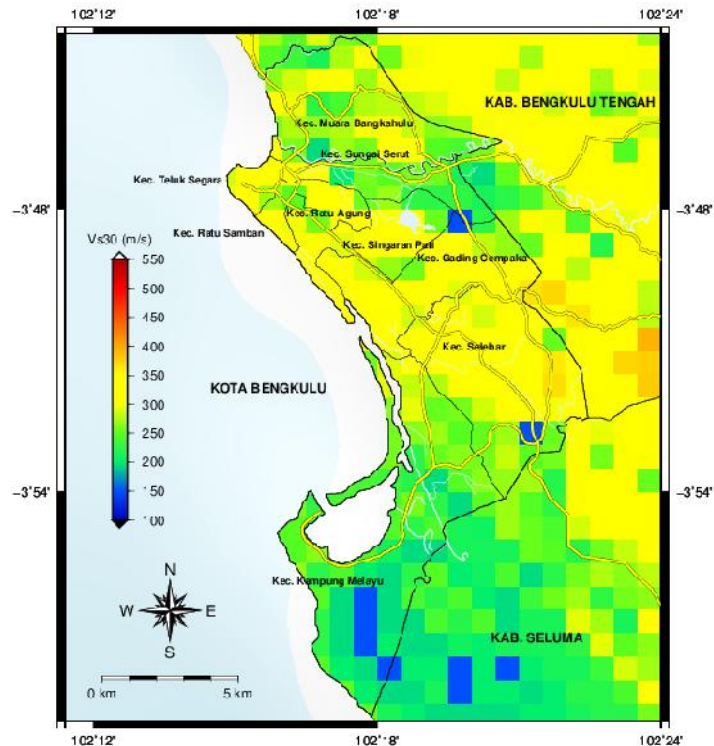
Gambar 5.20 diatas menunjukkan bahwa perbedaan periode dominan menunjukkan perbedaan hasil atenuasi PGA Kanai (1966). Karena pada pers. (3.38) diasumsikan bahwa periode gempa sama dengan periode dominan tanah. Selanjutnya pada lokasi ke-2 nilai periodenya lebih kecil maka nilai PGAny menjadi lebih besar dibandingkan lokasi ke-1.

5.2.5 Sebaran Vs30

Hasil Vs30 diperoleh dari inversi kurva H/V dengan data awal berupa v_s dari data CPT (*Cone Penetration Test*) dan SPT (*Standard Penetration Test*). Setelah di inversi data tiap lokasi dihitung Vs30 kemudian di buat dalam bentuk Peta Vs30 seperti pada Gambar 5.21. Berdasarkan Gambar 5.21 daerah yang memiliki Vs30 yang tinggi berada di kecamatan Gading Cempaka yaitu 511.94 m/s. Sedangkan daerah yang memiliki Vs30 yang rendah berada di Kecamatan Muara Bangkahulu yakni 111.03 m/s. Secara umum pada daerah sekitar pantai, danau dan sungai memiliki Vs30 yang cukup rendah sedangkan pada daerah yang lebih tinggi memiliki Vs30 yang cukup tinggi hal ini dapat dilihat pada peta topografi yang telah ditampilkan sebelumnya (Gambar 5.12).



Gambar 5.21 Peta Vs30 di Kota Bengkulu



Gambar 5.22 Peta Vs30 di Kota Bengkulu (USGS, 2014)

Selanjutnya hasil dari pemetaan Vs30 ini dibandingkan dengan hasil Vs30 USGS yang tampak pada gambar 5.22. Vs30 dari USGS memiliki resolusi yang rendah sehingga tampilan Peta Vs30 kurang *smooth* (halus). Tetapi sudah mampu memberikan informasi yang cukup. Dan dari perbandingan antara Vs30 USGS dan penelitian ini memiliki hasil yang sama dimana pada daerah-daerah pantai memiliki Vs30 yang rendah dan pada daerah yang tinggi memiliki Vs30 yang tinggi juga.

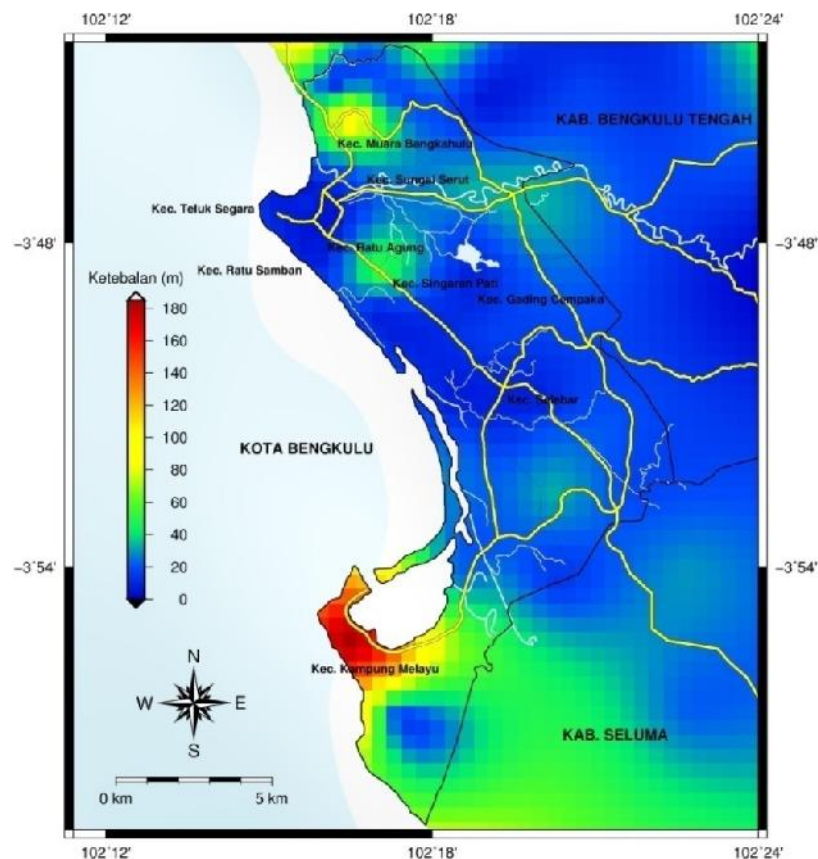
5.2.6 Sebaran Ketebalan Sedimen

Dari nilai parameter Vs30 dan Frekuensi dominan (f_g) kemudian dapat dihitung ketebalan sedimen (h) dengan pers. (3.11). Hasil ketebalan sedimen ini diinterpolasi dan di buat dalam bentuk peta yakni Peta Ketebalan Sedimen yang tampak pada gambar 5.23. Daerah yang memiliki ketebalan sedimen yang paling tinggi berada di wilayah kecamatan Kampung Melayu yakni sebesar 185 m.

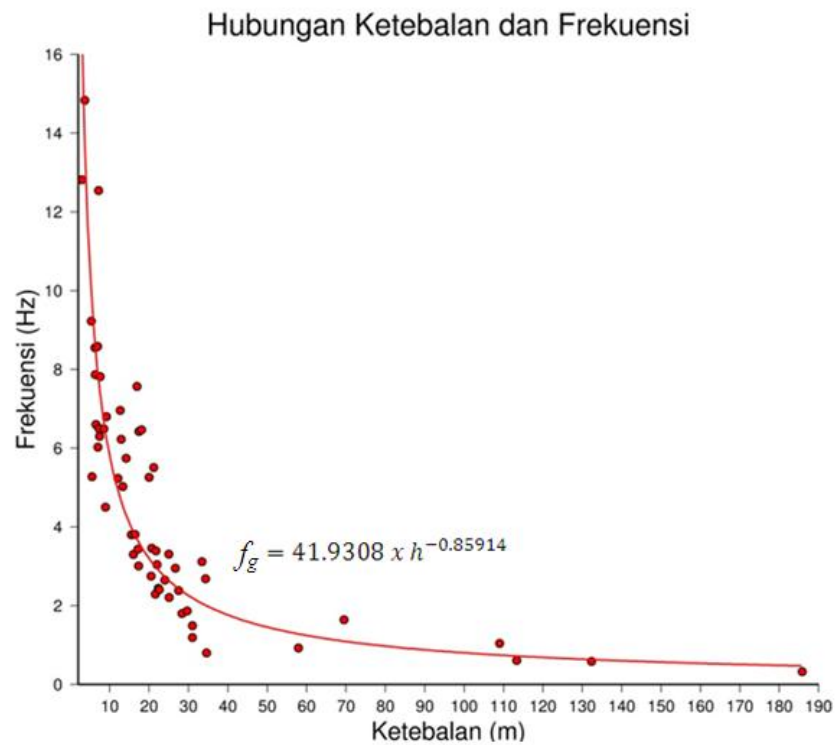
Sedangkan daerah yang memiliki ketebalan yang rendah berada di wilayah Kecamatan Teluk Segara yakni sebesar 5.2 m. Berdasarkan peta topografinya

daerah Teluk Segara masih lebih tinggi posisinya dibandingkan dengan daerah Kampung Melayu. Dan dari nilai Vs30 yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah Kampung Melayu sehingga daerah Teluk Segara masih relevan memiliki ketebalan sedimen yang rendah. Apabila dibandingkan dengan daerah Kampung Melayu.

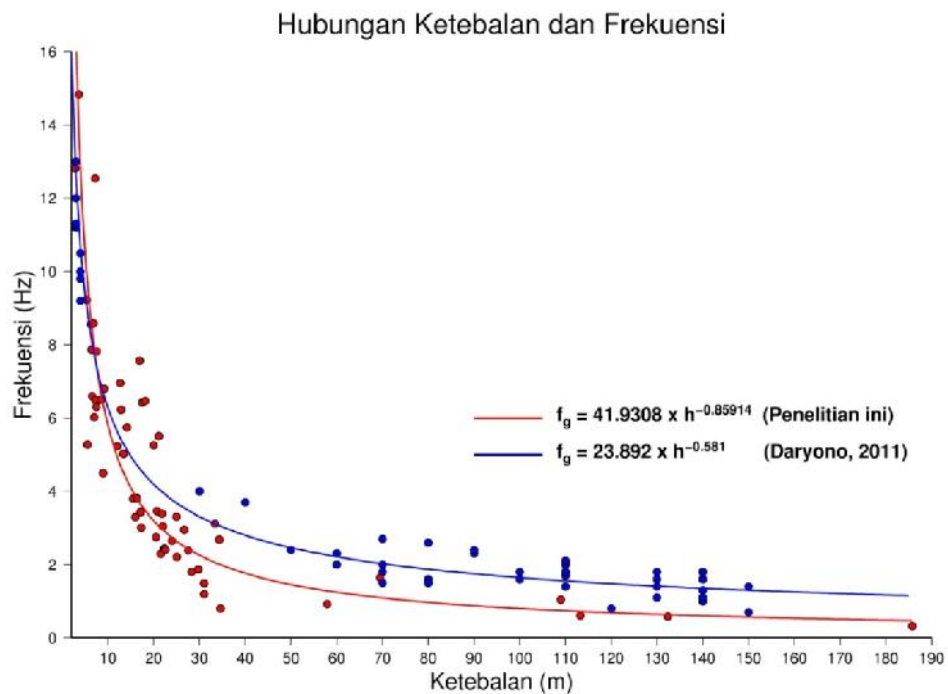
Untuk melihat hubungan antara ketebalan sedimen (h) dan frekuensi dominan (f_g) maka hasil ini di plot seperti yang tampak pada gambar 5.23. Dari sini diperoleh bahwa koefesien korelasi ($R = -0.84$) serta persamaan h dan f_g yaitu $F_g = 41.9308 \times h^{-0.85914}$ selanjutnya setelah diperoleh hasil ini dibandingkan dengan penelitian Daryono (2011) seperti yang tampak pada Gambar 5.25. Sebagai perbandingan hasil ketebalan dan frekuensi menunjukkan perbedaan untuk ketebalan lebih dari 15 m keatas sedangkan untuk ketebalan kurang dari 15 m perbedaannya semakin kecil.



Gambar 5.23 Peta Ketebalan Sedimen di Kota Bengkulu



Gambar 5.24 Grafik hubungan ketebalan sedimen dan frekuensi dominan

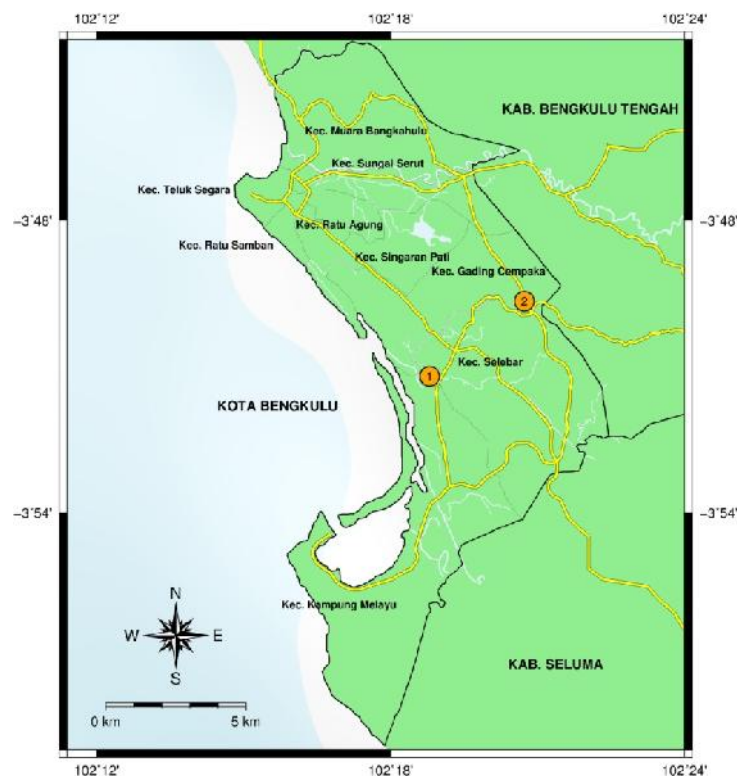


Gambar 5.25 Hubungan antara penelitian ini (garis warna merah dan sebaran data warna merah) dengan penelitian Daryono (2011) dengan garis warna biru dan sebaran data warna biru.

Koefesien korelasi antara ketebalan dan frekuensi pada penelitian Daryono (2011) yakni -0.897. Koefesien ini menunjukkan bahwa korelasi yang dihasilkan oleh daryono sedikit lebih baik dari penelitian yang dilakukan. Hal ini karena pada penelitian ini jumlah titik pengukuran sebanyak 53 lokasi sedangkan pada penelitian Daryono (2011) jumlah titik pengukurannya sebanyak 109 lokasi. Selain itu jenis tanah juga menjadi salah satu faktor yang membedakan antara penelitian ini dengan Daryono (2011). Pada frekuensi rendah jenis tanah pada penelitian ini ialah lempung sedangkan pada penelitian Daryono (2011) jenis tanah pada frekuensi rendah tersusun atas material vulkanik merapi sehingga jenis lithologi dari kedua penelitian ini pada frekuensi rendah memiliki perbedaan seperti yang tampak pada Gambar 5.25.

5.2.7 *Ground Shear Strain* perlapisan

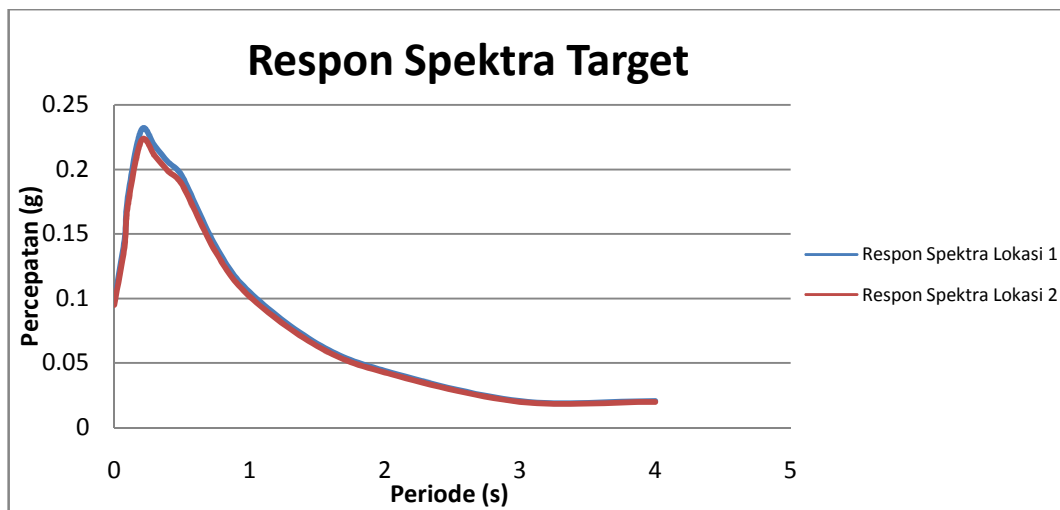
Ground Shear Strain perlapisan dihitung menggunakan *software* NERA. Lokasi perhitungan *ground shear strain* hanya dapat dilakukan di dua tempat saja. Hal ini dikarenakan keterbatasan data bor. Untuk lokasinya dapat dilihat pada Gambar 5.26.



Gambar 5.26 Peta lokasi perhitungan PGA dan *Ground Shear Strain* perlapisan

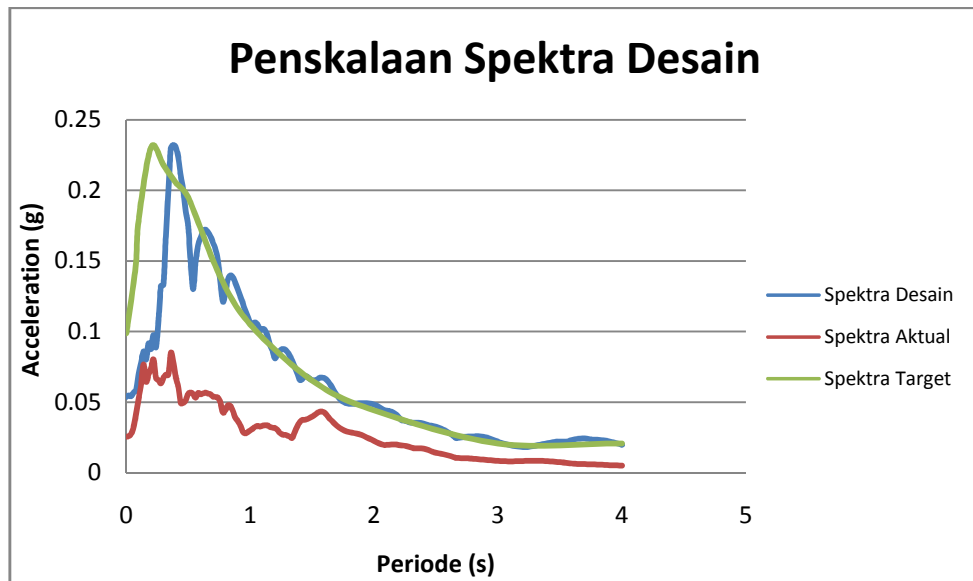
5.2.7.1 Analisis Spektal Matching untuk Daerah Kota Bengkulu

Untuk pengolahan dengan *software* NERA dibutuhkan data *time history* percepatan. Karena data *time history* percepatan gempa Bengkulu 2007 tidak ada maka digunakan *time history* percepatan desain. *Time history* ini diasumsikan sama seperti gempa Bengkulu 2007. Untuk mendapatkan data *time history* percepatan ini harus melalui tahap *Spectral Matching*. *Spectral Matching* ini menghasilkan spektra desain. Spektra desain ini merupakan spektra yang diasumsikan sama dengan spektra gempa Bengkulu 2007. Spektra ini diperoleh dengan cara mencocokkan spektra gempa landers dan spektra target. Spektra target ini diperoleh dengan menggunakan pers. (3.57). Spektra gempa landers ini disebut juga spektra aktual. Karena lokasi 1 dan 2 memiliki jarak hiposenter yang berbeda maka data spektra targetnya juga berbeda dan dapat dilihat pada gambar 5.27.



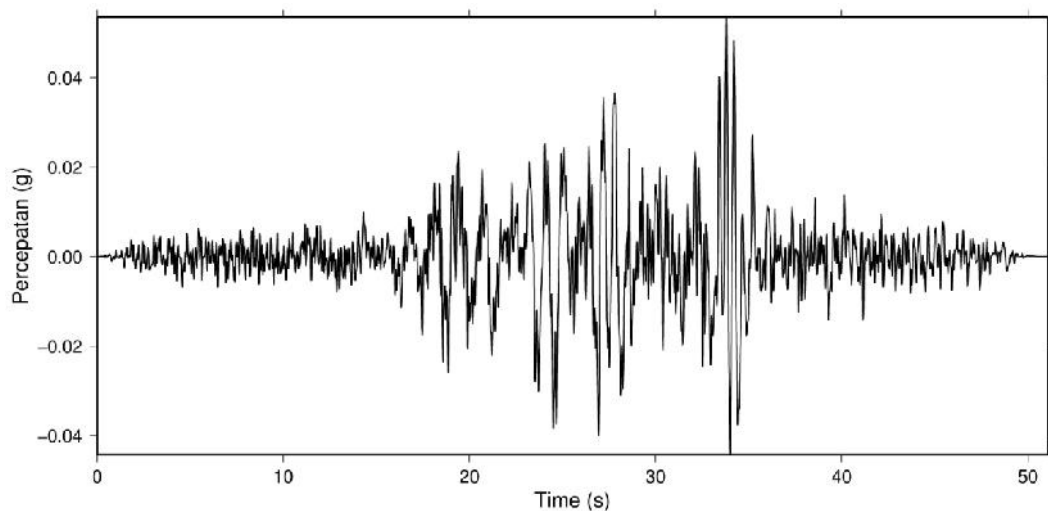
Gambar 5.27 Respon spektra target pada lokasi 1 dan 2

Selanjutnya untuk mendapatkan spektra desain pada lokasi 1 maka spektra aktual di *matching* dengan spektra target yang diolah dengan *software* SeismoMatch dan hasilnya dapat dilihat pada gambar 5.28.



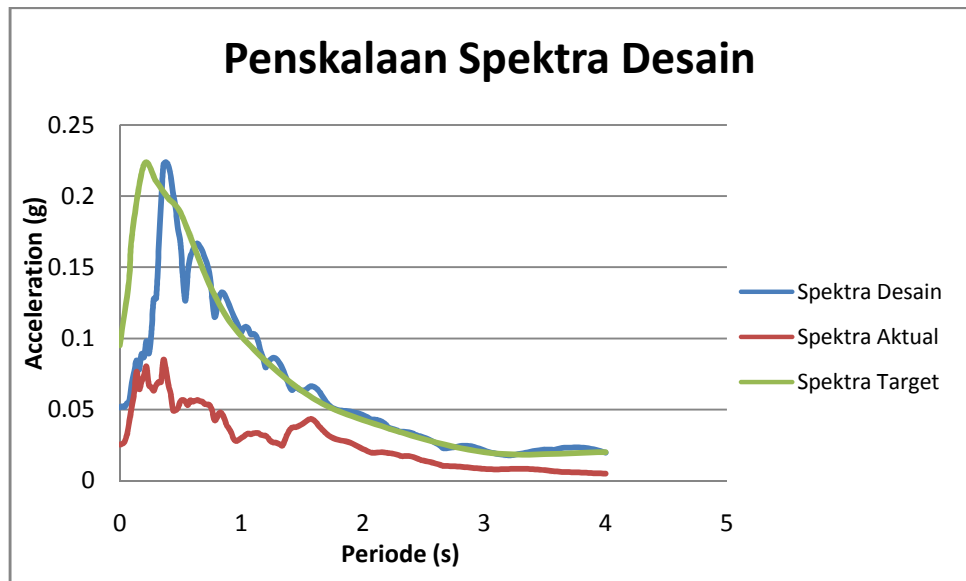
Gambar 5.28 Penskalaan Spektra Desain Lokasi 1

Setelah diperoleh spektra desain maka spektra ini di transformasi Fourier menjadi *time history* percepatan yang hasilnya ditunjukkan pada gambar 5.29.



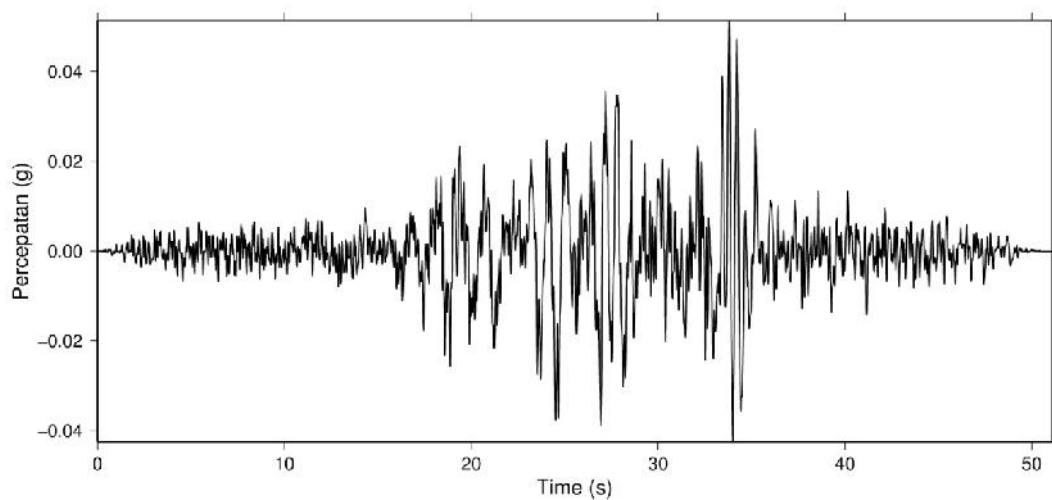
Gambar 5.29 Time History percepatan desain lokasi 1

Spektra desain pada lokasi 2 diperoleh dari pencocokan spektra gempa aktual dengan spektra target. Hasil spektra desain pada lokasi 2 dapat dilihat pada Gambar 5.30.



Gambar 5.30 Penskalaan Spektra Desain pada lokasi 2

Time History percepatan pada lokasi 2 diperoleh dengan transformasi Fourier spektra desain pada lokasi 2 yang ditampilkan pada gambar 5.31.



Gambar 5.31 Time History percepatan desain lokasi 2

Perbedaan nilai percepatan maksimum antara lokasi 1 dan 2 yaitu 0.05354 g dan 0.05135 g atau 53.54 gal dan 51.35 gal. Sehingga percepatan pada lokasi 1 lebih besar pada percepatan pada lokasi 2. Selanjutnya data pada lokasi 1 dan 2 ini digunakan untuk menghitung *shear strain*.

5.2.7.2 Perhitungan Ground Shear Strain pada lokasi 1 dan 2 dengan NERA

Perhitungan *ground shear strain* ini sudah lebih kompleks dibandingkan dari perhitungan *ground shear strain* dengan konsep nakamura karena memperhitungkan karakter lithologi tiap-tiap lapisan tanah. Pada perhitungan ini hanya menggunakan jenis lithologi lempung (*clay*). Data lithologi ini diperoleh dari bor NSPT dan bor lithologi. Data bor pada lokasi 1 dan 2 dapat dilihat pada Tabel (5.4) dan (5.5).

