

**TESIS**

**STUDI KERENTANAN SEISMİK DAN KARAKTERISTIK DINAMIK  
TANAH DI KOTA YOGYAKARTA DARI DATA MIKROTREMOR**



**Disusun Oleh :**

**ARI SUNKOWO**

**NIM : 10914017**

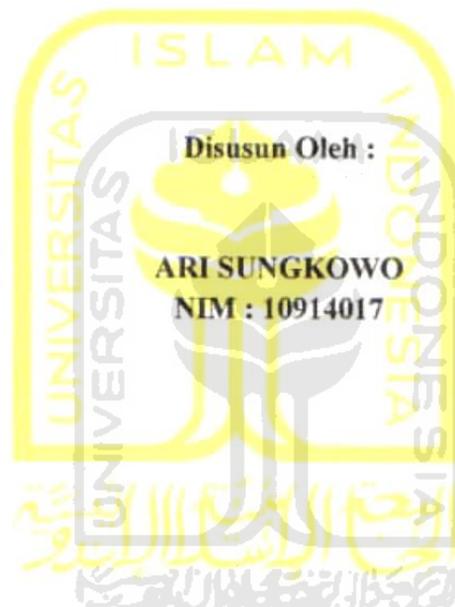
**KONCENTRASI MANAJEMEN REKAYASA KEGEMPAAN  
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA**

**2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

TESIS

STUDY ON SEISMIC VULNERABILITY AND DYNAMIC  
CHARACTERISTICS OF SOIL IN YOGYAKARTA CITY  
BASED ON MICROTREMOR DATA



Disusun Oleh :

ARI SUNGKOWO  
NIM : 10914017

Diperiksa dan disetujui Oleh :

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

Dosen Pembimbing I

Tanggal : 6/10/2016

**Prof. Ir. Moch Teguh, MSCE., Ph.D**

Dosen Pembimbing II

Tanggal : 7/10/2016

HALAMAN PENGESAHAN

TESIS

STUDI KERENTANAN SEISMIK DAN KARAKTERISTIK DINAMIK TANAH  
DI KOTA YOGYAKARTA DARI DATA MIKROTREMOR



Disusun Oleh :

**ARI SUNKOWO**  
NIM : 10914017

Telah diuji di depan Dewan Penguji  
Pada tanggal 27 September 2016  
Dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Susunan Dewan Penguji

Dosen Pembimbing I

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

Dosen Pembimbing II

(Prof. Ir. Moch Teguh, MSCE., Ph.D.)

Dosen Penguji

(Dr. Ir. Lalu Makruf, MT.)

Yogyakarta, 27 September 2016  
Universitas Islam Indonesia  
Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil  
Ketua Program

(Prof. Ir. H. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U)

## 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 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 tanggung jawab saya, bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian 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, 27 September 2016

Yang membuat pernyataan,

  
  
6000  
RUBU RUPAH  
**Ari Sungkowo**  
NIM : 10914017

“Alloh menganugerahkan al-hikmah (kefahaman yang dalam tentang Al-quran dan As-sunah) kepada siapa yang dia kehendaki. Dan barangsiapa yang dia anugerahi al-hikmah, dia benar-benar telah dianugerahi karunia yang banyak. Dan hanya orang-orang berakallah yang dapat mengambil pelajaran (dari firman alloh)

“Man Jadda Wa Jada”

“You will never know the real answer, before you try”

“Lawanlah kemaalasan karena malas menghambat segalanya”



*For My Family*

Istriku-Hesti Windarti

Anak-anakku :

- Luthfi Aulia Rahman

- Mirza Dzaky Savaraz



**KATA PENGANTAR**



Alhamdulillah puji syukur senantiasa ke hadirat Allah SWT atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, atas nikmat-nikmat yang diberikan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis dengan judul “STUDI KERENTANAN SEISMIK DAN KARAKTERISTIK DINAMIK TANAH DI KOTA YOGYAKARTA DARI DATA MIKROTREMOR” . Tesis merupakan rangkaian kegiatan penelitian yang diajukan untuk memenuhi kurikulum tingkat Master program S-2 Jurusan Manajemen Rekayasa Kegempaan Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.

Dalam penyusunan teiss penulis juga banyak mendapatkan bantuan, bimbingan, arahan, kritik dan saran dari berbagai pihak, sehingga dalam kesempatan ini penulis berterima kasih kepada :

1. Ayahanda (Alm) Rajio Notowiyarjo, Ibunda PoniyeM yang telah memberi support dan dorongan lahir dan batin terus menerus hingga terselesaikannya penyusunan Tesis ini
2. Istriku Hesti Windarti, S.Si, anak-anaku Luthfi Aulia Rahman dan Mirza Dzaky Safaraz atas segala motivasi, perhatian dan doa nya serta kesabaran menemani menyusun Tesis ini.
3. Segenap keluarga besar (Alm) Rajio Noto Wiyarjo dan (Alm) Hersan Hernowo Hadi atas segala bantuan materi dan semuanya yang memberikan semangat untuk menyelesaikan Tesis.
4. Bapak Dr. Andi Eka Sakya, M.Eng selaku Kepala BMKG
5. Bapak Dr. Hendar Gunawan, M.Sc mantan Kapusdiklat BMKG
6. Bapak Drs. Budi Waluyo, Dipl.Seis, Bapak Drs. M Riyadi, M.Si, Bapak Drs. Bambang Suryo Santosa P., M.Si, mantan Kepala Stasiun Geofisika Yogyakarta
7. Bapak Tony Agus Wijaya, S.Si selaku Kepala Stasiun Geofisika Yogyakarta