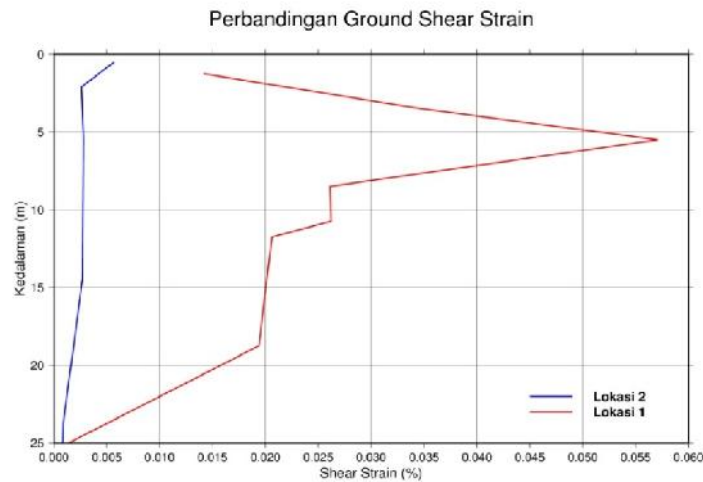
Tabel 5.4 Data Bor pada lokasi 1

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Ketebalan (m)	Shear Modulus (Mpa)	NSPT
2.5	Clay	2.5	33.65	5
4.5	Clay	2.0	38.48	6
6.5	Clay	2.0	37.00	6
10.5	Clay	4.0	109.09	26
11.0	Clay	0.5	127.16	30
12.5	Clay	1.5	170.73	50
25.0	Clay	12.5	260.42	60

Tabel 5.5 Data Bor pada lokasi 2

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Ketebalan (m)	Shear Modulus (Mpa)	vs (m/s)
1.0	Clay	1.0	11.64	79
3.2	Clay	2.2	118.69	225
7.6	Clay	4.4	269.84	362
21.2	Clay	13.6	644.82	610
26.2	Clay	5.0	2899.85	1178

Karakter jenis tanah/lithologi terhadap beban gempa ini direpresentasikan dalam bentuk kurva *shear modulus reduction*. Kurva *shear modulus reduction* menunjukkan bahwa pada saat material melebihi nilai *shear strain* tertentu nilai *shear modulus*nya akan berubah dan ini merupakan salah satu karakter tanah yang mencirikan sifat elastisitasnya. Sedangkan pada perhitungan *ground shear strain* dengan konsep nakamura tidak memperhitungkan lithologi tetapi hanya menggunakan parameter indeks kerentanan seismik dan PGA di *bedrock*.

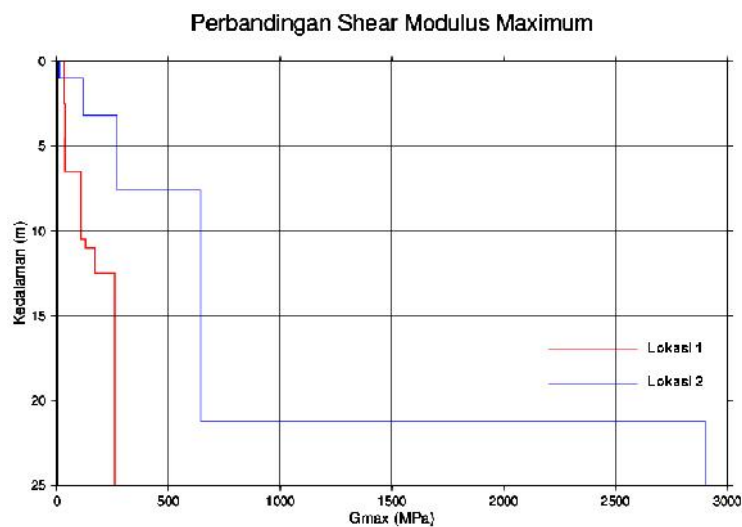


Gambar 5.32 Grafik perbandingan *ground shear strain* antara lokasi 1 dan 2

Perbedaan nilai shear strain antara lokasi 1 dan 2 disebabkan perbedaan *shear modulus* dan percepatan pada batuan dasar (a_b). Pada lokasi 1 nilai percepatan pada batuan dasarnya lebih besar dari pada lokasi 2. Sedangkan untuk mengetahui perbedaan *shear strain* ini dengan shear strain konsep Nakamura dapat dilihat pada Tabel 5.6.

Tabel 5.6 Perbandingan hasil *shear strain* NERA dan Nakamura

Shear Strain	Lokasi 1	Lokasi 2
NERA	0.000142	0.000057
Nakamura	0.000503	0.000146



Gambar 5.33 Perbandingan *Shear Modulus Maximum* (G_{max})

Selain dari perbedaan dari PGA di batuan dasar nilai *Shear Modulus Maximum* (G_{max}) juga mempengaruhi nilai shear strain untuk melihat perbandingan profil G_{max} pada lokasi 1 dan lokasi 2 dapat dilihat pada Gambar 5.33. Berdasarkan Gambar 5.33 profil shear modulus pada lokasi 1 cenderung lebih kecil sehingga nilai *ground shear strain* pada lokasi 1 lebih besar dibandingkan dengan nilai *ground shear strain* pada lokasi 2. Nilai *Shear Modulus* ini tergantung dari v_s dan densitas tanah. Dan pada lokasi 2 berada pada daerah yang lebih keras (V_{s30} pada lokasi 2 lebih besar dibandingkan dengan lokasi 1) sehingga pada lokasi ini nilai *ground shear strain* lebih kecil dibandingkan dengan lokasi 1. Sehingga secara umum daerah pada lokasi 2 cenderung memiliki *shear strain* yang lebih kecil dibandingkan dengan lokasi 1. Selanjutnya apabila dibandingkan dengan konsep Nakamura nilai *shear strain* yang dihasilkan dengan NERA memiliki nilai *shear strain* yang lebih kecil, hal ini dikarenakan perbedaan nilai PGA (Tabel 5.7).

Tabel 5.7 Perbedaan Nilai PGA yang digunakan pada perhitungan *shear strain*

Nilai PGA	Lokasi 1	Lokasi 2
NERA	53.54 gal	51.35 gal
Nakamura	93.97 gal	89.00 gal

Untuk nakamura nilai PGA menggunakan atenuasi Fukushima dan Tanaka (1990) yang nilai PGAnya lebih besar dibandingkan dari pada yang digunakan di NERA. Karena nilai PGA pada NERA menggunakan PGA hasil *spectral matching* dan nilai PGA ini juga lebih kecil sehingga nilai *shear strain* dari NERA memiliki nilai yang lebih kecil.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Berdasarkan beberapa hasil yang diperoleh pada penelitian ini didapat :

1. Tingkat kerusakan dapat diidentifikasi dengan parameter indeks kerentanan seismik (K_g), *ground shear strain* (γ) dan PGA Kanai.
2. Daerah sekitar pantai di Kecamatan Muara Bangkahulu memiliki Indeks Kerentanan Seismik (K_g) yang tertinggi. Sehingga secara teori daerah ini akan mudah mengalami kerusakan akibat gempabumi dari pada daerah lainnya.
3. Berdasarkan nilai *ground shear strain* akibat gempa Bengkulu 2007 daerah sekitar pantai Kecamatan Kampung Melayu merupakan daerah yang terbesar nilai *ground shear strain*nya dan sudah mencapai 10^{-3} sehingga berdasarkan Tabel 3.4 berarti sudah terjadi penurunan tanah pada wilayah ini saat terjadi gempa Bengkulu 2007.
4. Berdasarkan nilai PGA akibat gempa Bengkulu 2007 daerah Kec. Teluk Segara memiliki nilai PGA yang terbesar sehingga daerah ini juga memiliki tingkat kerusakan yang tinggi.

6.2 Saran

Untuk hasil yang lebih baik lagi maka perlu disarankan sebagai berikut :

1. Lokasi pengukuran mikrotremor lebih rapat lagi sehingga hasil interpolasi dan pemetaan akan lebih halus.
2. Data Bor NSPT perlu ditambahkan dan sebaiknya sebarannya merata ke seluruh Kota Bengkulu agar diperoleh v_s dari hasil inversi kurva H/V dan pengolahan *ground shear strain* per lapisan yang lebih baik.
3. Untuk membandingkan v_s hasil inversi kurva H/V maka perlu dilakukan survey seismik refraksi agar dapat di evaluasi hasil inversi kurva H/V.
4. Di perlukan data kerusakan yang tersebar merata di Kota Bengkulu agar daerah yang berpotensi mengalami kerusakan dapat ditentukan dengan baik.

5. Dalam pengolahan *ground shear strain* dengan NERA di butuhkan rekaman accelerograph pada *bedrock* atau *outcrop* di Kota Bengkulu agar hasil yang diperoleh mencerminkan *ground shear strain* yang sesungguhnya.
6. Untuk perbandingan PGA di permukaan maka perlu adanya data rekaman accelerograph dipermukaan sehingga nilai PGA hasil penelitian dapat di evaluasi kesamaannya dengan data observasi dari accelerograph.

DAFTAR PUSTAKA

- Anonim, 2007, Observasi Gempa 12 dan 13 September 2007, Sumatra, Indonesia, Build Change.
- Bakosurtanal. 2000. Peta Provinsi Bengkulu. Bakosurtanal, Jakarta
- BAPPENAS. 2007. Laporan Penilaian Kerusakan dan Kerugian Pasca Gempabumi di Wilayah Provinsi Bengkulu dan Provinsi Sumatra Barat 12 September 2007. BAPPENAS. Jakarta
- Bard, P. Y., dan Chávez-García, F. J. 1993. On the decoupling of surficial sediments from surrounding geology at Mexico City, Bull. Seism. Soc. Am., 83, 1979-1991.
- Bardet, J.P., dan Tobita, T. 2001. NERA a computer program for nonlinear earthquake site response analyses of layered soil deposits. Department of Civil Engineering. University of Southern California
- BNPB. 2011. Perka BNPB No.15 Tahun 2011 Tentang Pedoman Pengkajian Kebutuhan Pasca Bencana. Jakarta : Sekretariat Negara.
- BMKG. 2012. Gempabumi Signifikan dan Merusak 1821 – 2011, BMKG, Jakarta.
- BPS Kota Bengkulu. 2013. Kota Bengkulu dalam angka 2013. BPS Kota Bengkulu, Bengkulu
- BPS Pemprov Bengkulu, 2013, Pemprov Bengkulu dalam angka 2013. BPS Pemprov Bengkulu, Bengkulu

- Carman, Martina. 2006. Amplification of Ground Motion at The Area of Krsko NPP Due to Local Site Effects. Dissertation. Graduate School. University of Nova Gorica.
- CEN (2004). Eurocode 8—design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European standard EN 1998-1. December 2004. European Committee for Standardization. Brussels
- Daryono. 2011. Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuklahan di Zona Graben Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, Disertasi, Program Pascasarjana Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Farid, Muhammad., Kirbani Sri Brotopuspito, Wahyudi, Sunarto dan Wiwit Suryanto. 2013. Shoreline Changes and Seismic Vulnerability Index in The Earthquake Prone Areas (The Case of Coastal North Bengkulu, Bengkulu Province- Indonesia). The Third Basic International Conference
- Febriani, Y. 2012. Pemetaan Nilai Peak Ground Acceleration (PGA) dengan Menggunakan Metode Kannai di Kota Bengkulu, Yogyakarta: Thesis, Program Studi S2 Ilmu Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Gadjah Mada.
- Fukushima, Y. and Tanaka, T.A. 1990. A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion in Japan, Bulletin of the Seismological Society of America, v.80, no. 4, p.757-783.

Gafoer dkk. 2007. Geologi Lembar Bengkulu , Sumatera , skala 1:250.00. Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi, Bandung.

Hadi, A.I., Muhammad Farid dan Yulian Fauzi. 2012. Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Kerentanan Gempa Bumi untuk Mendukung Rencana Tata Ruang dan Wilayah (RTRW) Kota Bengkulu. Simetri Jurnal Ilmu Fisika Indonesia Vol1 Nomor2(D) September 2012

Harlianto, Budi. 2013. Pemetaan Percepatan Getaran Tanah Maksimum, Indeks Kerentanan Seismik Tanah, Ground Shear Strain, dan Ketebalan Lapisan Sedimen Untuk Mitigasi Bencana Gempabumi Di Kabupaten Bengkulu Utara, Yogyakarta : Thesis, Program Studi S2 Ilmu Fisika, Jurusan Fisika FMIPA, Universitas Gadjah Mada.

Hencer, Steve. 2012. *Practical Engineering Geology*. Spon Press. New York.

Herak, Marijan. 2008. ModelHVSR: a Matlab tool to model horizontal-to-vertical spectral ratio of ambient noise, Computers and Geosciences, vol.34, hal. 1514–1526.

Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Kuk, K., Kuk., V., Marić, K., Markušić, S., Stipčević, J. 2009. HVSR of Ambient noise Ston (Croatia): Comparison with theoretical Spectra and with damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake. Bull Earthquake Eng. DOI 10.1007/s10518-009-9121-x

Hough, S. E., Borchardt, R. D., Friberg, P. A., Busby R., Field, E., and Jacob, K. H. 1990. The role of sediment-induced amplification in the collapse of the

Nimitz freeway during the October 17, 1989 Loma Prieta earthquake, Nature, 344, 853-855.

Irfani. 2014. Studi Mikrotremor Untuk Zonasi Bahaya Gempabumi Daerah Surakarta Jawa Tengah, Yogyakarta : Skripsi, Jurusan Teknik Geologi Fakultas Teknik., Universitas Gadjah Mada

Ibs-von, M. S., and Wohlenberg, J. 1999. Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 89, No. 1, pp. 250-259, February 1999.

Ishihara, K. 1996. *Soil behavior in earthquake geotechnics*. Oxford Science Publications, Oxford, UK.

Kanai, K. 1957. Semi Empirical Formula for the Seismic Characteristic of the Ground, Bull. Earthq. Res. Inst., 35 (1957), 309. 87

Kanai, K. 1958. A Study of Strong Earthquake Motions, Bull. Earthq. Rest. Inst., 36 (1958), 295-310.

Kanai, K. and Yoshizawa, S. 1958. The Amplitude and the Periode of Earthquake Motions II, Bull. Earthq. Rest. Inst., 36 (1958), 275.

Kanai dkk. 1966. Observation of Strong Earthquake Motion in Matsushiro Area Part 1 (Empirical Formula of Strong Earthquake Motion) Bulletin of the Earthquake Research Institute Vol.44 (1966) pp.1269-1296

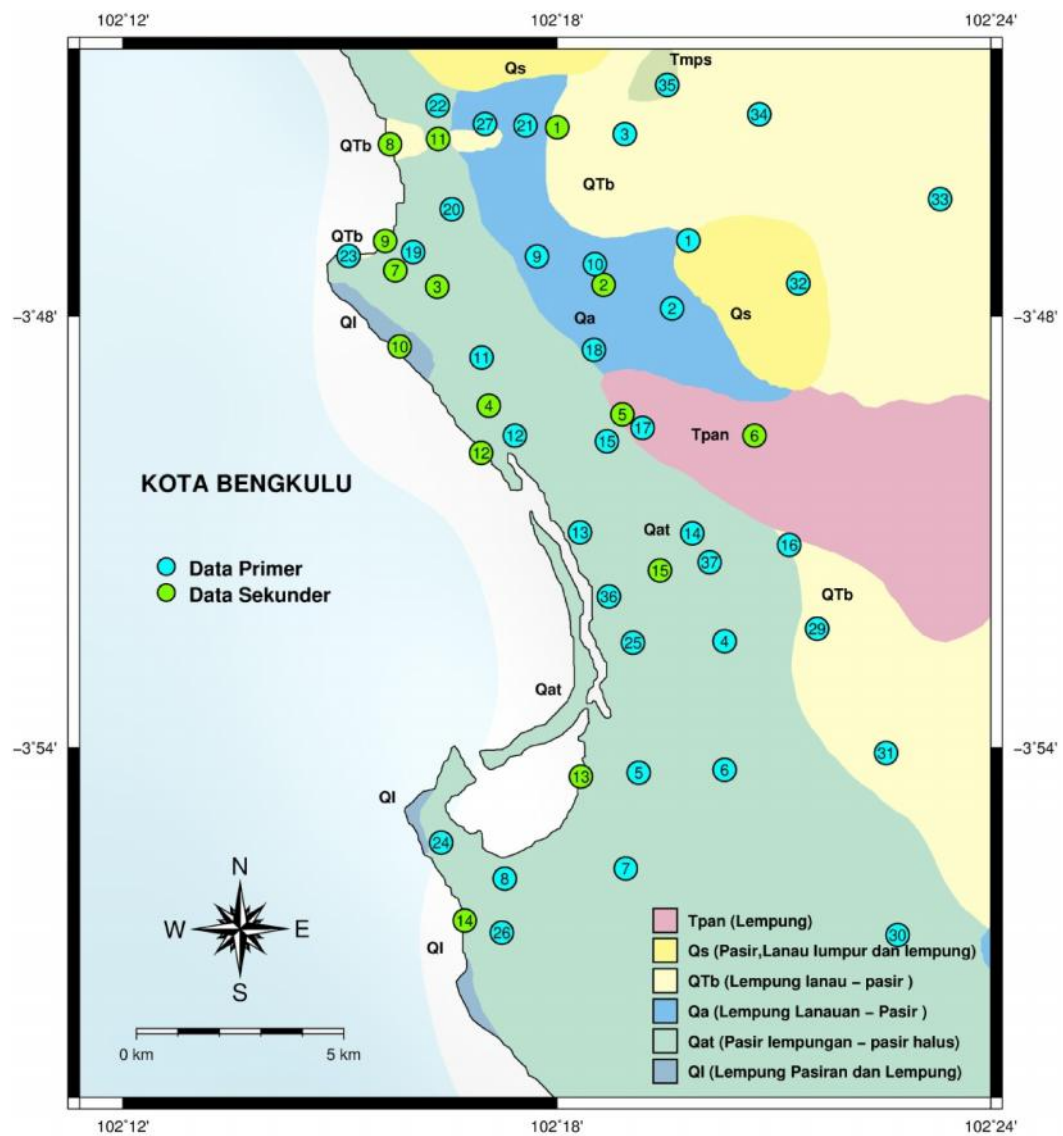
Kantiyar, Vinet., Tao Lai dan Khosrow Shabestari. 2010. Straight to the middle: Reflecting on the michoacan earthquake's impact twenty-five years later, AirCurrents., Boston.

- Kramer, Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice-Hall, Inc., United States of America.
- Mufida, Asmaul., Bagus Jaya Santosa dan Dwa Desa Warnana. 2013. Profiling Kecepatan Gelombang Geser (Vs) Surabaya Berdasarkan Pengolahan Data Mikrotremor Jurnal Sains dan POMITS Vol.2 No.2. ITS
- Natawidjaya, 2007. Gempabumi dan Tsunami di Sumatra dan Upaya Untuk mengembangkan Lingkungan Hidup Yang Aman Dari Bencana Alam. LIPI, Jakarta.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface, Quarterly Report of Railway Technical Research Inst. (RTRI) 30, hal. 25–33.
- Nakamura, Y. 1997. Seismic Vulnerability Indices for Ground and Structures Using Microtremor. Worl Congress on Railway Research., Florence.
- Nakamura, Y. 2008. Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Tehnique And Its Application. World Conference of Earthquake Engineering.
- Olivera, C.S., Antoni Roca dan Xavier Goula. 2008. *Assesing and Managing Earthquake Risk*. Springer. Netherland.
- SESAME. 2004. *Guidelines for the implementation of the H/V Spektral Ratio Tehnique on Ambient Vibration Measurements, Processing and Interpretation*, European Commision – Research General Directorate.
- Rosyidi, Sri Atmaja P. 2014. *Metode Analisis Gelombang Permukaan untuk Penyelidikan Sub-Permukaan*. LP3M UMY. Yogyakarta

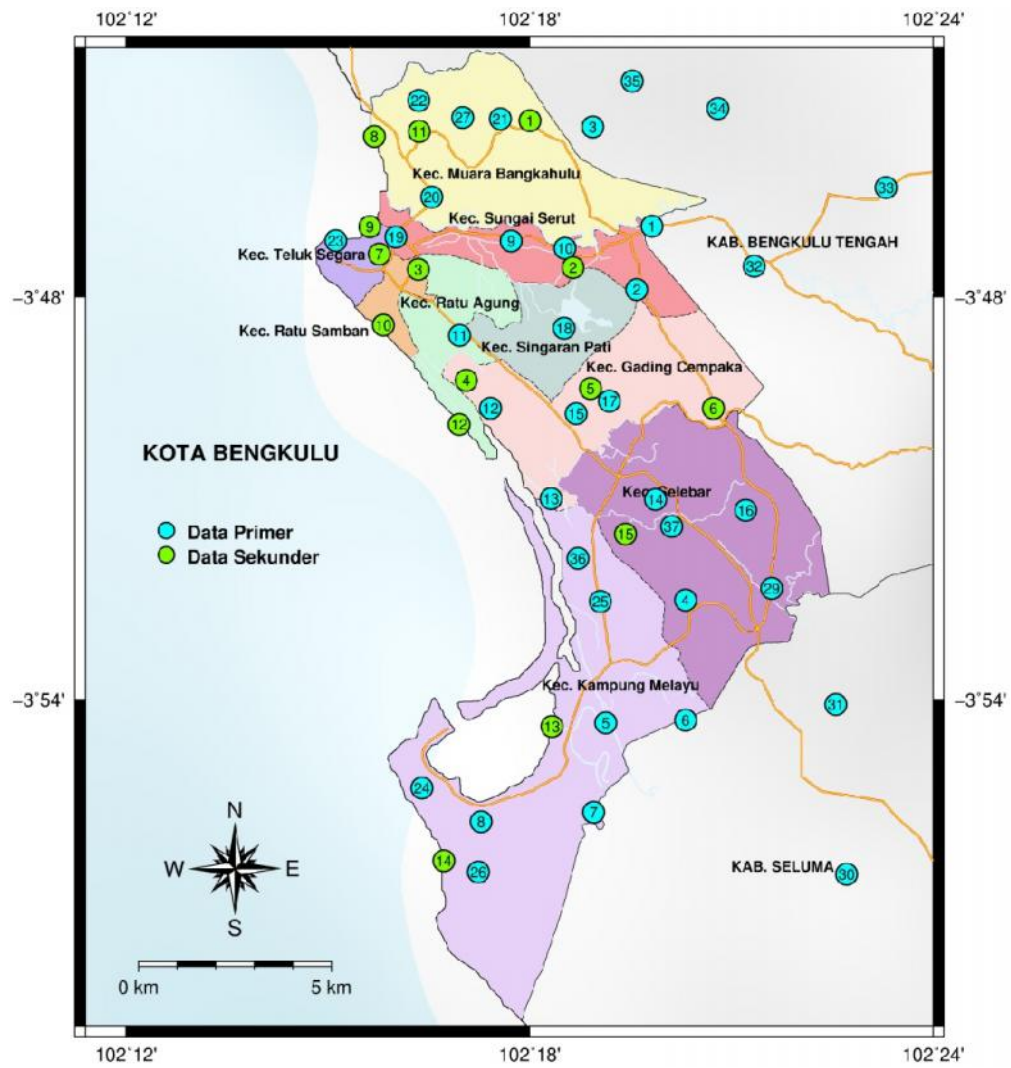
- Satyarno ,I. 2011. Evaluasi visual secara cepat pada bangunan sebagai upaya mitigasi bencana pasca gempa. Jurusan Teknik Sipil & Lingkungan UGM. Yogyakarta.
- Seed dan Idriss. 1982. *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*. EERI Monograph, Berkeley, California
- Sengara dkk, 2010. The 30 TH September 2009 West Sumatra Earthquake Padang Region Damage Survey. Geoscience Australia Record 2010/44. Australia.
- SIST EN 1998-1:2005/oA101 (2005). Eurocode 8, design of structures for earthquake resistance – part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. national Annex. Slovenian institute for standarization, Ljubljana.
- Subardjo.2001. Gempa Bumi Bengkulu 2000. Jurnal Meteorologi dan Geofisika Vol. 2 No. 1, Jakarta. Hal:33-41.
- Suarez, Luis E dkk. 2012. Ambient Vibration Measurements for Estimation of Site Fundamental Periods at the City of Mayagüez, Puerto Rico. USGS
- Sungkono. 2011. Inversi Terpisah dan Simultan Dispersi Gelombang Rayleigh dan Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio Menggunakan Algoritma Genetik. Surabaya : Thesis, Program Studi S2 Geofisika, Jurusan Fisika FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh November.
- USGS. 1999. Loma Prieta Earthquake 1989. USGS. United States of America.
- Wessel, P. dan Smith,W.H.F., 1998. New, improved version of generic mapping tools released, EOS, Trans. Am. geophys. Un., 79(47), 579.

LAMPIRAN A

PETA LOKASI PENGUKURAN MIKROTREMOR



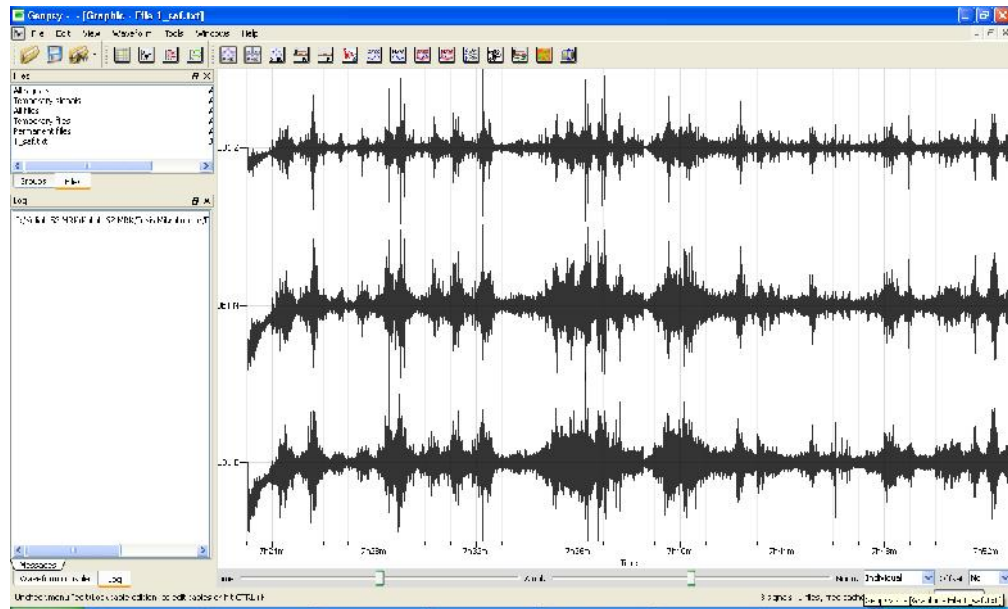
Gambar A.1 Peta lokasi pengukuran mikrotremor dengan kondisi geologi



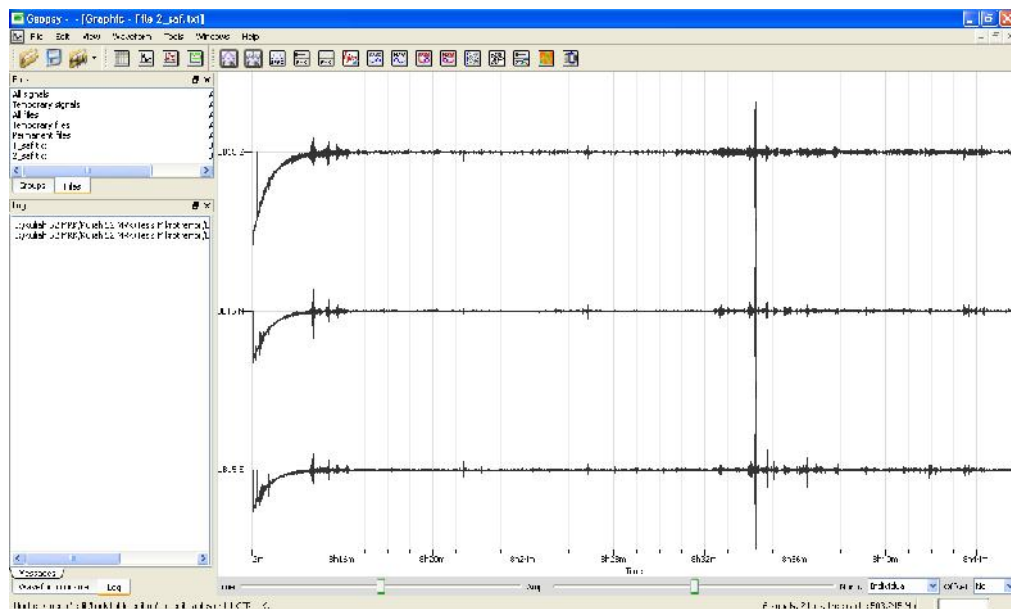
Gambar A.2 Peta lokasi pengukuran mikrotremor dengan batas wilayah Kota Bengkulu

LAMPIRAN B

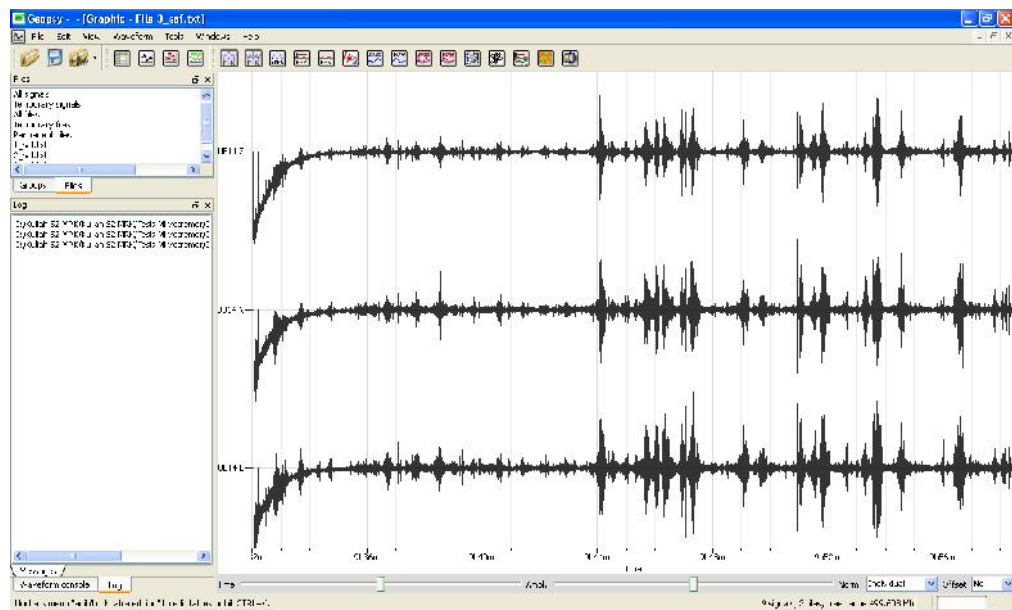
Waveform Mikrotremor Data Primer



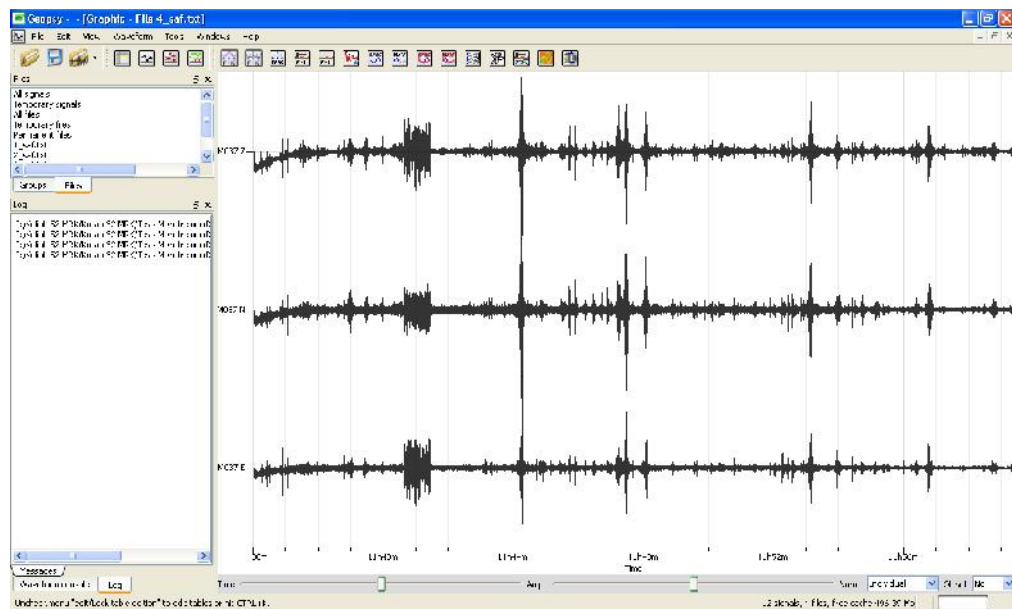
Gambar B.1 Waveform pada lokasi 1



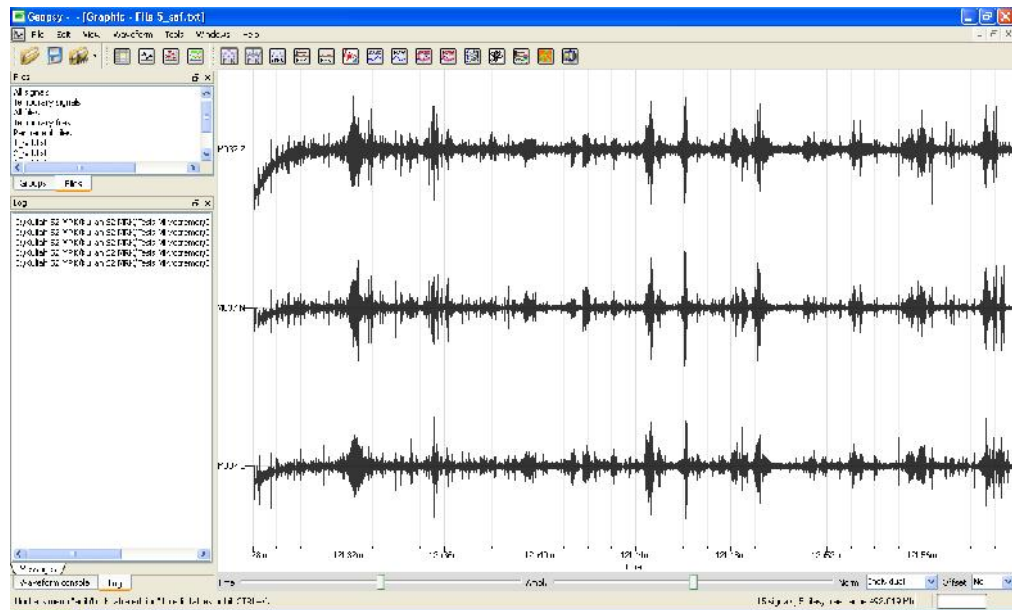
Gambar B.2 Waveform pada lokasi 2



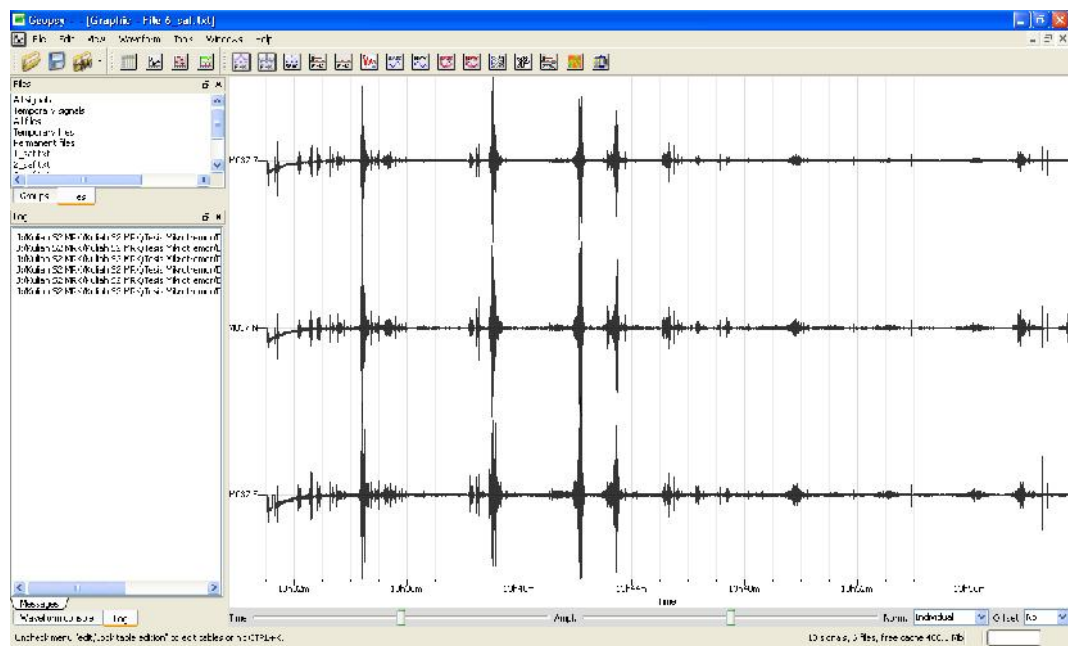
Gambar B.3 Waveform pada lokasi 3



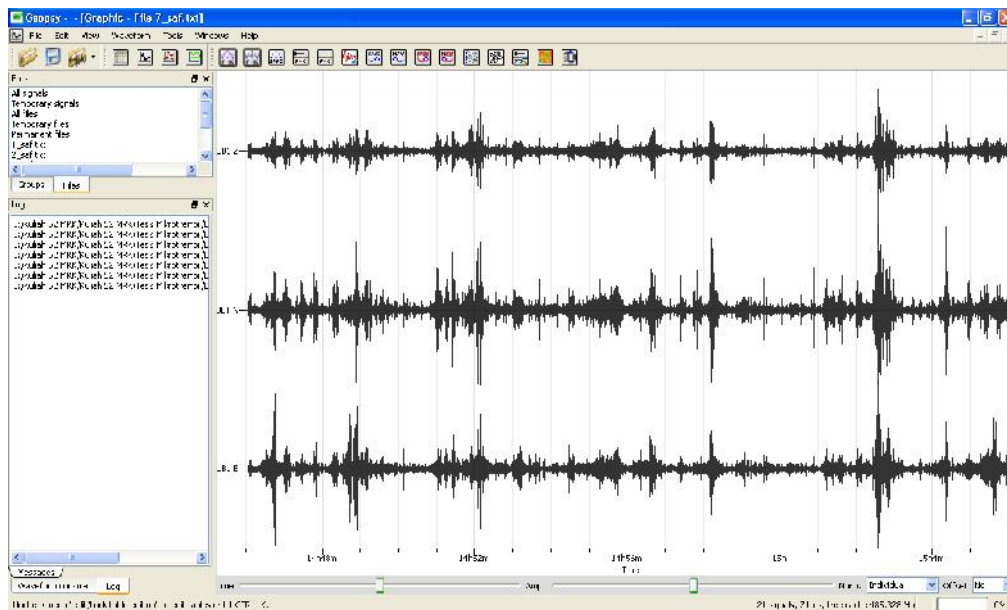
Gambar B.4 Waveform pada lokasi 4



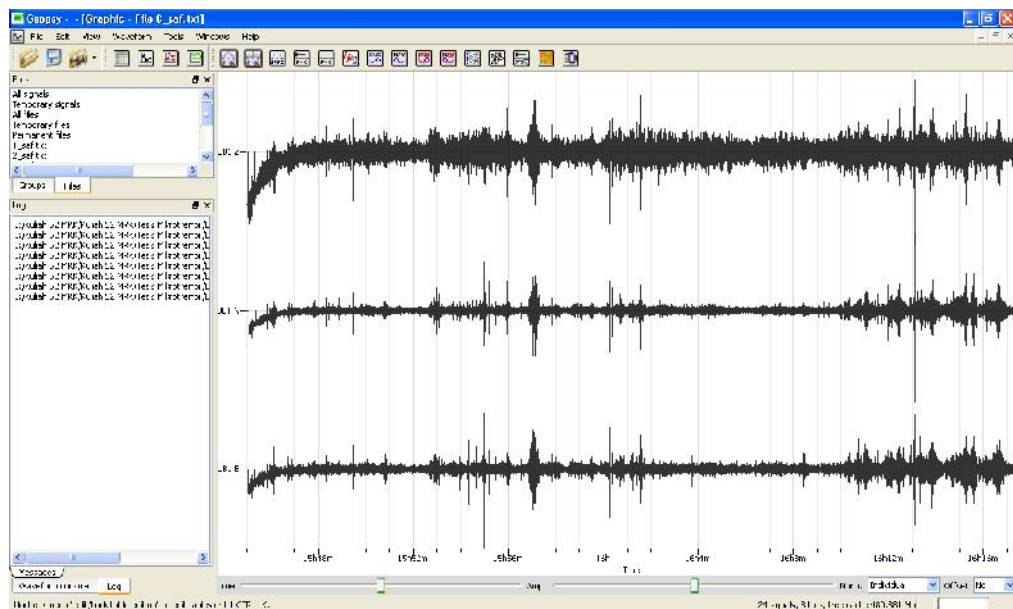
Gambar B.5 Waveform pada lokasi 5



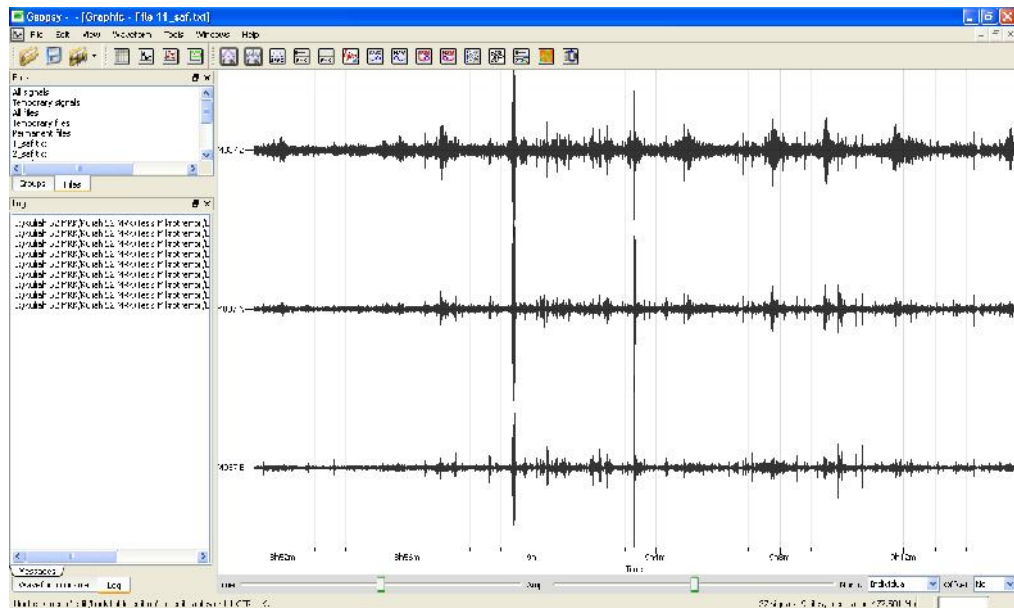
Gambar B.6 Waveform pada lokasi 6



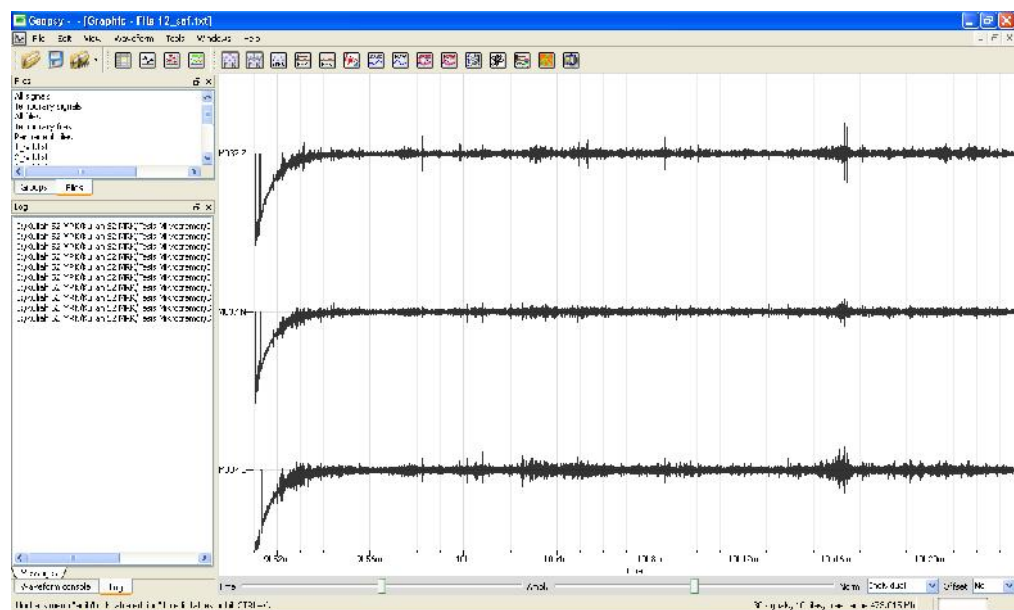
Gambar B.7 Waveform pada lokasi 7



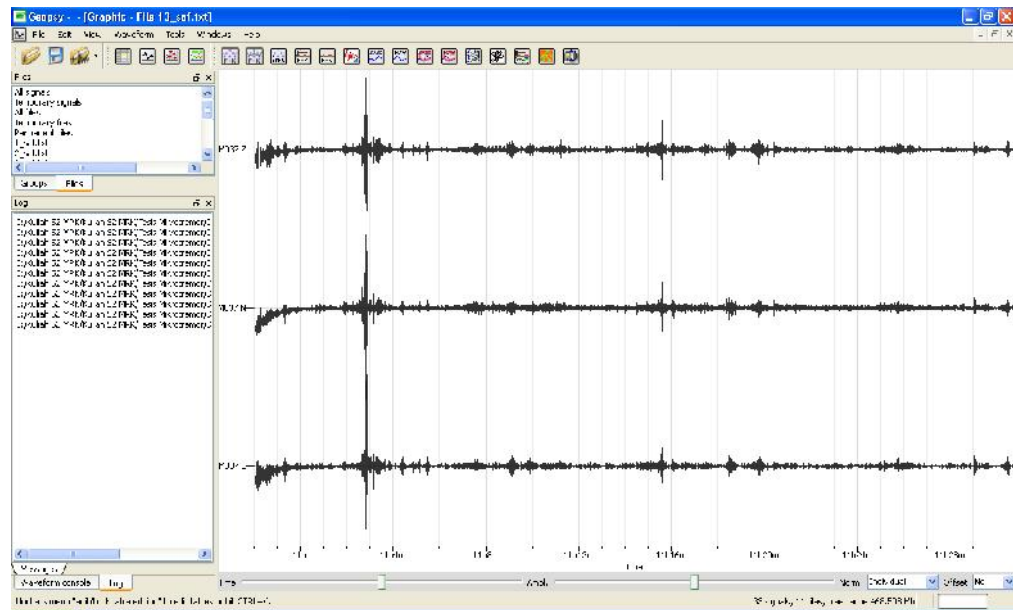
Gambar B.8 Waveform pada lokasi 8



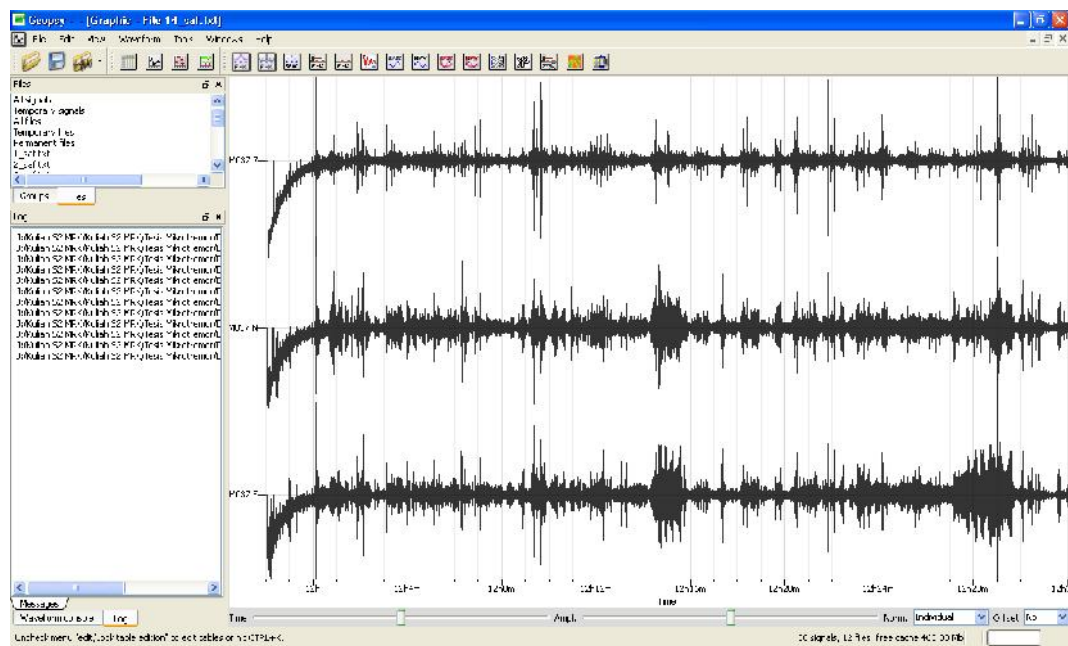
Gambar B.9 Waveform pada lokasi 9



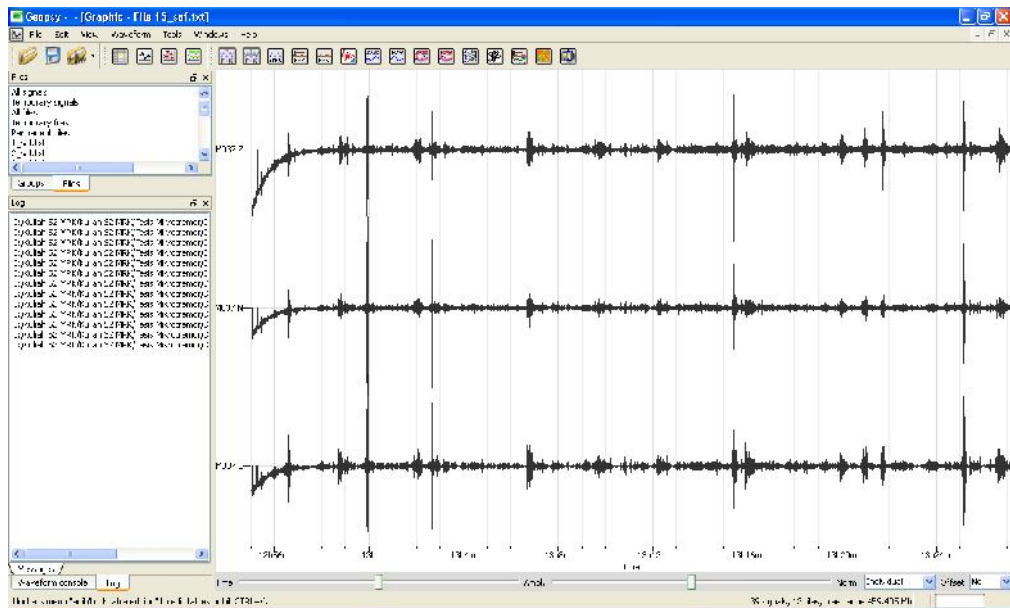
Gambar B.10 Waveform pada lokasi 10



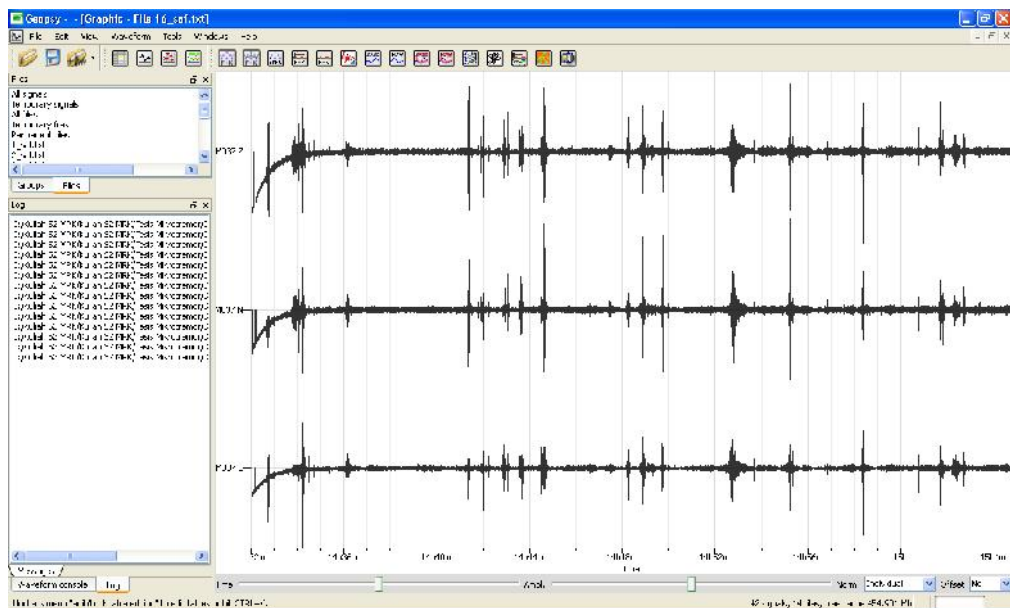
Gambar B.11 Waveform pada lokasi 11



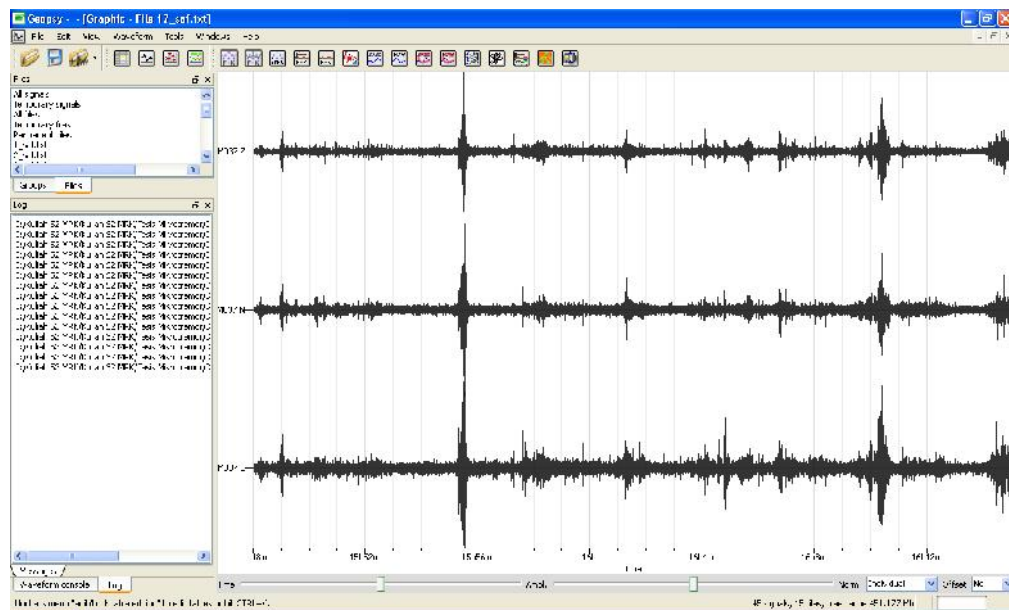
Gambar B.12 Waveform pada lokasi 12



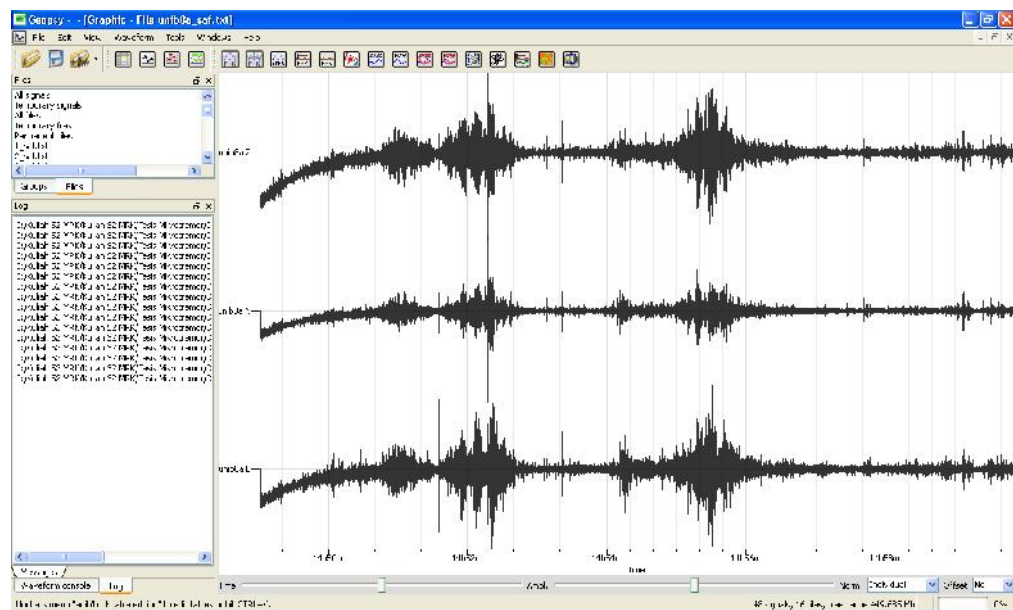
Gambar B.13 Waveform pada lokasi 13



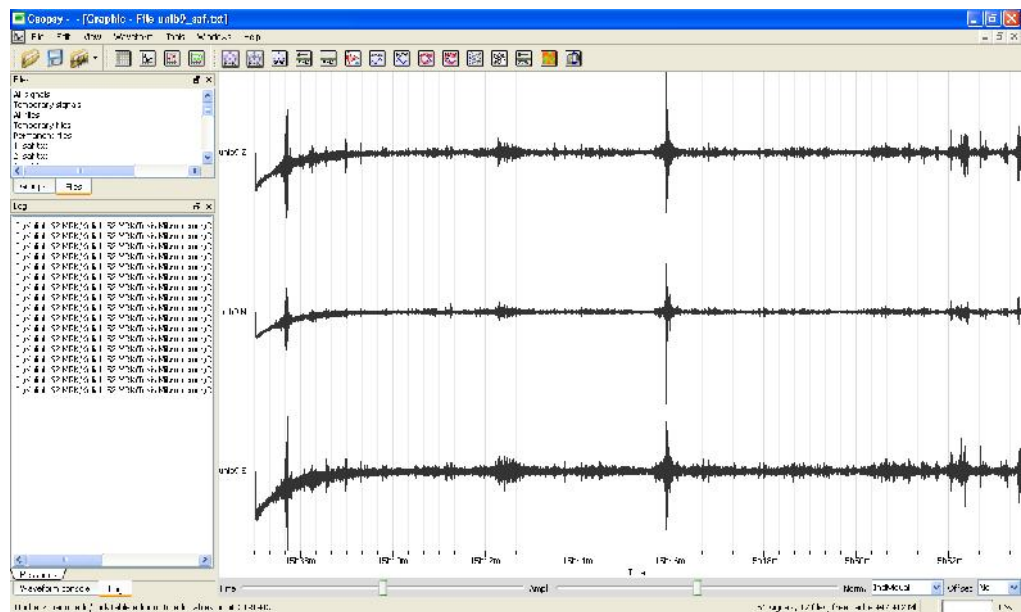
Gambar B.14 Waveform pada lokasi 14



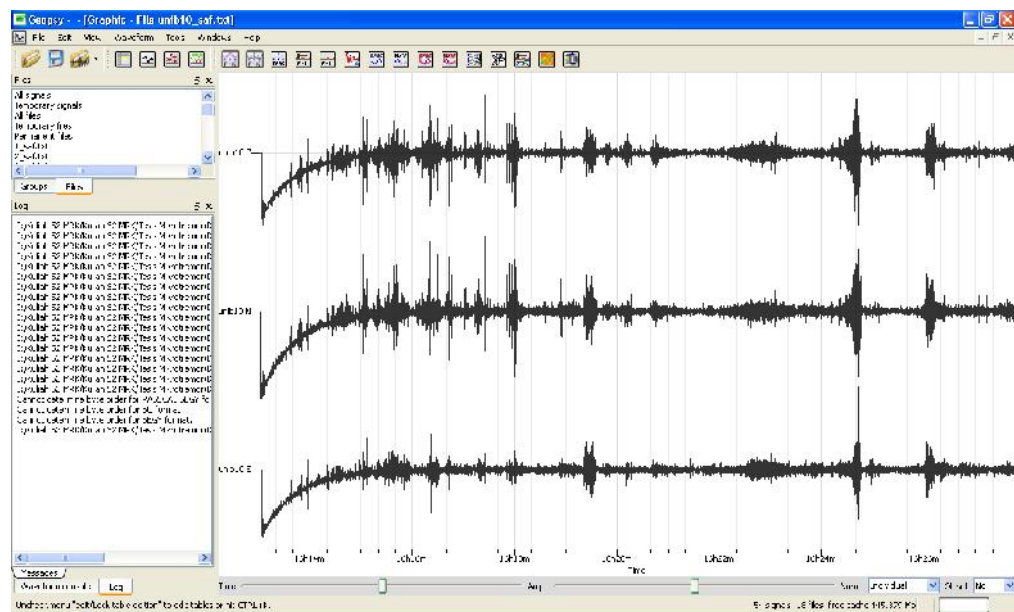
Gambar B.15 Waveform pada lokasi 15



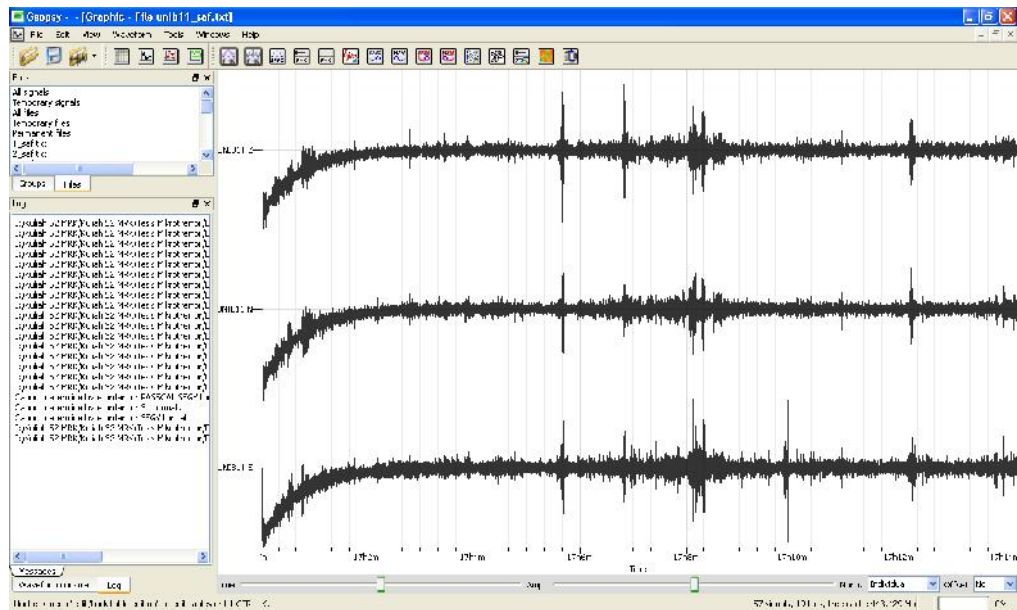
Gambar B.16 Waveform pada lokasi 16



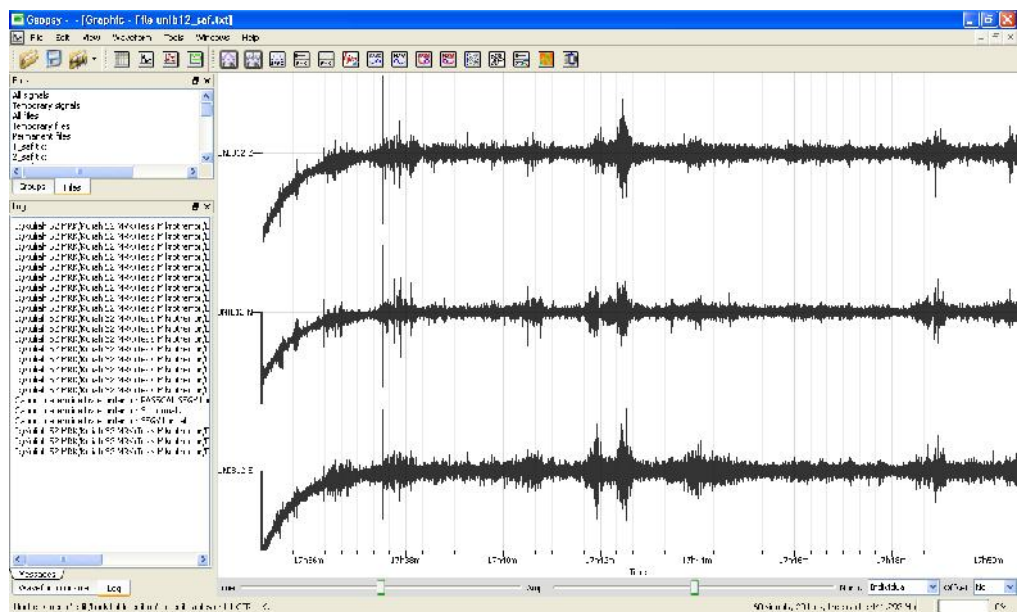
Gambar B.17 Waveform pada lokasi 17



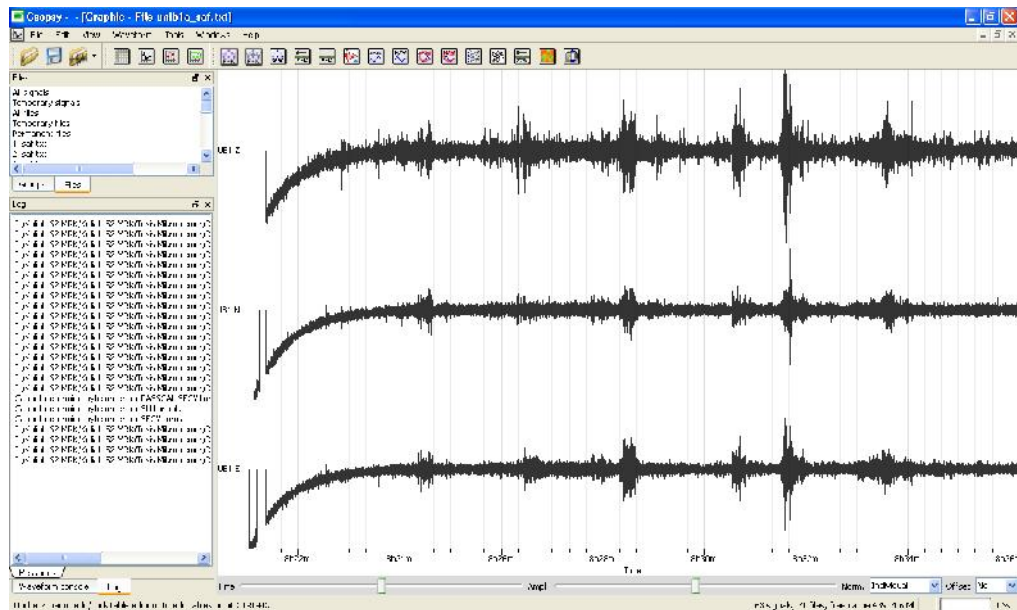
Gambar B.18 Waveform pada lokasi 18



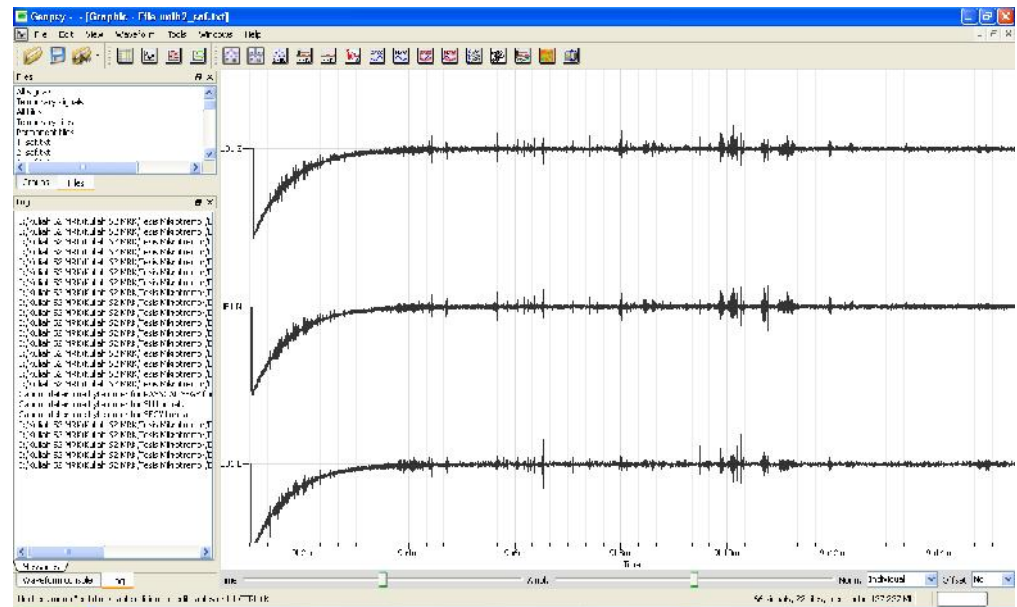
Gambar B.19 Waveform pada lokasi 19



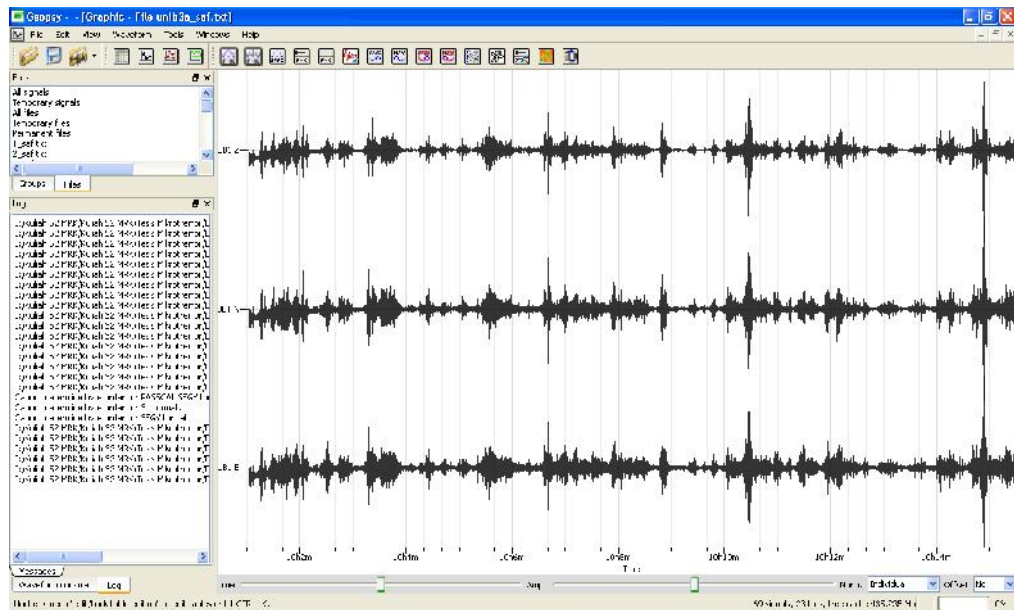
Gambar B.20 Waveform pada lokasi 20



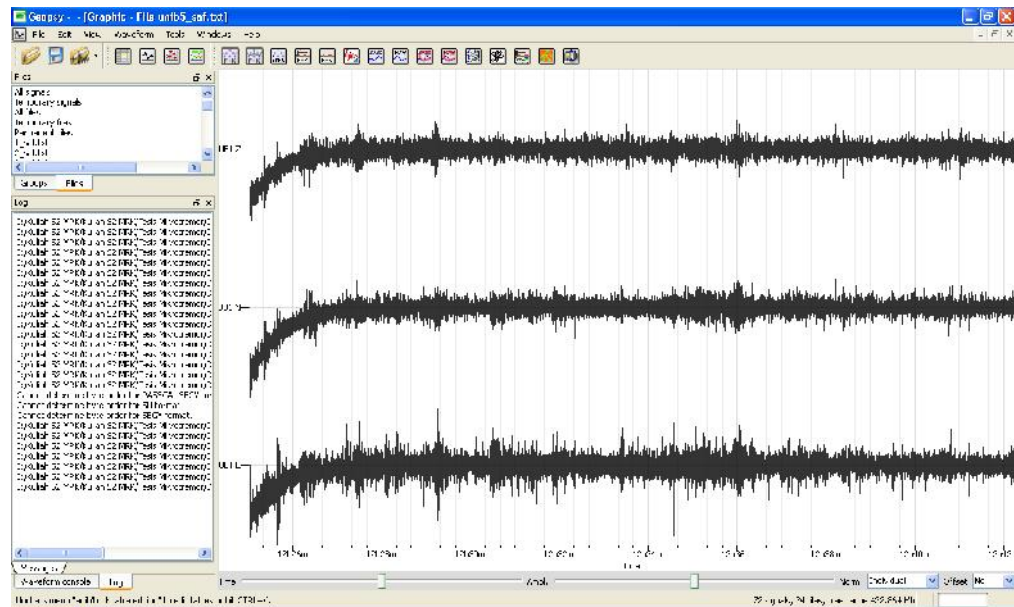
Gambar B.21 Waveform pada lokasi 21



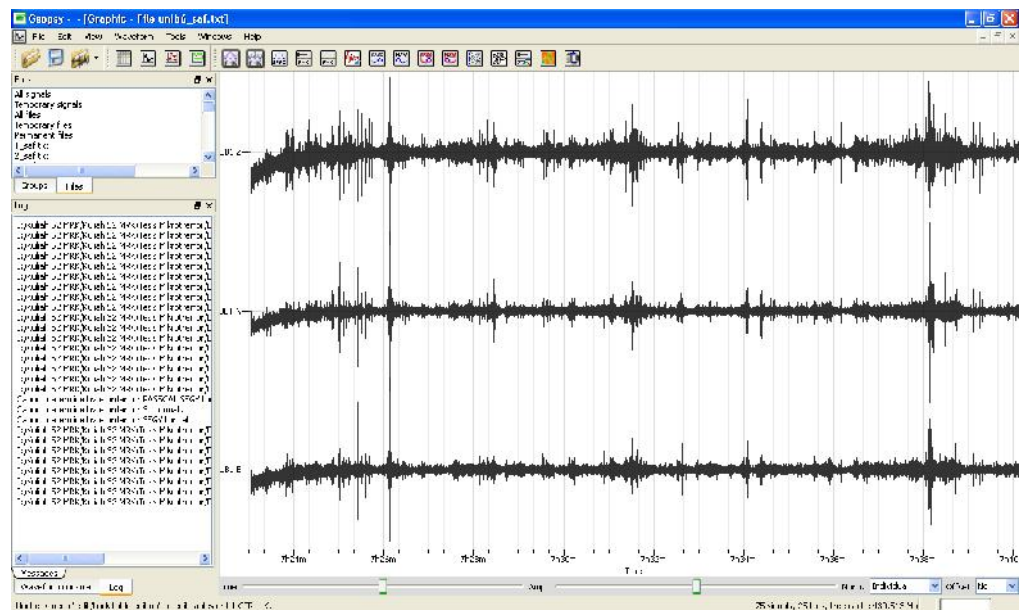
Gambar B.22 Waveform pada lokasi 22



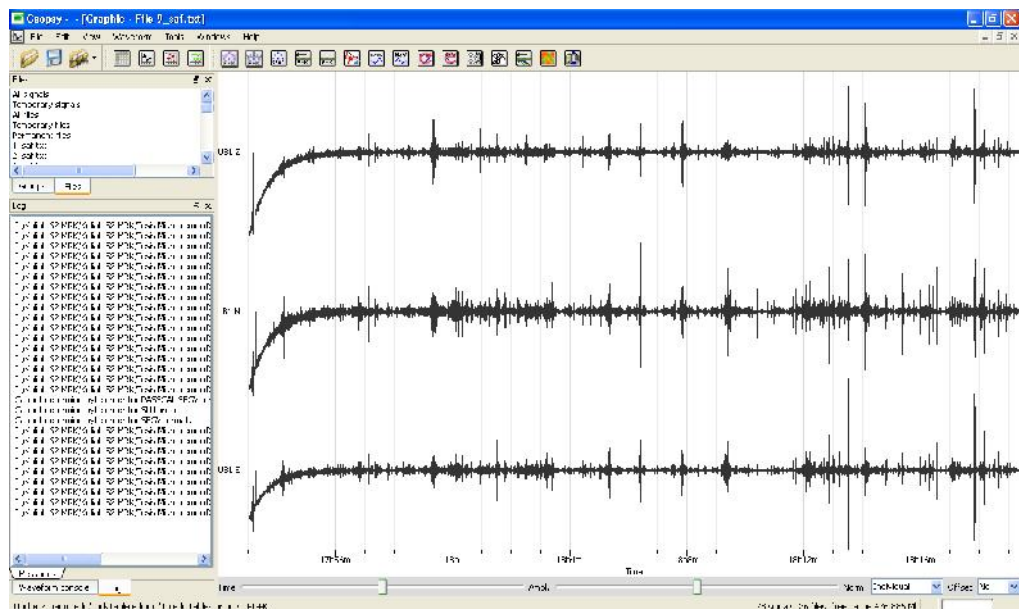
Gambar B.23 Waveform pada lokasi 23



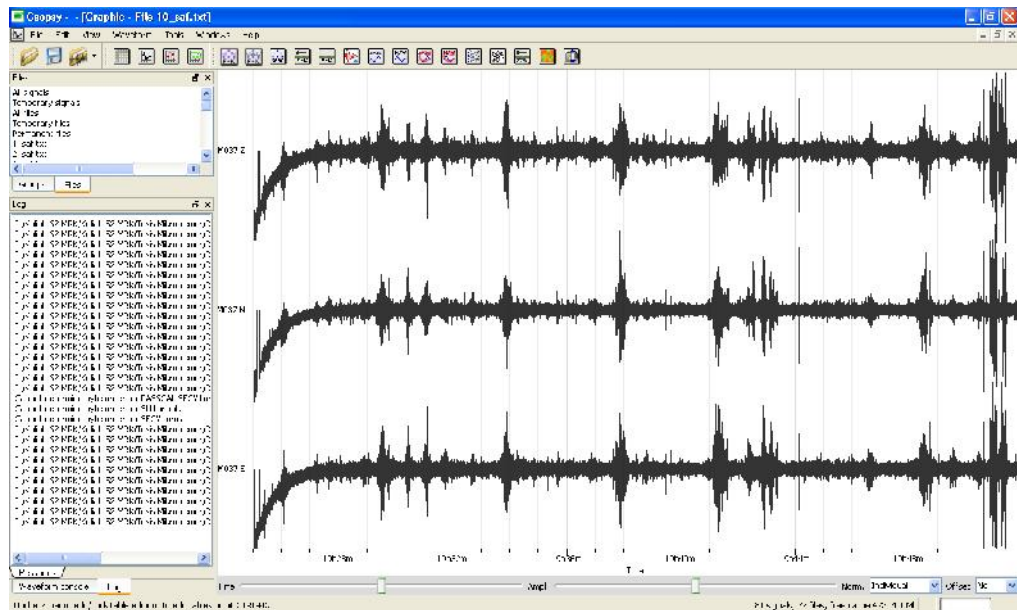
Gambar B.24 Waveform pada lokasi 24



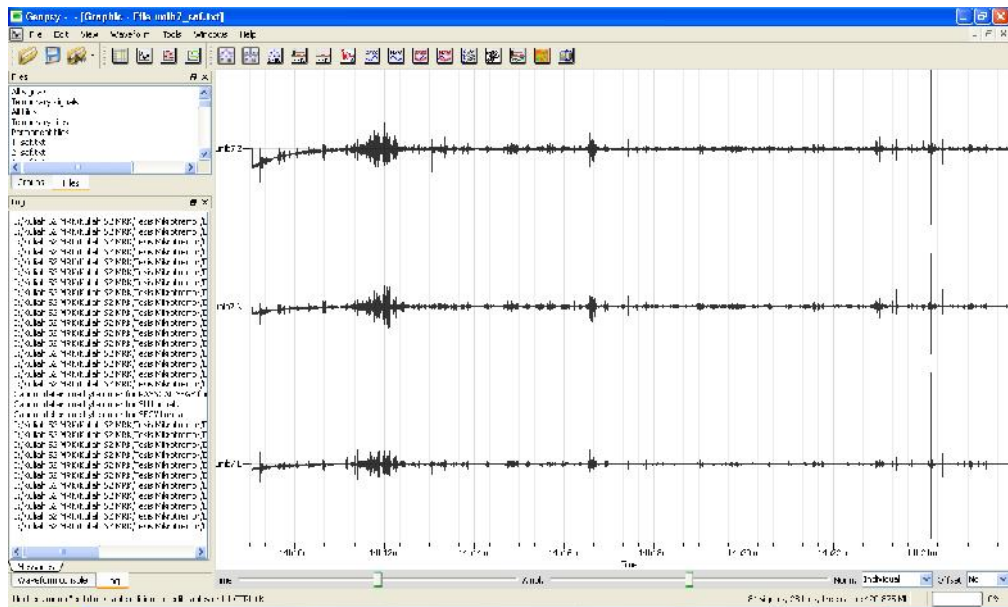
Gambar B.25 Waveform pada lokasi 25



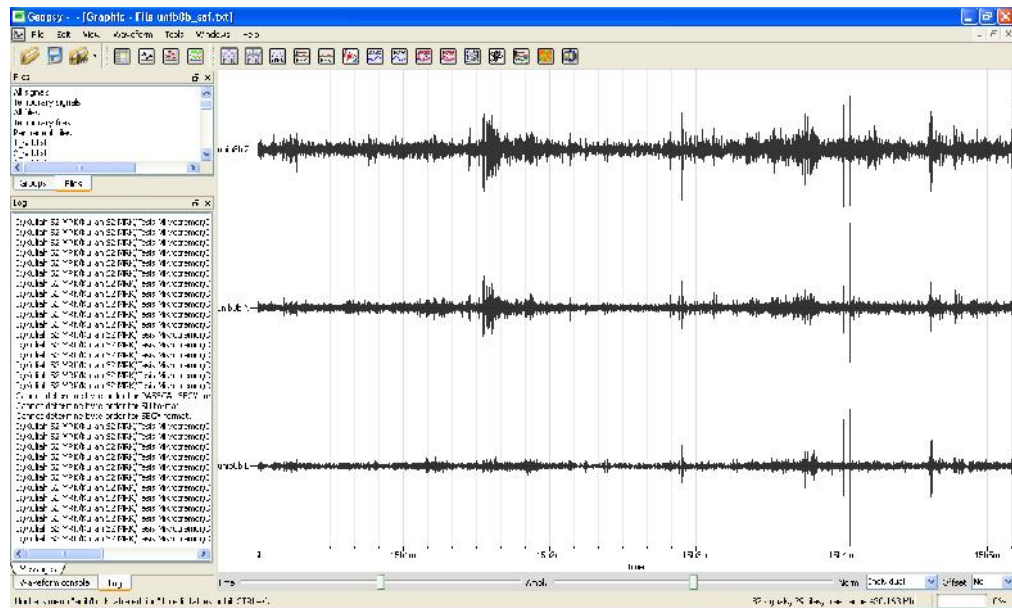
Gambar B.26 Waveform pada lokasi 26



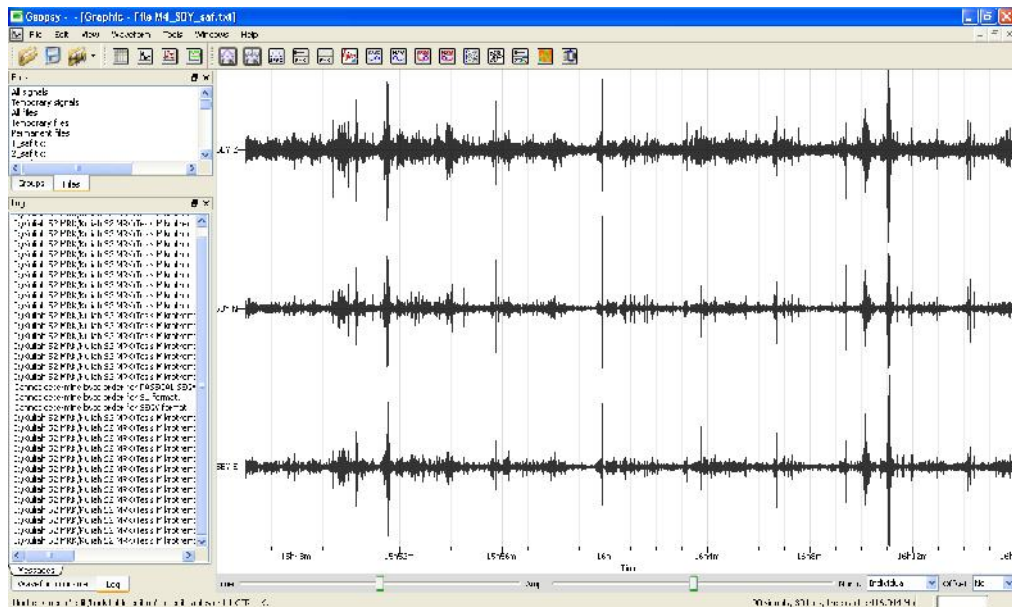
Gambar B.27 Waveform pada lokasi 27



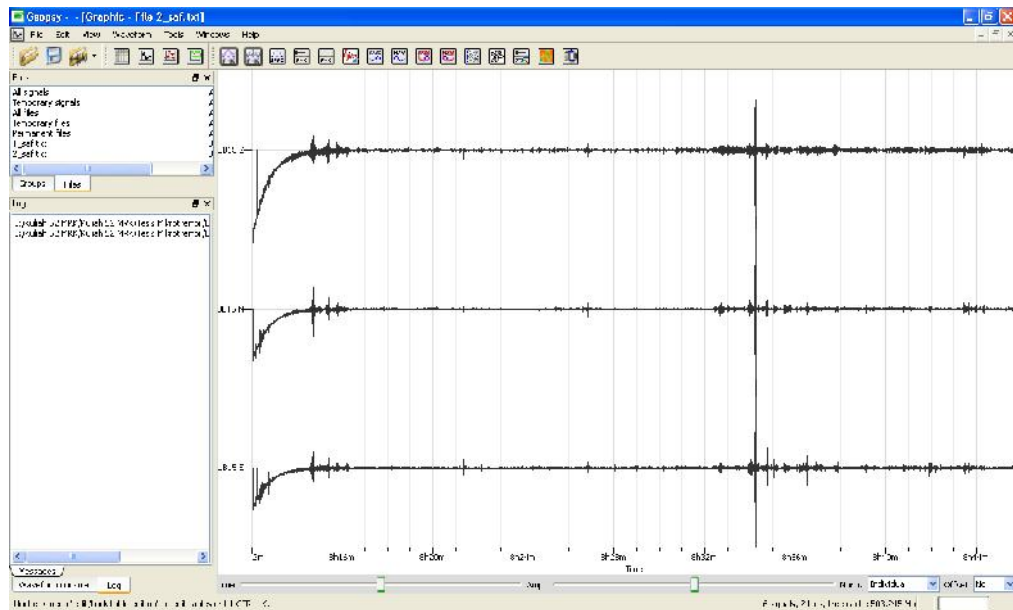
Gambar B.28 Waveform pada lokasi 28



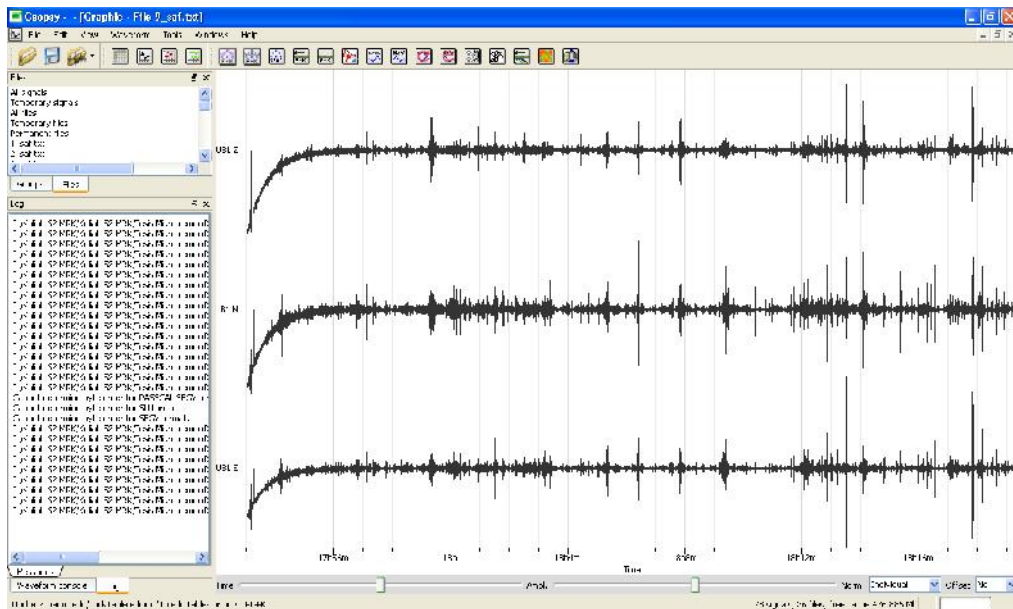
Gambar B.29 Waveform pada lokasi 29



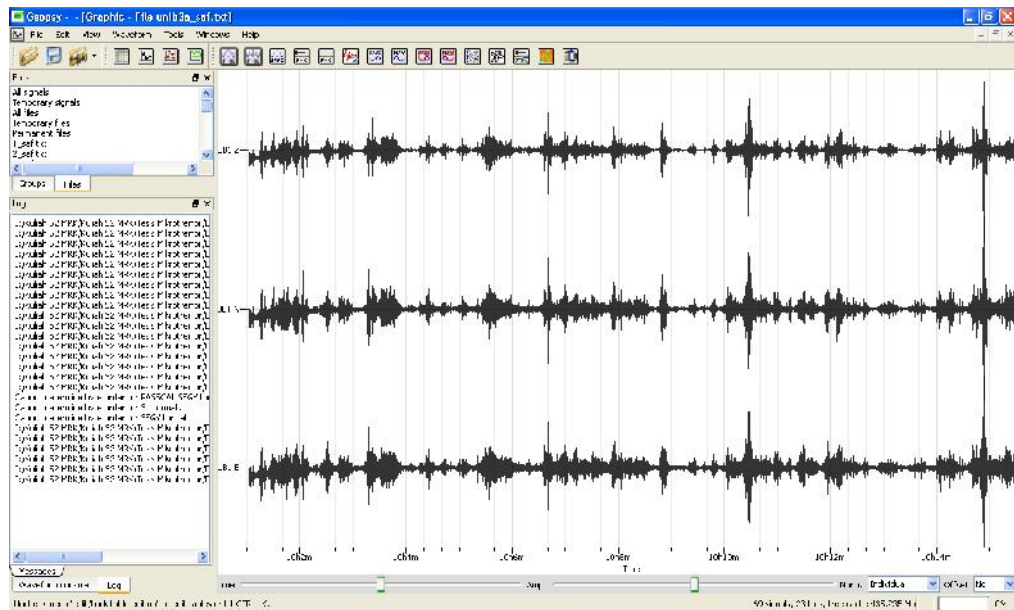
Gambar B.30 Waveform pada lokasi 30



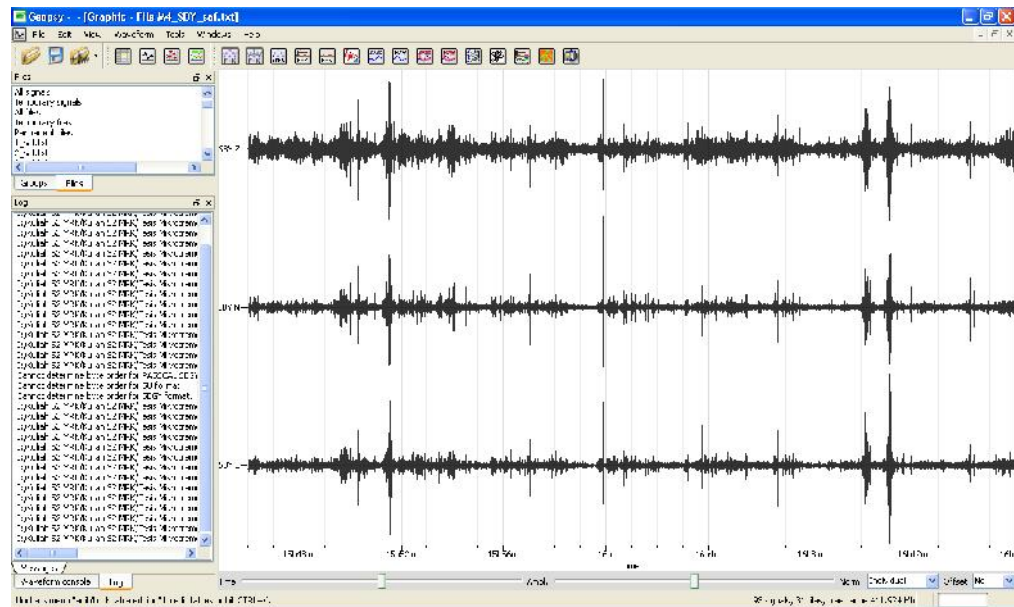
Gambar B.31 Waveform pada lokasi 31



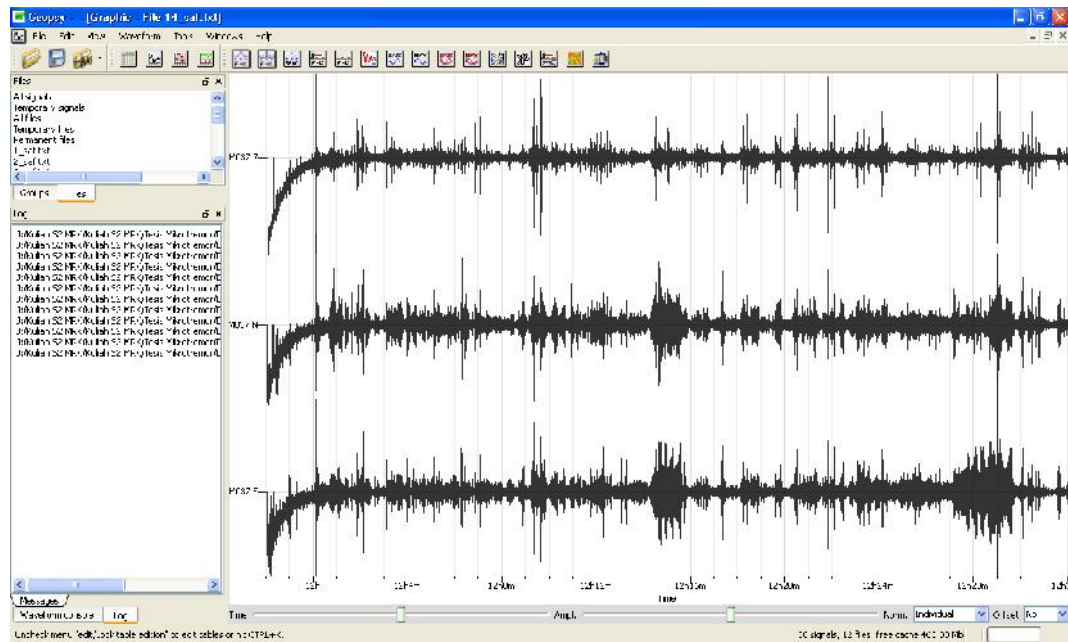
Gambar B.32 Waveform pada lokasi 32



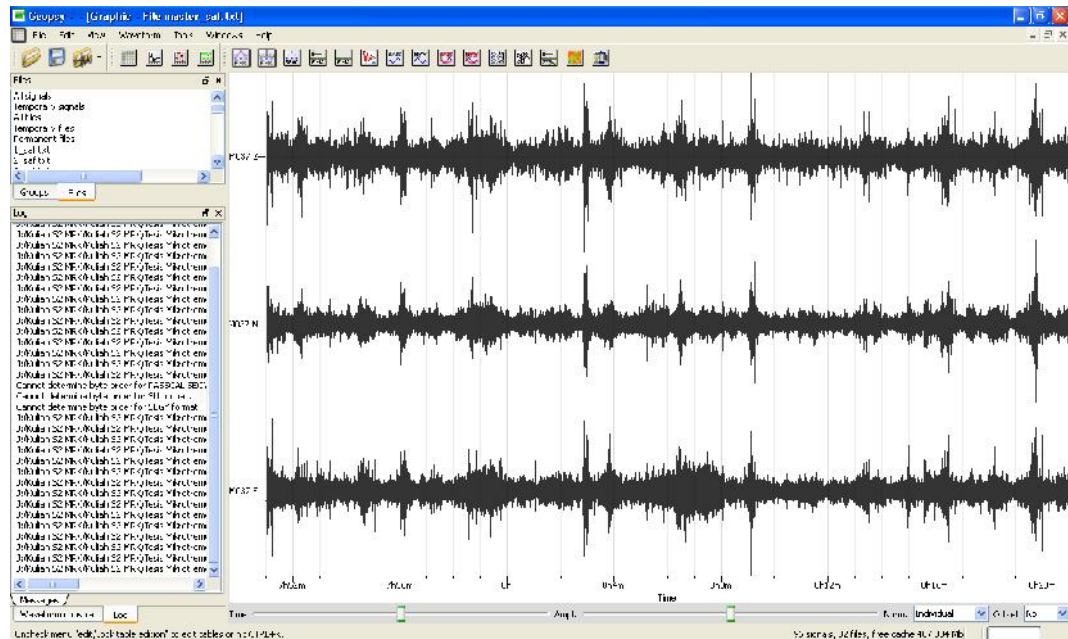
Gambar B.33 Waveform pada lokasi 33



Gambar B.34 Waveform pada lokasi 34



Gambar B.35 Waveform pada lokasi 35



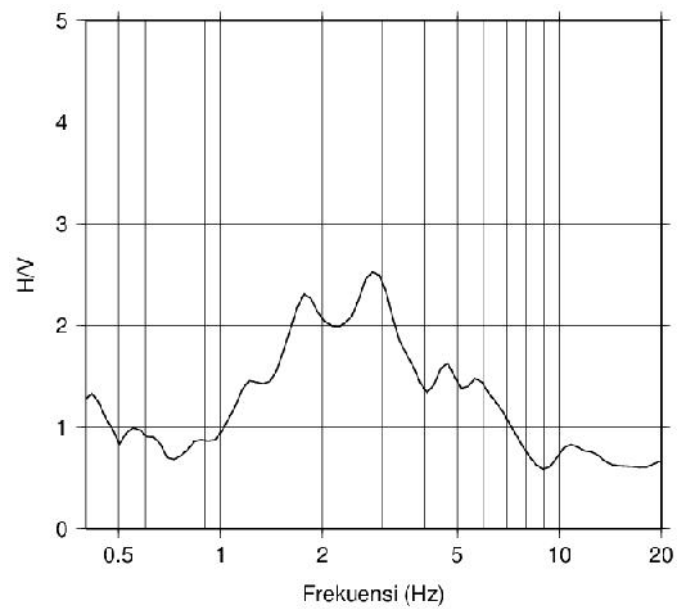
Gambar B.36 Waveform pada lokasi 36



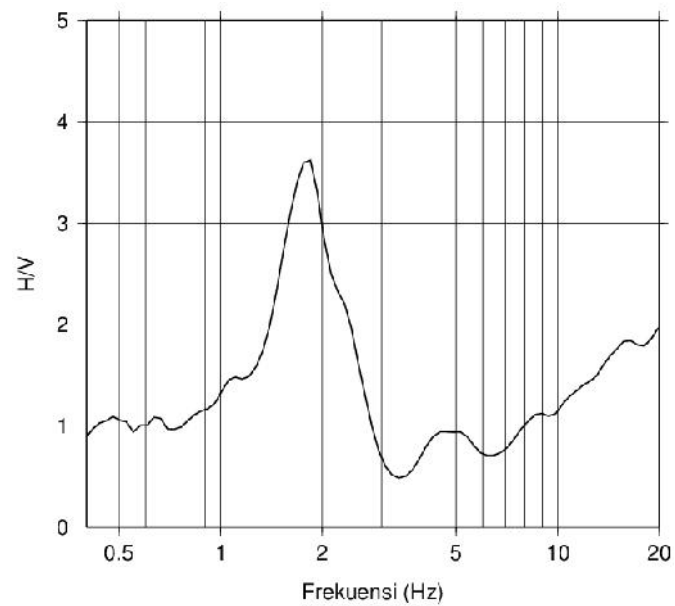
Gambar B.37 *Waveform* pada lokasi 37

LAMPIRAN C

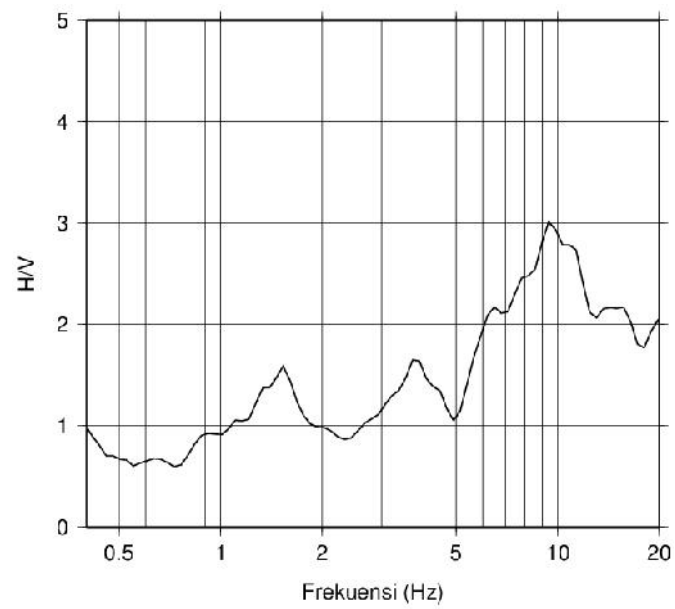
KURVA H/V



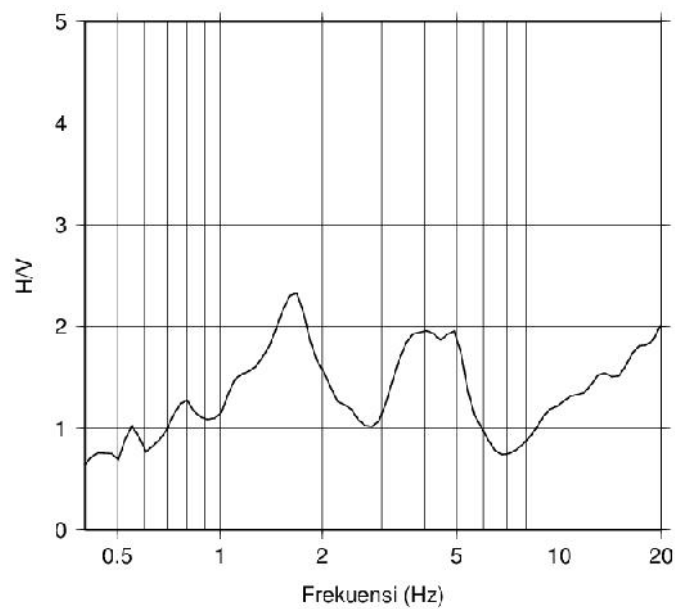
Gambar C.1 Kurva H/V lokasi 1



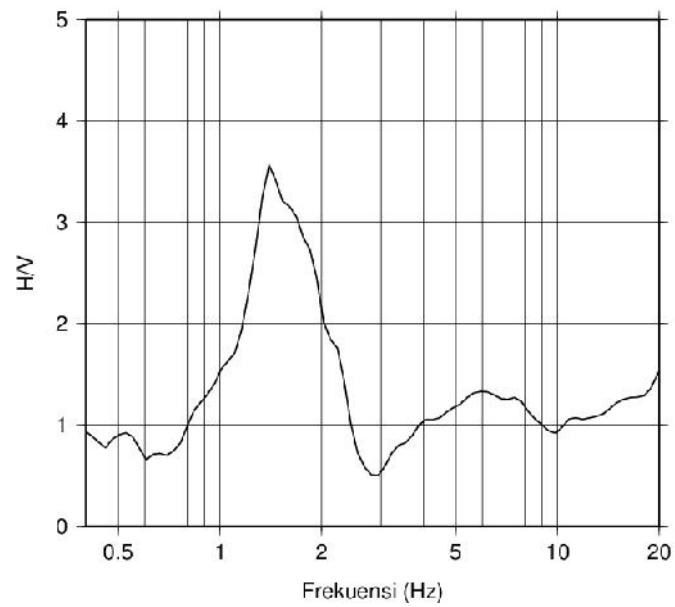
Gambar C.2 Kurva H/V lokasi 2



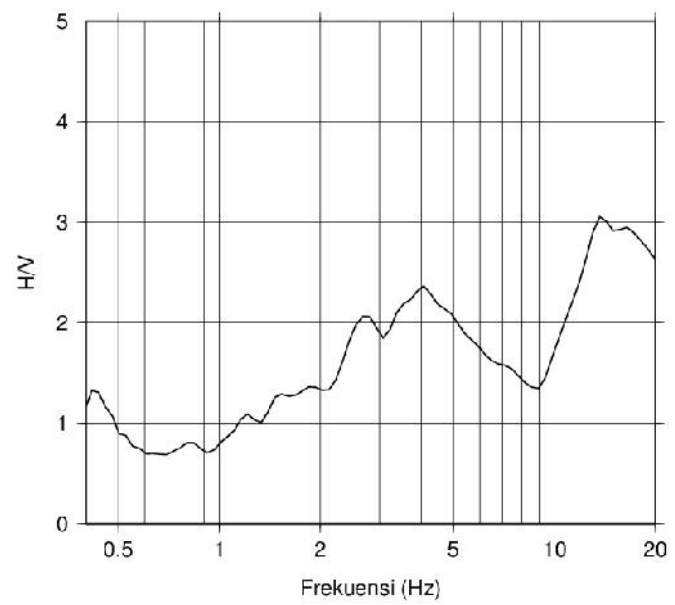
Gambar C.3 Kurva H/V lokasi 3



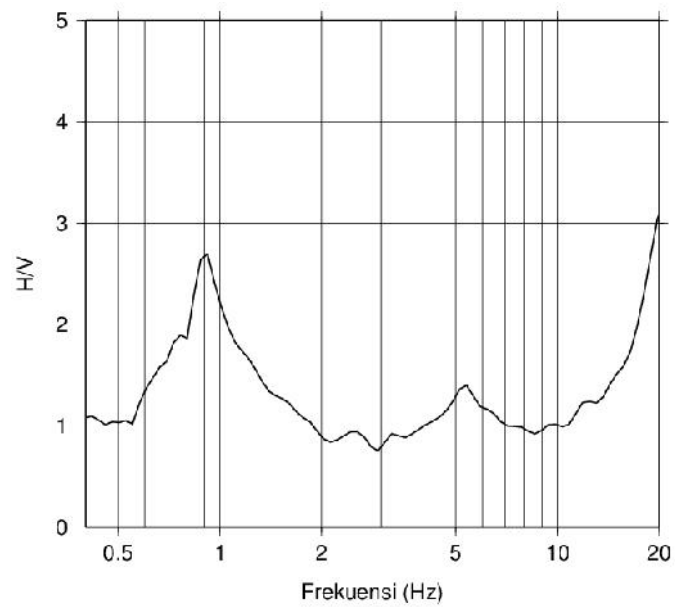
Gambar C.4 Kurva H/V lokasi 4



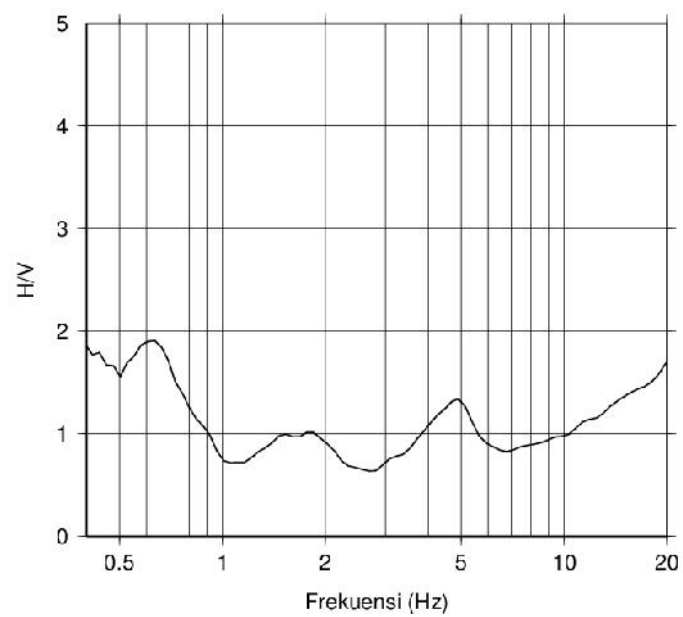
Gambar C.5 Kurva H/V lokasi 5



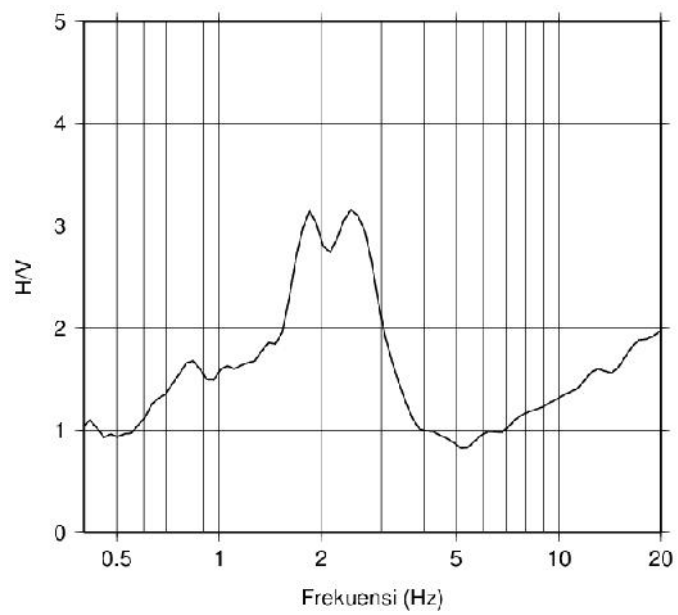
Gambar C.6 Kurva H/V lokasi 6



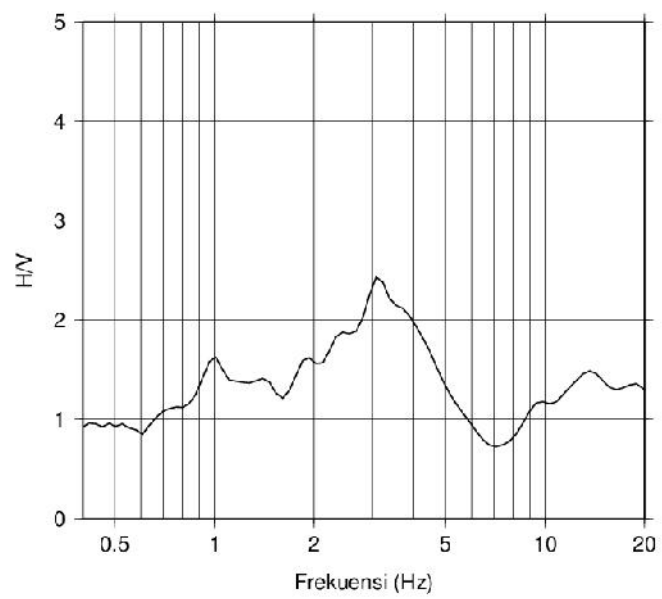
Gambar C.7 Kurva H/V lokasi 7



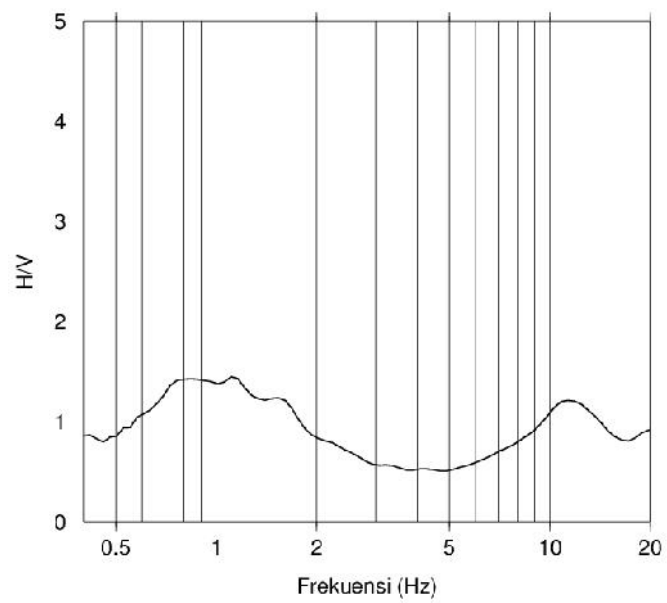
Gambar C.8 Kurva H/V lokasi 8



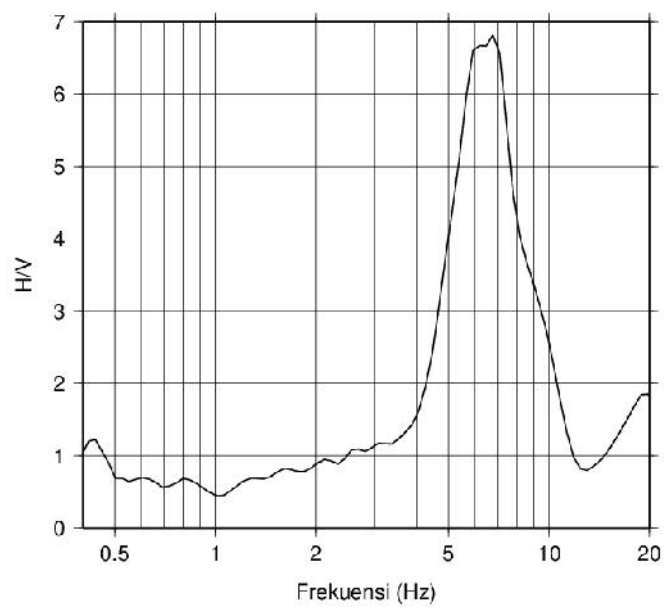
Gambar C.9 Kurva H/V lokasi 9



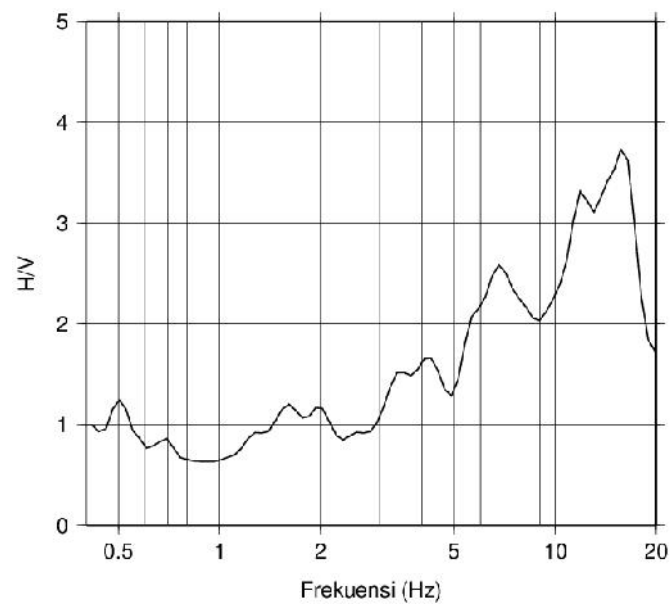
Gambar C.10 Kurva H/V lokasi 10



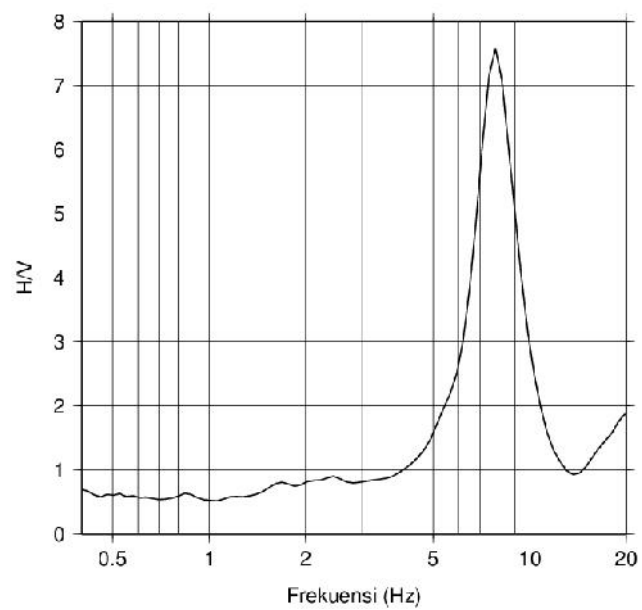
Gambar C.11 Kurva H/V lokasi 11



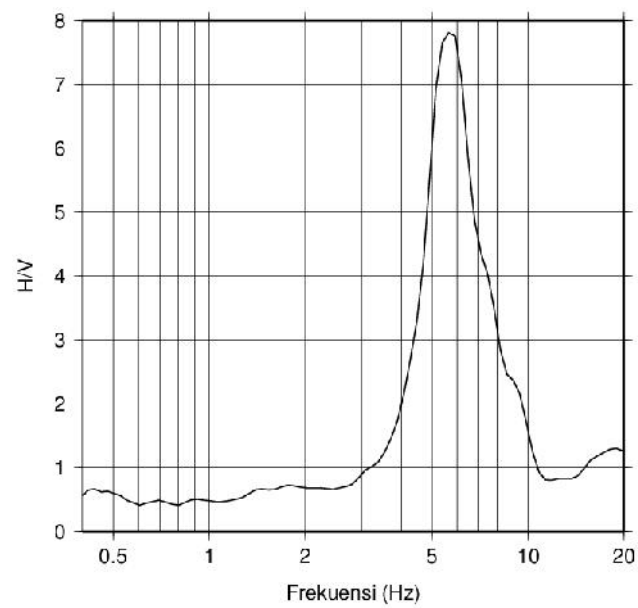
Gambar C.12 Kurva H/V lokasi 12



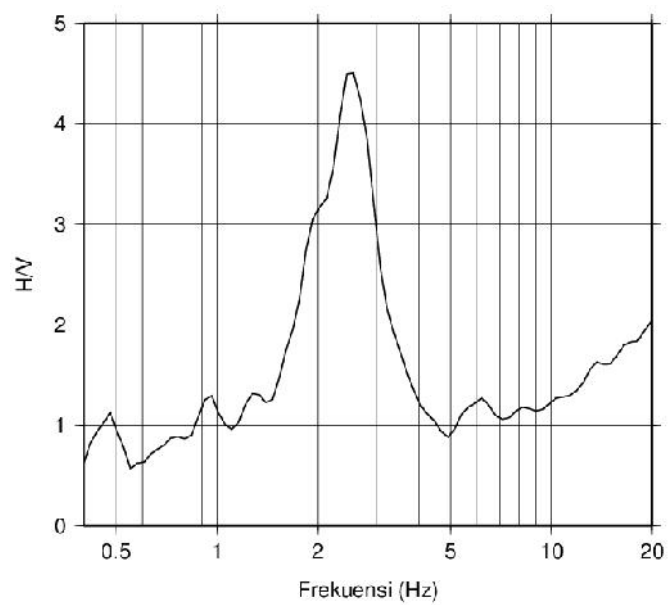
Gambar C.13 Kurva H/V lokasi 13



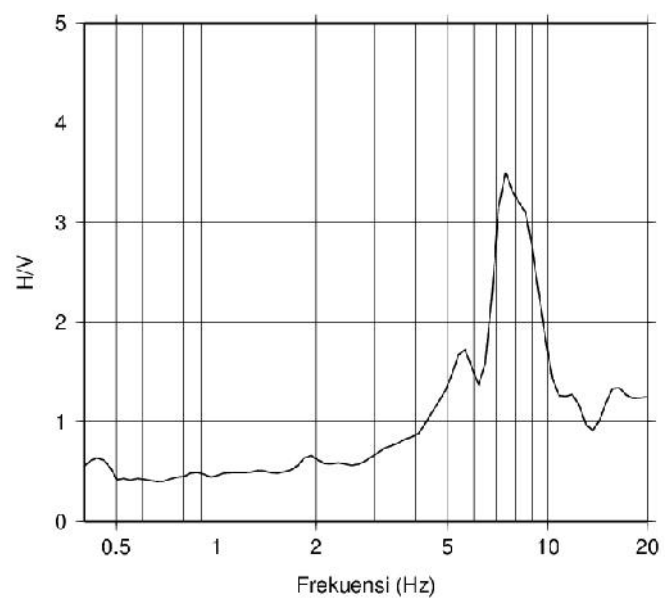
Gambar C.14 Kurva H/V lokasi 14



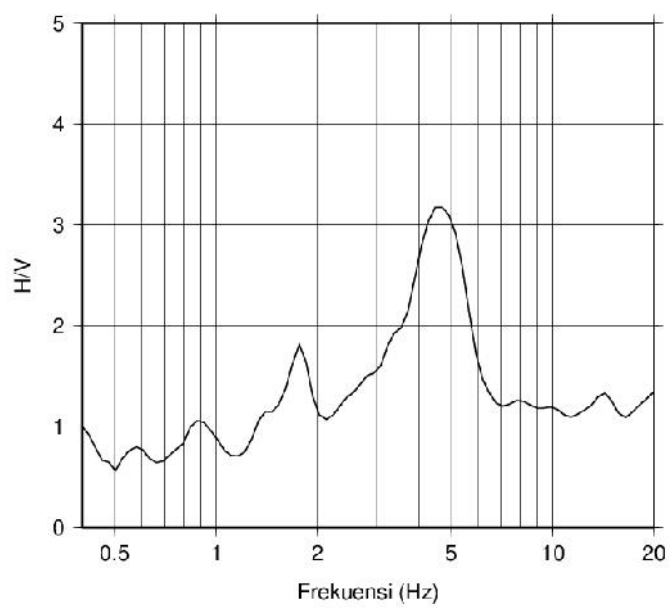
Gambar C.15 Kurva H/V lokasi 15



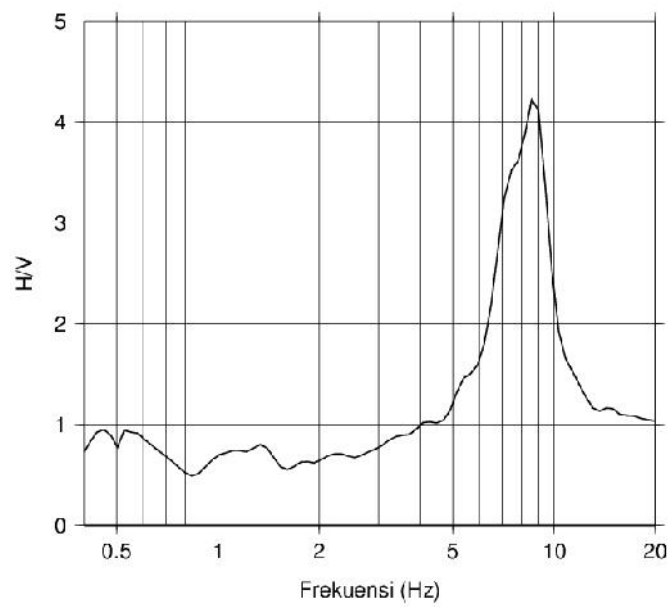
Gambar C.16 Kurva H/V lokasi 16



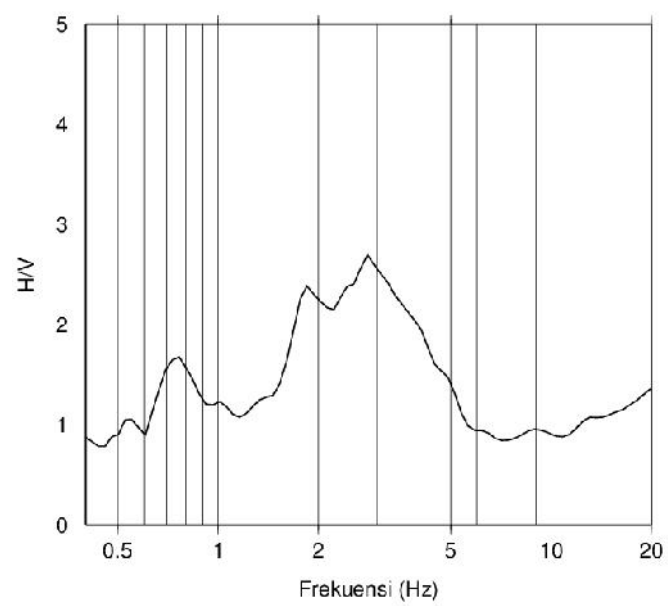
Gambar C.17 Kurva H/V lokasi 17



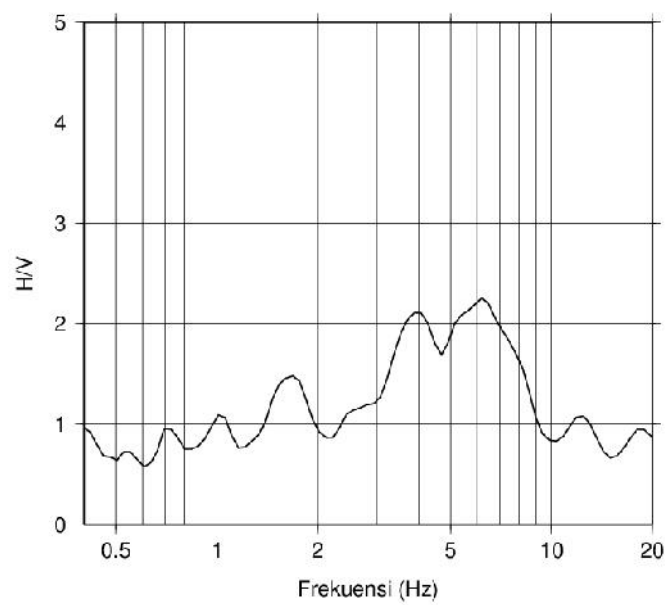
Gambar C.18 Kurva H/V lokasi 18



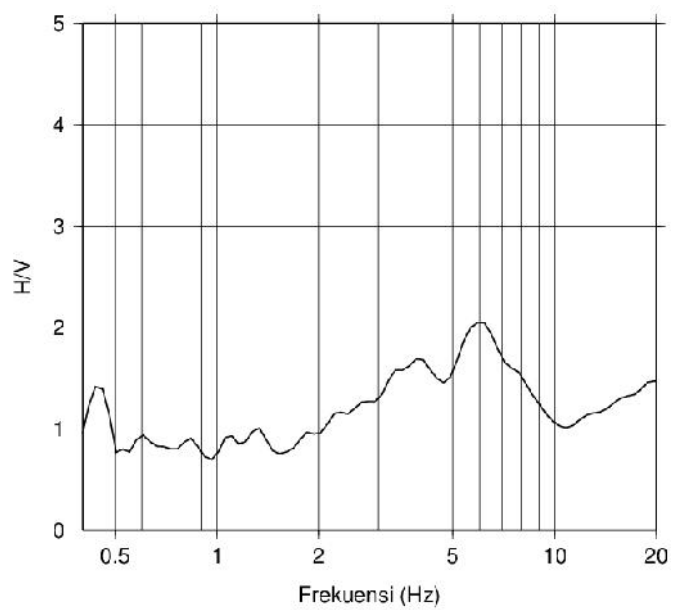
Gambar C.19 Kurva H/V lokasi 19



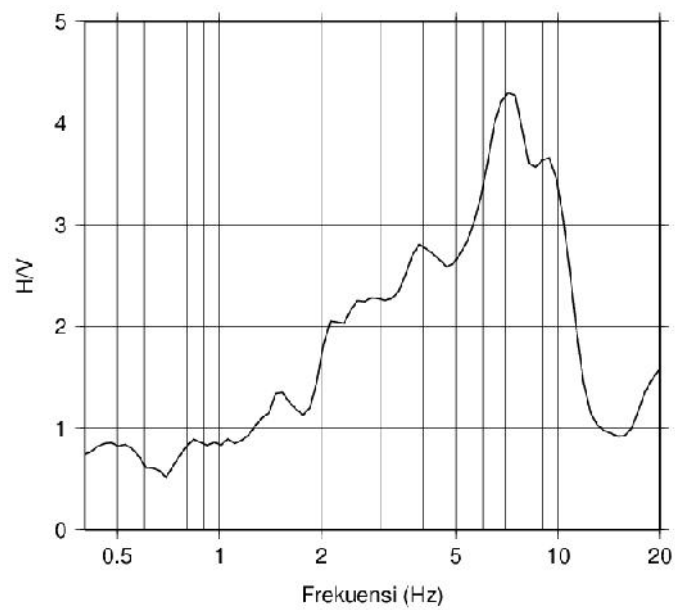
Gambar C.20 Kurva H/V lokasi 20



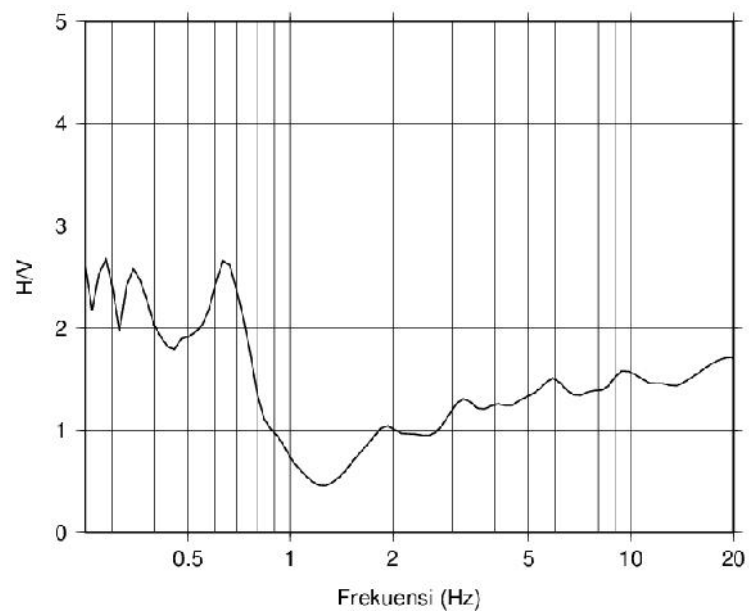
Gambar C.21 Kurva H/V lokasi 21



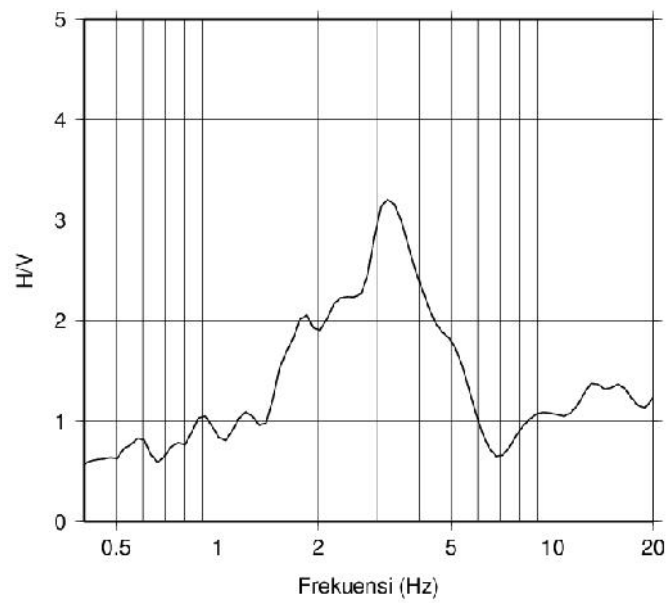
Gambar C.22 Kurva H/V lokasi 22



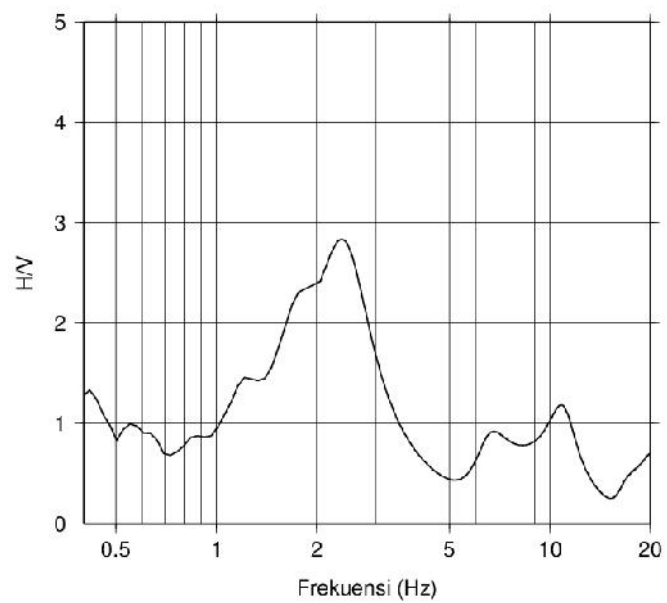
Gambar C.23 Kurva H/V lokasi 23



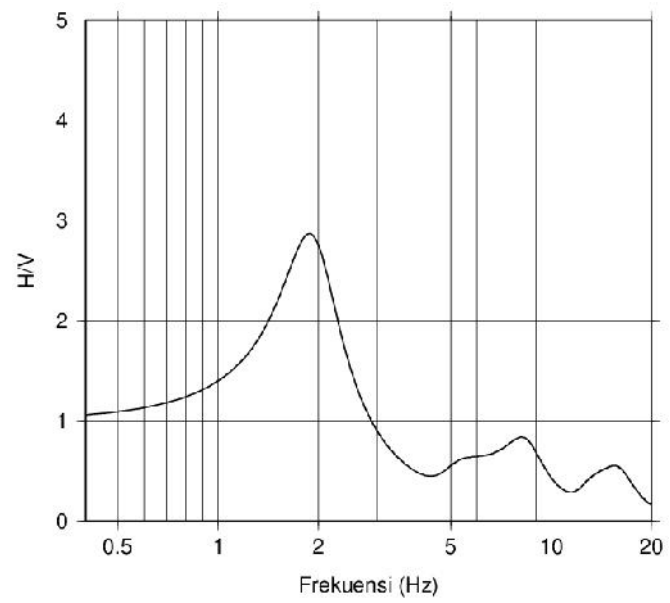
Gambar C.24 Kurva H/V lokasi 24



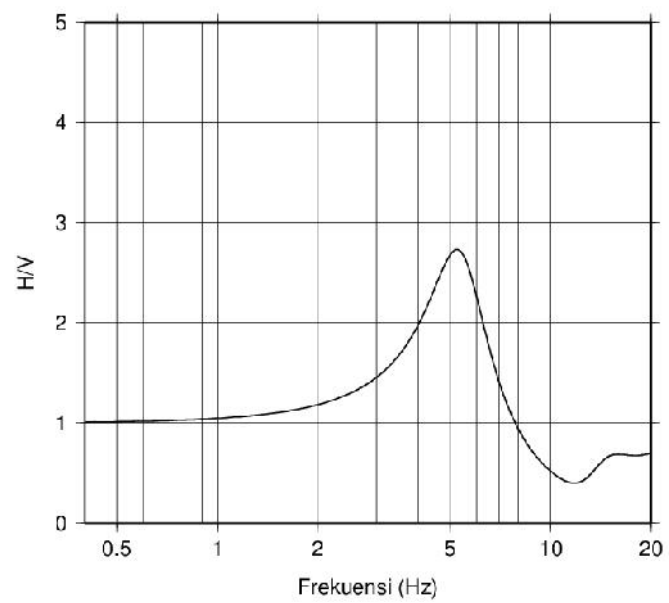
Gambar C.25 Kurva H/V lokasi 25



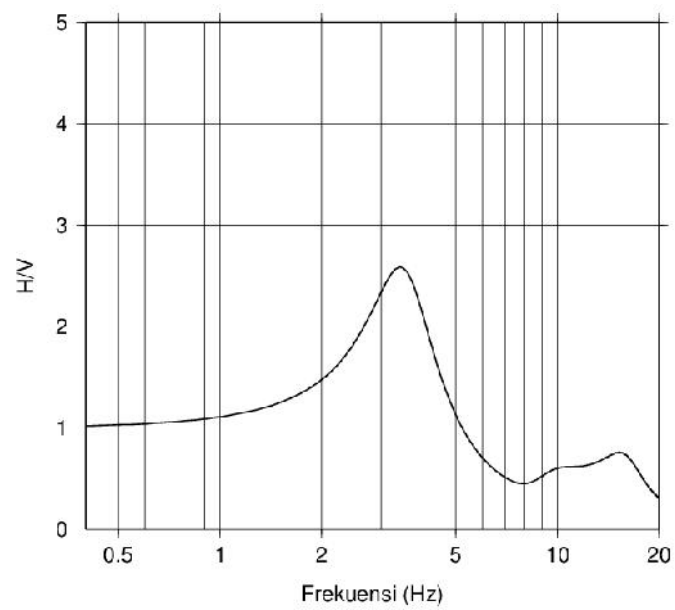
Gambar C.26 Kurva H/V lokasi 26



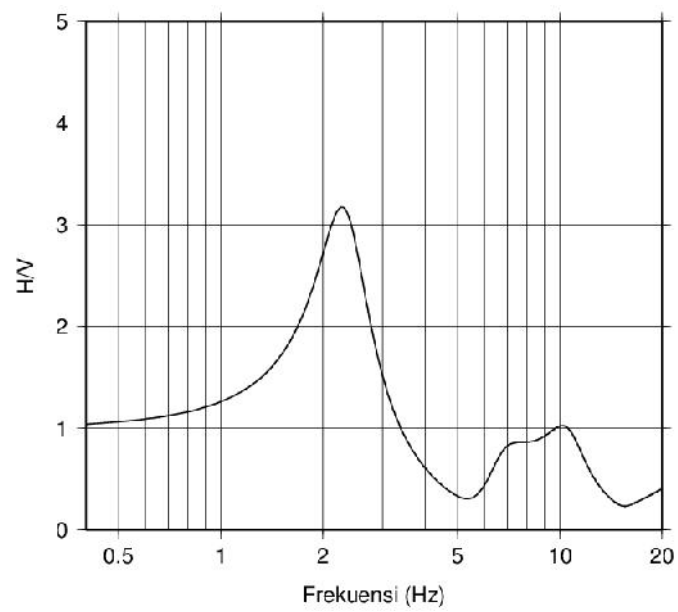
Gambar C.27 Kurva H/V lokasi 27



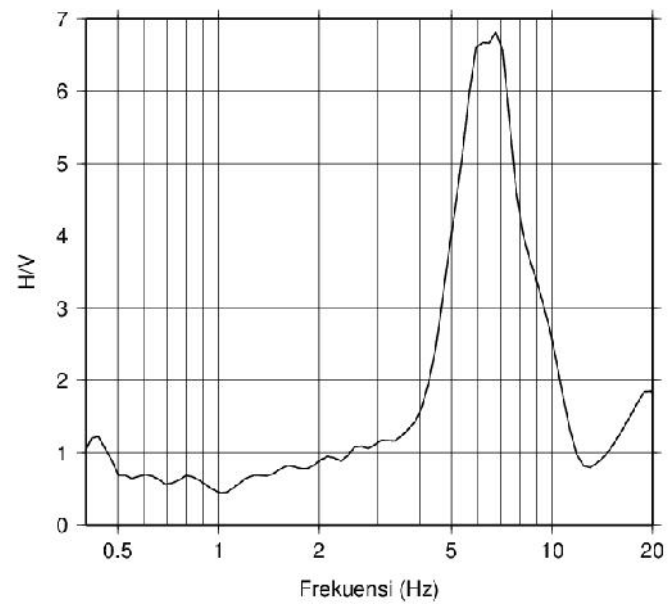
Gambar C.28 Kurva H/V lokasi 28



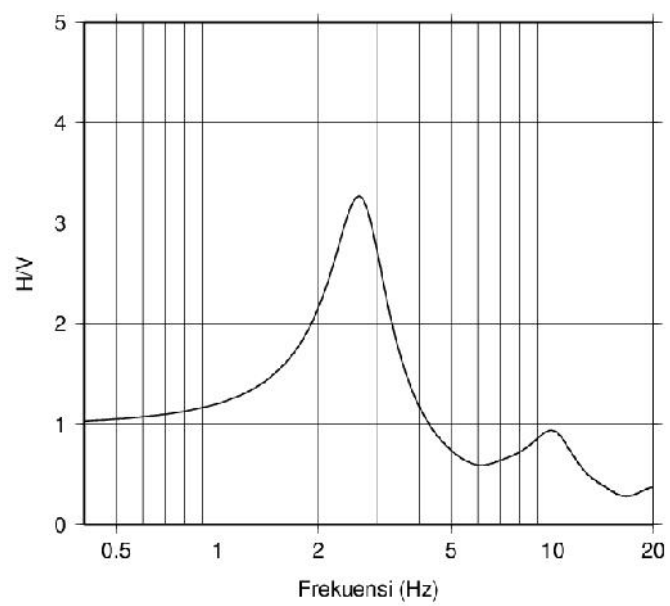
Gambar C.29 Kurva H/V lokasi 29



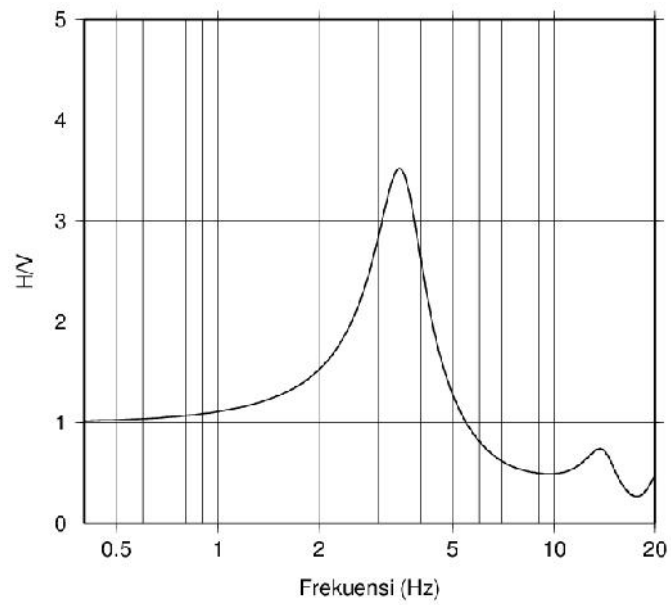
Gambar C.30 Kurva H/V lokasi 30



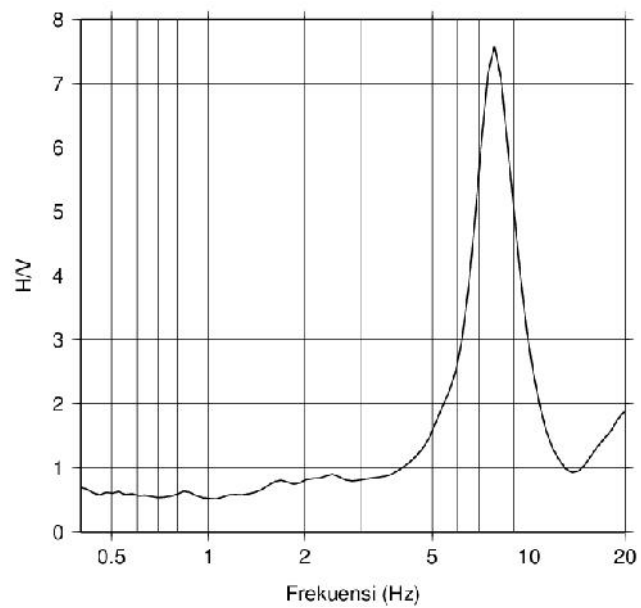
Gambar C.31 Kurva H/V lokasi 31



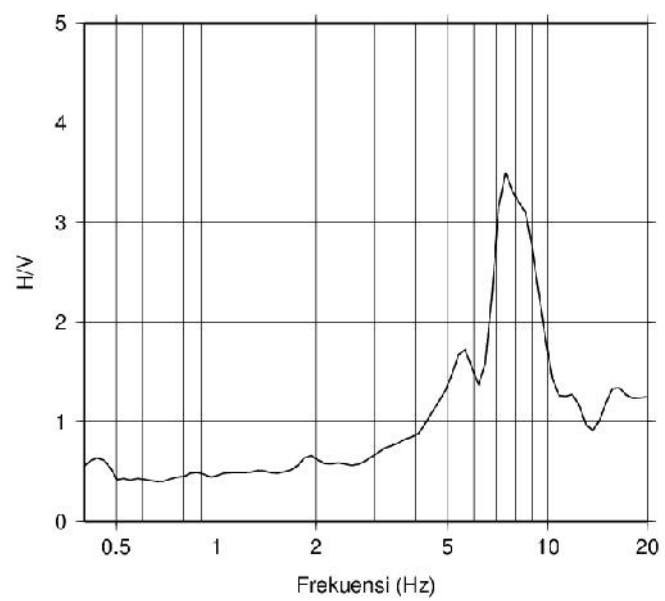
Gambar C.32 Kurva H/V lokasi 32



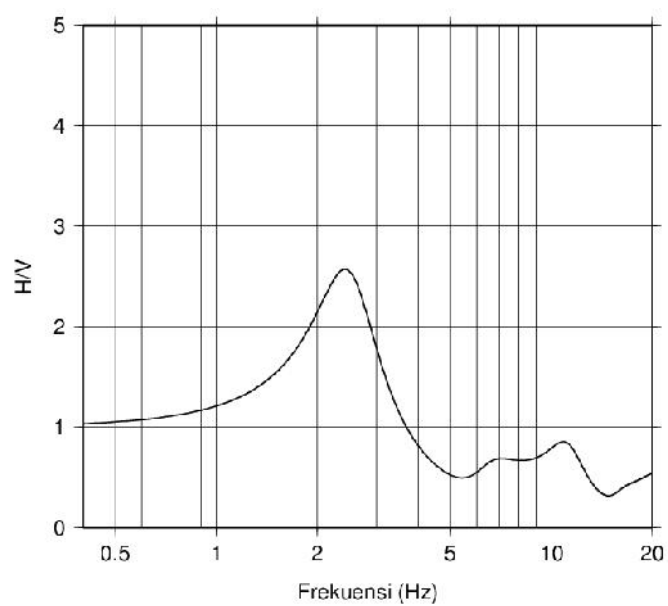
Gambar C.33 Kurva H/V lokasi 33



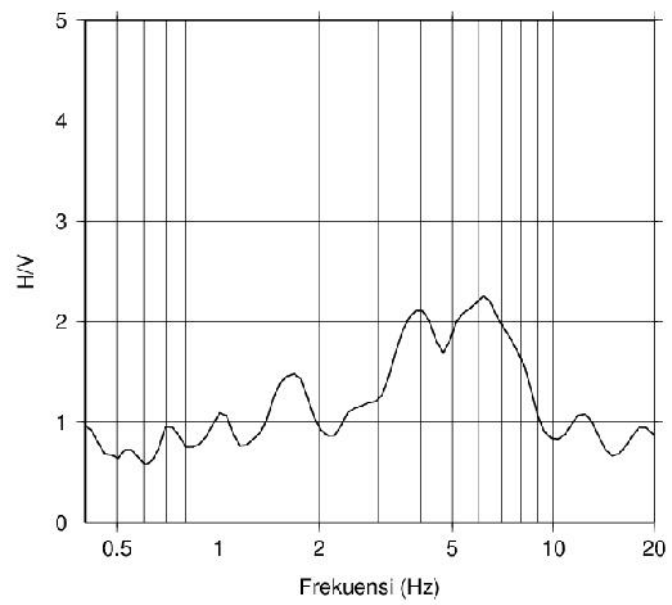
Gambar C.34 Kurva H/V lokasi 34



Gambar C.35 Kurva H/V lokasi 35

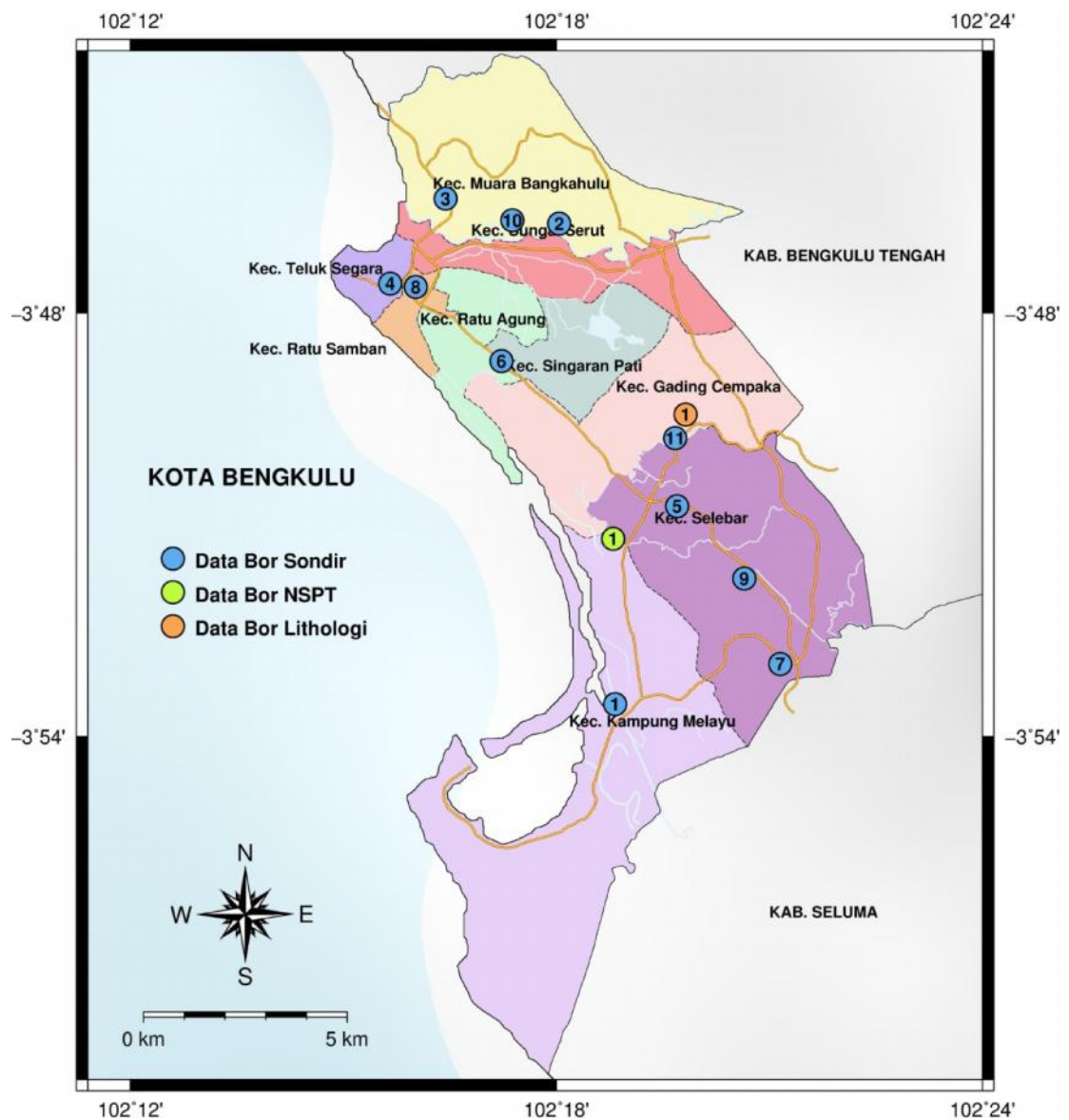


Gambar C.36 Kurva H/V lokasi 36

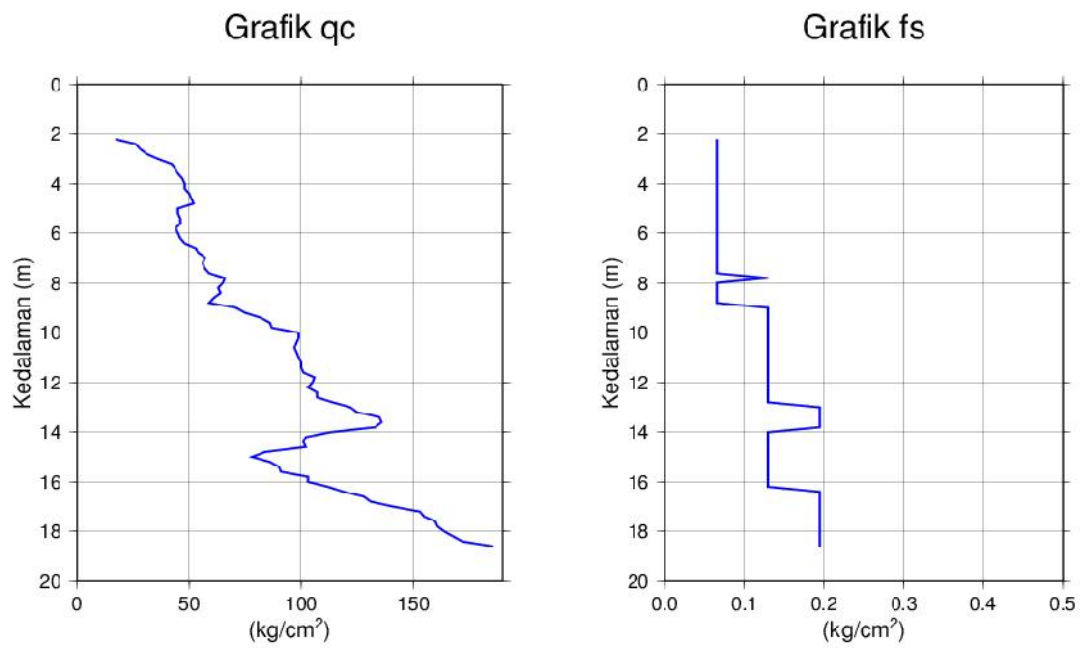


Gambar C.37 Kurva H/V lokasi 37

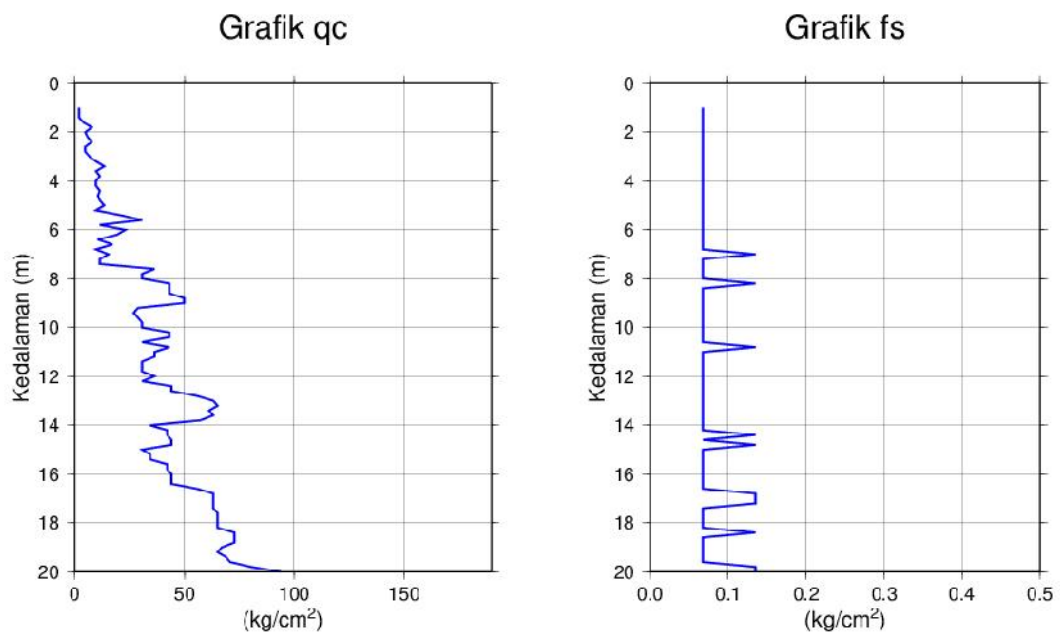
LAMPIRAN D
DATA BOR



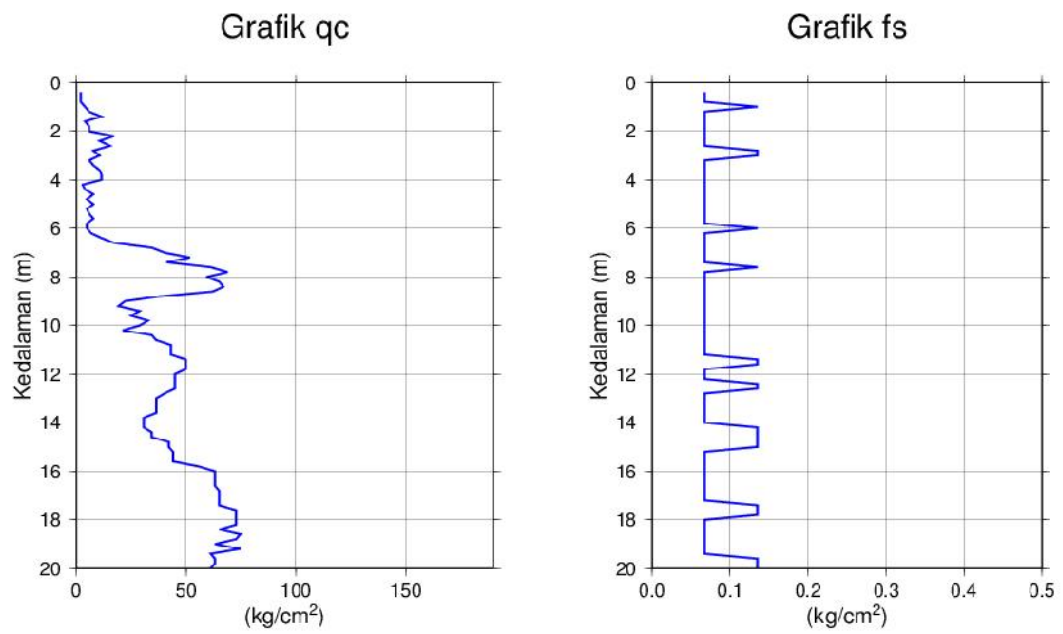
Gambar D.1 Peta lokasi data bor



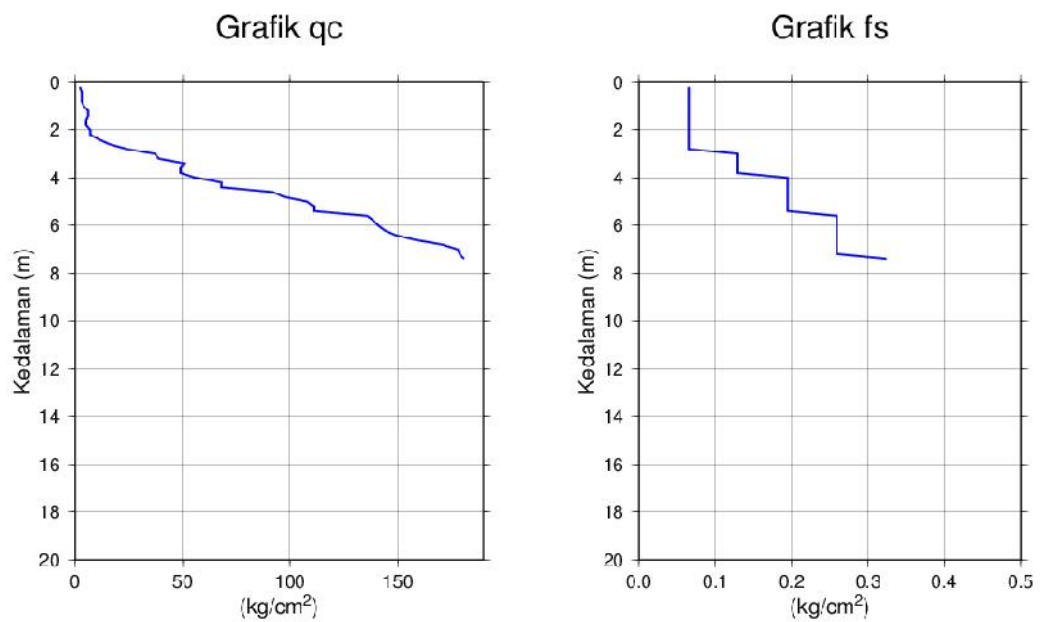
Gambar D.2 Data sondir lokasi 1



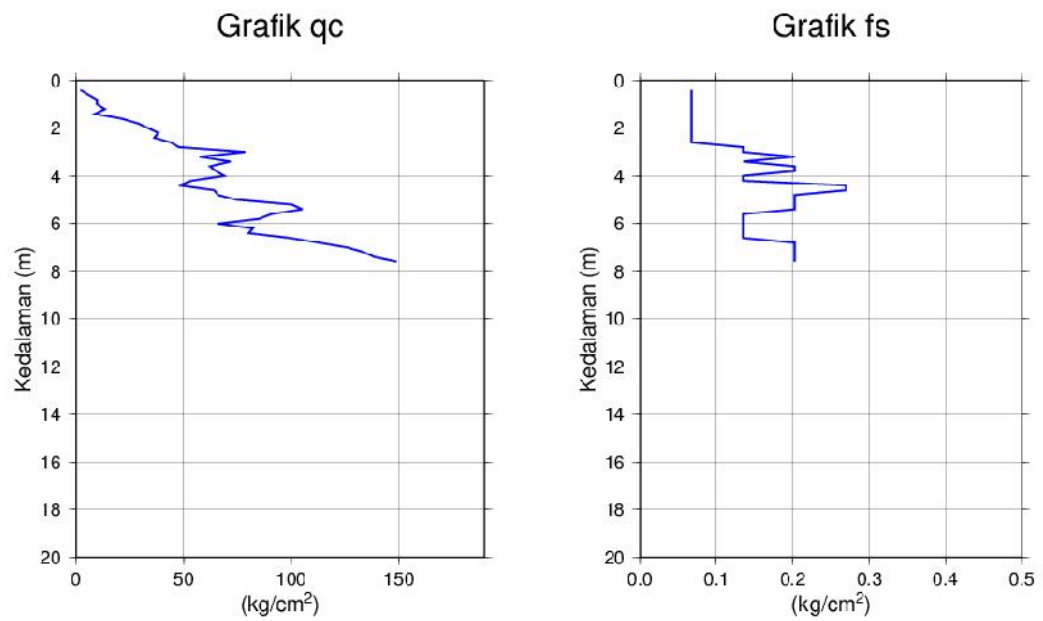
Gambar D.3 Data sondir lokasi 2



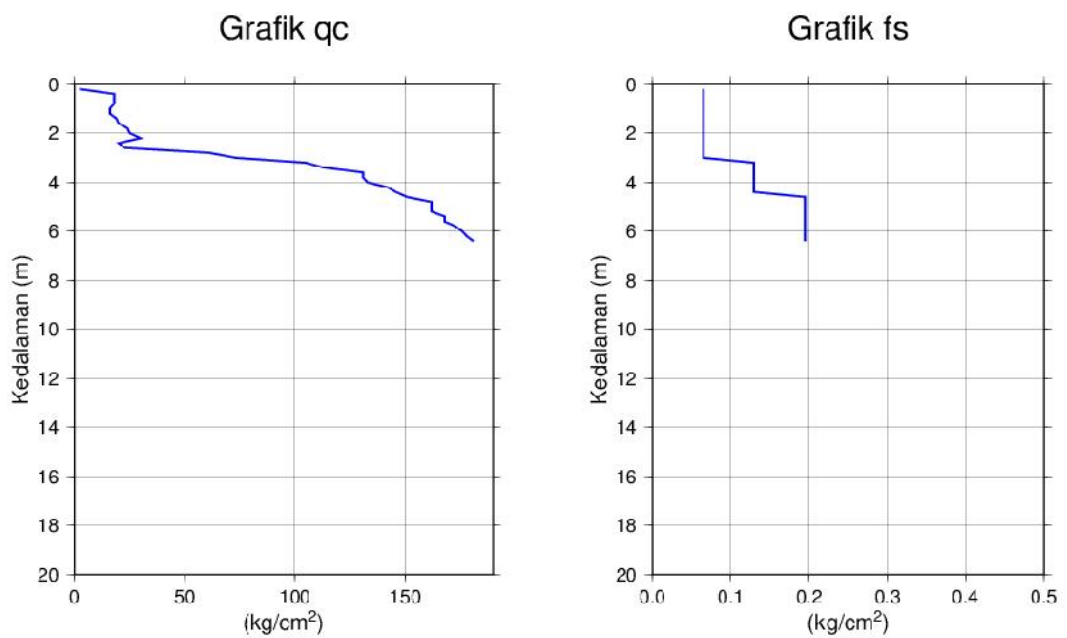
Gambar D.4 Data sondir lokasi 3



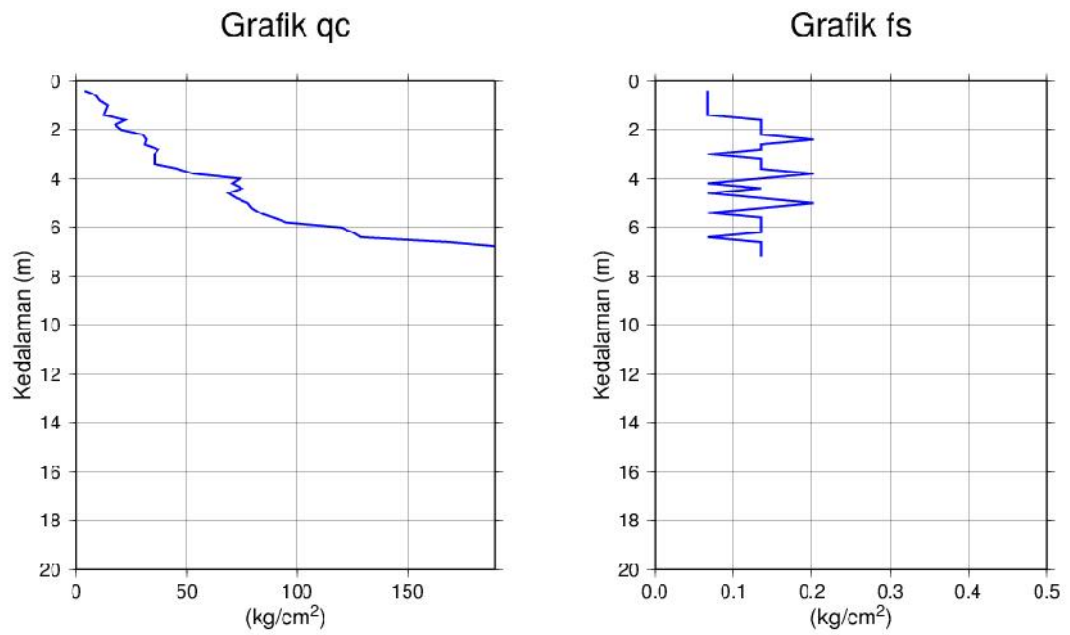
Gambar D.5 Data sondir lokasi 4



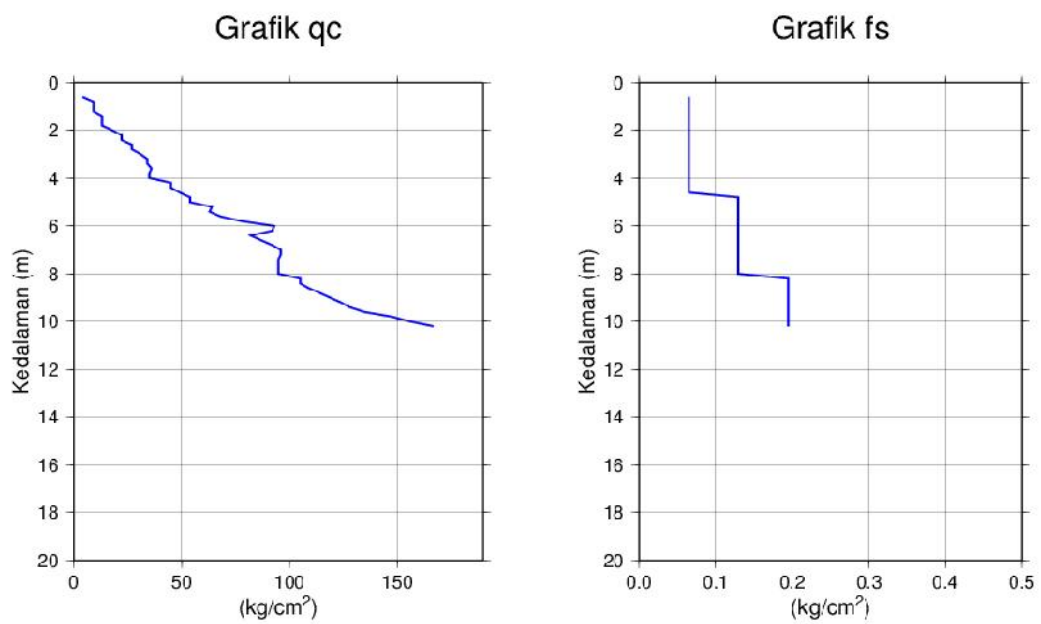
Gambar D.6 Data sondir lokasi 5



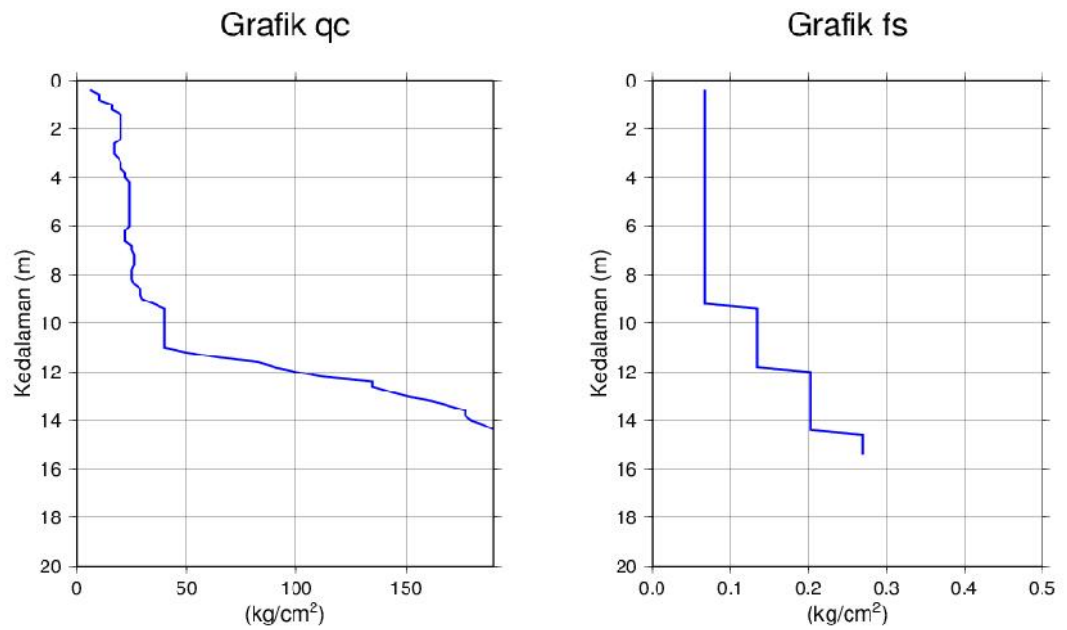
Gambar D.7 Data sondir lokasi 6



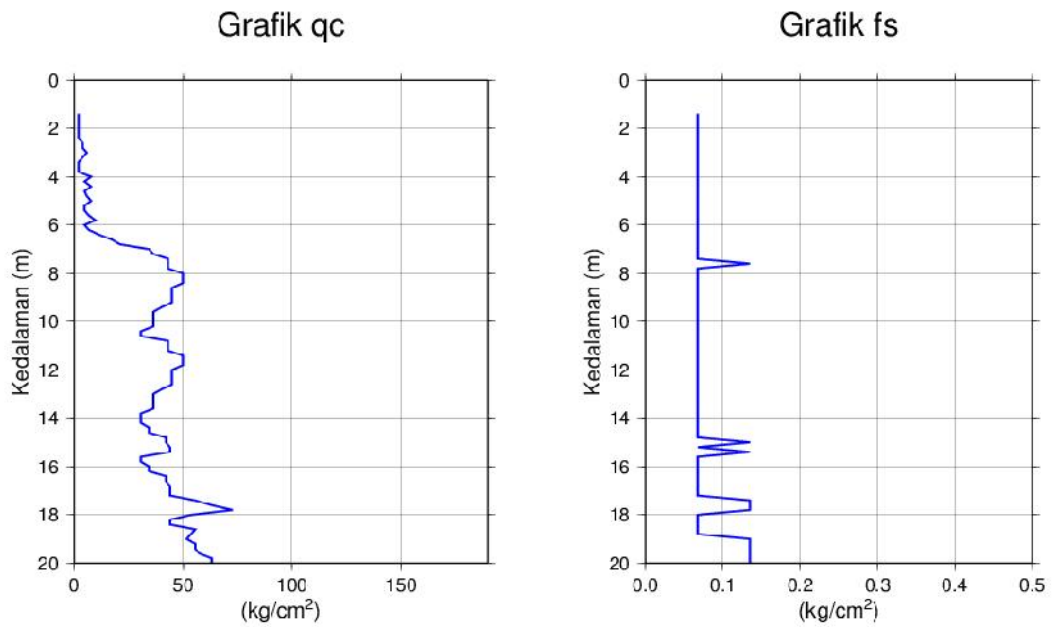
Gambar D.8 Data sondir lokasi 7



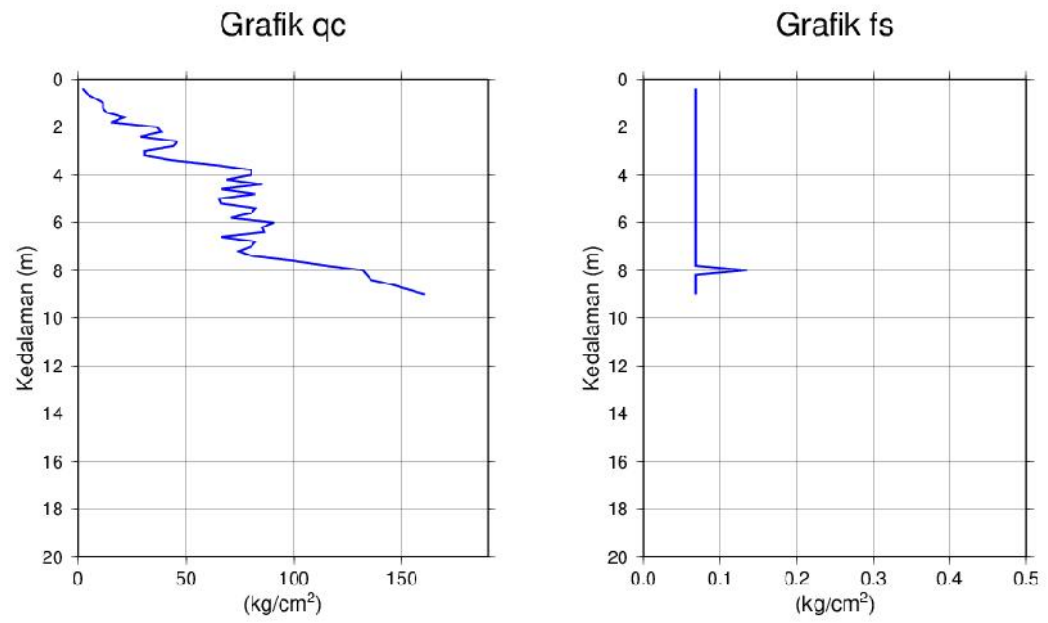
Gambar D.9 Data sondir lokasi 8



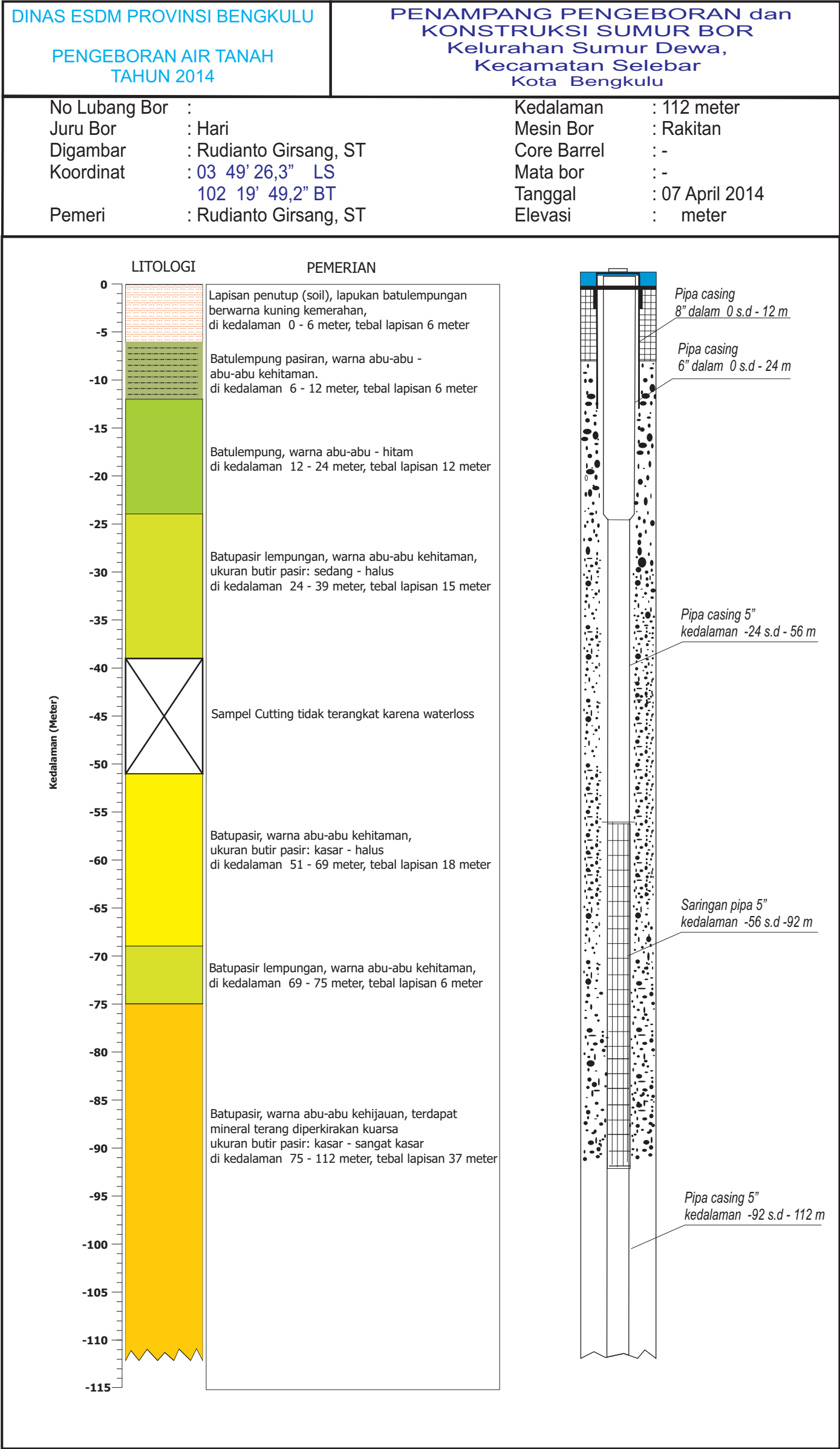
Gambar D.10 Data sondir lokasi 9



Gambar D.11 Data sondir lokasi 10



Gambar D.12 Data sondir lokasi 11



LAMPIRAN E

Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik dan Ground Shear Strain

Data	lat	lon	Fo (Hz)	Ao	Kg	Periode	Rhipo (km)	log α_b	α_b	GSS
1	-3.782	102.330	2.684	2.460	2.255	0.373	133.591	1.942	87.575	0.000200089
2	-3.798	102.327	1.803	3.607	7.214	0.555	132.300	1.949	88.980	0.00065042
3	-3.758	102.316	9.223	2.920	0.925	0.108	133.835	1.941	87.312	8.17913E-05
4	-3.875	102.339	1.641	2.318	3.274	0.609	128.991	1.967	92.702	0.000307506
5	-3.906	102.319	1.495	3.322	7.378	0.669	125.529	1.986	96.786	0.00072357
6	-3.905	102.339	3.963	2.365	1.412	0.252	127.415	1.976	94.537	0.000135208
7	-3.928	102.316	0.927	2.687	7.789	1.079	124.098	1.994	98.534	0.000777586
8	-3.930	102.288	0.583	1.872	6.011	1.714	121.374	2.008	101.962	0.000620958
9	-3.786	102.295	2.204	3.161	4.532	0.454	130.295	1.960	91.215	0.000418832
10	-3.788	102.309	3.115	2.423	1.884	0.321	131.348	1.954	90.033	0.000171885
11	-3.810	102.283	1.041	1.394	1.866	0.961	127.731	1.974	94.166	0.000178017
12	-3.828	102.290	6.298	6.672	7.067	0.159	127.315	1.976	94.655	0.000677804
13	-3.850	102.305	7.226	2.585	0.925	0.138	127.357	1.976	94.605	8.86397E-05
14	-3.850	102.331	7.818	7.572	7.334	0.128	129.687	1.963	91.905	0.000682961
15	-3.829	102.312	5.741	7.791	10.572	0.174	129.134	1.966	92.537	0.000991188
16	-3.853	102.354	2.446	4.492	8.251	0.409	131.588	1.953	89.767	0.000750438
17	-3.826	102.320	7.564	3.723	1.832	0.132	130.061	1.961	91.480	0.000169846
18	-3.808	102.309	4.503	3.177	2.241	0.222	130.128	1.961	91.404	0.000207587
19	-3.785	102.267	8.582	4.225	2.080	0.117	127.879	1.973	93.992	0.000198051
20	-3.775	102.276	2.948	2.598	2.290	0.339	129.274	1.966	92.377	0.000214304
21	-3.756	102.293	6.425	2.211	0.761	0.156	131.984	1.951	89.328	6.88582E-05
22	-3.751	102.273	6.023	2.047	0.696	0.166	130.544	1.959	90.934	6.40917E-05
23	-3.786	102.252	7.807	4.299	2.367	0.128	126.544	1.980	95.568	0.000229204
24	-3.922	102.273	0.327	2.680	21.986	3.062	120.456	2.013	103.148	0.002297744
25	-3.876	102.318	3.395	3.146	2.915	0.295	127.033	1.978	94.987	0.000280535

26	-3.943	102.287	2.380	4.860	9.926	0.420	120.665	2.012	102.876	0.001034648
27	-3.755	102.283	1.870	3.526	6.648	0.535	131.204	1.955	90.195	0.000607555
28	-3.733	102.285	5.230	7.337	10.293	0.191	132.861	1.946	88.367	0.0009216
29	-3.872	102.360	3.430	5.248	8.029	0.292	131.123	1.956	90.285	0.000734462
30	-3.943	102.379	2.290	2.378	2.469	0.437	129.286	1.966	92.363	0.000231032
31	-3.901	102.376	2.800	2.085	1.552	0.357	131.104	1.956	90.306	0.000142034
32	-3.792	102.356	2.810	3.270	3.804	0.356	135.252	1.934	85.803	0.00033072
33	-3.773	102.388	3.460	3.522	3.586	0.289	139.336	1.912	81.616	0.000296501
34	-3.753	102.347	3.010	2.149	1.535	0.332	136.825	1.925	84.162	0.000130871
35	-3.746	102.325	6.000	4.005	2.673	0.167	135.399	1.933	85.648	0.000231945
36	-3.865	102.312	2.410	2.573	2.746	0.415	127.115	1.977	94.890	0.000264008
37	-3.857	102.335	3.040	2.723	2.439	0.329	129.678	1.963	91.915	0.000227115
38	-3.756	102.300	5.509	2.901	1.528	0.182	132.582	1.948	88.672	0.000137244
39	-3.793	102.311	2.749	2.638	2.532	0.364	131.239	1.955	90.155	0.000231294
40	-3.793	102.272	7.863	5.281	3.547	0.127	127.852	1.973	94.024	0.000337891
41	-3.821	102.284	8.550	5.026	2.954	0.117	127.200	1.977	94.790	0.000283748
42	-3.823	102.315	6.226	6.366	6.509	0.161	129.822	1.963	91.752	0.000605115
43	-3.828	102.346	6.464	3.213	1.597	0.155	132.278	1.949	89.004	0.000144041
44	-3.789	102.263	6.956	4.778	3.282	0.144	127.260	1.976	94.720	0.00031501
45	-3.760	102.262	0.802	4.769	28.349	1.247	129.032	1.967	92.655	0.002661329
46	-3.783	102.261	8.955	5.840	3.808	0.112	127.495	1.975	94.442	0.000364428
47	-3.807	102.264	6.601	7.391	8.276	0.151	126.239	1.982	95.932	0.000804392
48	-3.759	102.273	0.612	1.567	4.013	1.635	130.060	1.961	91.481	0.000371932
49	-3.832	102.283	3.304	5.299	8.497	0.303	126.387	1.981	95.755	0.000824401
50	-3.907	102.306	1.193	5.543	25.749	0.838	124.243	1.993	98.355	0.002566047
51	-3.940	102.279	0.353	3.099	27.187	2.831	120.013	2.016	103.726	0.002857231
52	-3.859	102.324	4.988	8.755	15.367	0.200	128.528	1.970	93.237	0.001451746

LAMPIRAN F
PERHITUNGAN PGA KANAI

Data	lat	lon	Fo (Hz)	Tg	Δ	$A=5/\sqrt{Tg}$	B=0.61 M	$C=-(1.66+3.6/\Delta)\log\Delta$	$D=0.167 - 1.83/\Delta$	E=B+C+D	F=10^E	G=A x F
1	-3.782	102.330	2.684	0.373	133.6	8.192	5.124	-3.586074085	0.153301445	1.691227	49.116	402.35
2	-3.798	102.327	1.803	0.555	132.3	6.714	5.124	-3.579520485	0.153167834	1.697647	49.848	334.69
3	-3.758	102.316	9.223	0.108	133.8	15.184	5.124	-3.587308072	0.153326451	1.690018	48.98	743.73
4	-3.875	102.339	1.641	0.609	129.0	6.405	5.124	-3.562430732	0.152812936	1.714382	51.806	331.81
5	-3.906	102.319	1.495	0.669	125.5	6.114	5.124	-3.544106896	0.152421752	1.732315	53.99	330.11
6	-3.905	102.339	3.963	0.252	127.4	9.954	5.124	-3.554147549	0.152637489	1.72249	52.782	525.38
7	-3.928	102.316	0.927	1.079	124.1	4.814	5.124	-3.536390371	0.152253636	1.739863	54.937	264.45
8	-3.930	102.288	0.583	1.714	121.4	3.819	5.124	-3.521465718	0.151922661	1.754457	56.814	216.95
9	-3.786	102.295	2.204	0.454	130.3	7.424	5.124	-3.569212798	0.152954909	1.707742	51.02	378.75
10	-3.788	102.309	3.115	0.321	131.3	8.824	5.124	-3.574646171	0.153067571	1.702421	50.399	444.73
11	-3.810	102.283	1.041	0.961	127.7	5.101	5.124	-3.555815452	0.152673	1.720858	52.584	268.23
12	-3.828	102.290	6.298	0.159	127.3	12.548	5.124	-3.553616228	0.152626158	1.72301	52.846	663.1
13	-3.850	102.305	7.226	0.138	127.4	13.441	5.124	-3.553840983	0.152630952	1.72279	52.819	709.93
14	-3.850	102.331	7.818	0.128	129.7	13.981	5.124	-3.566058824	0.152889072	1.71083	51.384	718.39
15	-3.829	102.312	5.741	0.174	129.1	11.981	5.124	-3.563180294	0.152828701	1.713648	51.719	619.62
16	-3.756	102.300	5.509	0.182	132.6	11.736	5.124	-3.580954094	0.153197178	1.696243	49.687	583.11
17	-3.793	102.311	2.749	0.364	131.2	8.290	5.124	-3.574084578	0.153055971	1.702971	50.463	418.36
18	-3.793	102.272	7.863	0.127	127.9	14.021	5.124	-3.556452876	0.152686546	1.720234	52.509	736.22
19	-3.821	102.284	8.550	0.117	127.2	14.621	5.124	-3.553009405	0.152613204	1.723604	52.918	773.69
20	-3.823	102.315	6.226	0.161	129.8	12.476	5.124	-3.566760341	0.152903743	1.710143	51.303	640.05
21	-3.828	102.346	6.464	0.155	132.3	12.712	5.124	-3.579408145	0.153165532	1.697757	49.861	633.82
22	-3.789	102.263	6.956	0.144	127.3	13.187	5.124	-3.553325196	0.152619947	1.723295	52.88	697.35
23	-3.853	102.354	2.446	0.409	131.6	7.819	5.124	-3.575878032	0.153092982	1.701215	50.259	392.99
24	-3.826	102.320	7.564	0.132	130.1	13.751	5.124	-3.567999999	0.152929631	1.70893	51.16	703.52
25	-3.808	102.309	4.503	0.222	130.1	10.610	5.124	-3.568350249	0.152936936	1.708587	51.12	542.37

26	-3.785	102.267	8.582	0.117	127.9	14.647	5.124	-3.556597269	0.152689613	1.720092	52.492	768.86
27	-3.775	102.276	2.948	0.339	129.3	8.585	5.124	-3.563911923	0.152844071	1.712932	51.634	443.25
28	-3.756	102.293	6.425	0.156	132.0	12.674	5.124	-3.577906981	0.153134729	1.699228	50.03	634.08
29	-3.751	102.273	6.023	0.166	130.5	12.271	5.124	-3.570502153	0.15298173	1.70648	50.872	624.27
30	-3.786	102.252	7.807	0.128	126.5	13.971	5.124	-3.549527756	0.152538647	1.727011	53.335	745.13
31	-3.922	102.273	0.327	3.062	120.5	2.857	5.124	-3.516362654	0.151807706	1.759445	57.471	164.21
32	-3.876	102.318	3.395	0.295	127.0	9.213	5.124	-3.552126165	0.152594329	1.724468	53.023	488.52
33	-3.760	102.262	0.802	1.247	129.0	4.478	5.124	-3.562647202	0.15281749	1.71417	51.781	231.89
34	-3.783	102.261	8.955	0.112	127.5	14.963	5.124	-3.554572026	0.152646535	1.722075	52.732	789.01
35	-3.807	102.264	6.601	0.151	126.2	12.846	5.124	-3.547902327	0.1525037	1.728601	53.531	687.65
36	-3.759	102.273	0.612	1.635	130.1	3.911	5.124	-3.56799506	0.152929528	1.708934	51.16	200.07
37	-3.832	102.283	3.304	0.303	126.4	9.088	5.124	-3.548691705	0.152520683	1.727829	53.435	485.64
38	-3.907	102.306	1.193	0.838	124.2	5.461	5.124	-3.537176187	0.152270849	1.739095	54.84	299.5
39	-3.940	102.279	0.353	2.831	120.0	2.972	5.124	-3.513886874	0.151751602	1.761865	57.792	171.73
40	-3.859	102.324	0.353	2.831	128.5	2.972	5.124	-3.560005583	0.152761803	1.716756	52.09	154.79
41	-3.943	102.287	2.380	0.420	120.7	7.714	5.124	-3.517527205	0.151834021	1.758307	57.32	442.15
42	-3.755	102.283	1.870	0.535	131.2	6.837	5.124	-3.573902794	0.153052214	1.703149	50.483	345.18
43	-3.733	102.285	5.230	0.191	132.9	11.435	5.124	-3.582373287	0.153226163	1.694853	49.528	566.34
44	-3.872	102.360	3.430	0.292	131.1	9.260	5.124	-3.573486711	0.15304361	1.703557	50.531	467.92
45	-3.943	102.379	2.290	0.437	129.3	7.566	5.124	-3.563971589	0.152845323	1.712874	51.627	390.63
46	-3.901	102.376	2.800	0.357	131.1	8.367	5.124	-3.573391211	0.153041634	1.70365	50.542	422.86
47	-3.792	102.356	2.810	0.356	135.3	8.382	5.124	-3.594421469	0.153469667	1.683048	48.2	403.99
48	-3.773	102.388	3.460	0.289	139.3	9.301	5.124	-3.614543259	0.153866325	1.663323	46.06	428.38
49	-3.753	102.347	3.010	0.332	136.8	8.675	5.124	-3.602241021	0.153625286	1.675384	47.357	410.81
50	-3.746	102.325	6.000	0.167	135.4	12.247	5.124	-3.595156492	0.153484376	1.682328	48.12	589.35
51	-3.865	102.312	2.410	0.415	127.1	7.762	5.124	-3.552559726	0.152603597	1.724044	52.972	411.17
52	-3.857	102.335	3.040	0.329	129.7	8.718	5.124	-3.566012582	0.152888104	1.710876	51.39	448