8. Bapak Prof. Ir. Widodo, MSCE., Ph.d dan Prof. Ir. H Moch Teguh, MSCE., Ph.d selaku dosen pembimbing I dan pembimbing II yang telah banyak memberikan masukan, arahan, nasehat, saran dan pengajaran yang diberikan kepada penulis selama melakukan penelitian ini.
9. Bapak Dr. Ir. Lalu Makroef, MT, MSCE., Ph.D., selaku dosen penguji
10. Bapak Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U selaku pengelola MRK
11. Kepala Biro Perencanaan dan Kerjasama Luar Negeri (BPKLN)
12. Koordinator Beasiswa BPKLN
13. Seluruh staff pengajar dan pengelola di Magister Teknik Sipil UII.
14. Seluruh staff dan karyawan Stasiun Geofisika Yogyakarta
15. Kawan-kawan Magister Teknik Sipil UII, khususnya seluruh kawan-kawan MRK 03 dalam kebersamaan dan perjuangan.
16. Semua pihak yang telah membantu penulis.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan yang terdapat dalam tulisan ini, namun dalam segala keterbatasannya semoga tulisan ini dapat bermanfaat. Akhir kata, penulis mengharapkan kritik dan saran agar Tesis ini lebih sempurna serta sebagai masukan bagi penulis untuk penelitian dan penulisan karya ilmiah di masa yang akan datang.

Yogyakarta, 29 September 2016

Penulis

Ari Sungkowo

10914017

## DAFTAR ISI

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| <b>HALAMAN JUDUL</b> .....            | i     |
| <b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....      | ii    |
| <b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....       | iii   |
| <b>PERNYATAAN</b> .....               | iv    |
| <b>LEMBAR PERSEMBAHAN</b> .....       | v     |
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....           | vi    |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....               | viii  |
| <b>DAFTAR TABEL</b> .....             | xii   |
| <b>DAFTAR GAMBAR</b> .....            | xv    |
| <b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....          | xvii  |
| <b>DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL</b> ..... | xviii |
| <b>ABSTRAK</b> .....                  | xx    |
| <br>                                  |       |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b>              |       |
| 1.1 Latar Belakang .....              | 1     |
| 1.2 Rumusan Masalah .....             | 2     |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....           | 3     |
| 1.4 Manfaat Penelitian .....          | 4     |
| 1.5 Batasan Masalah .....             | 4     |
| <br>                                  |       |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>        |       |
| 2.1 Penelitian terdahulu .....        | 5     |
| 2.2 Keaslian Penelitian .....         | 15    |
| <br>                                  |       |
| <b>BAB III DASAR TEORI</b>            |       |
| 3.1 Gempa bumi .....                  | 18    |
| 3.1.1 Pengertian gempa bumi .....     | 18    |
| 3.1.2 Jenis-jenis gempabumi .....     | 19    |
| 3.1.3 Parameter gempabumi .....       | 20    |

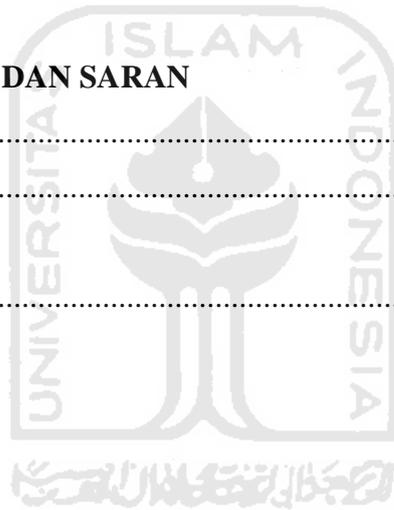
|  |    |
|--|----|
| 3.1.4 Gelombang Seismik.....   | 21 |
| 3.2 Kondisi geologi dan kegempaan Regional.....                                  | 23 |
| 3.2.1 Kondisi geologi Yogyakarta .....   | 23 |
| 3.2.2 Sejarah kegempaan Yogyakarta.....  | 26 |
| 3.3 Mikrotremor dan HVSr .....   | 27 |
| 3.3.1 Mikrotremor.....   | 27 |
| 3.3.2 Prinsip dasar metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio</i> .....    | 28 |
| 3.4 Site Effect .....  | 30 |
| 3.5 Faktor Amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) .....                            | 32 |
| 3.6 Frekuensi resonansi tanah ( $f_g$ ) dan Periode dominan tanah ( $A_g$ )..... | 33 |
| 3.7 Ketebalan Sedimen Tanah .....  | 34 |
| 3.8 Indek Kerentanan seismik ( $K_g$ ) .....                                     | 35 |
| 3.9 Percepatan Puncak Tanah ( <i>Peak Ground Acceleration</i> / PGA).....        | 36 |
| 3.10 PGA dengan <i>Non Linear Earthquake Site Response Analysis</i> NERA .....   | 39 |
| 3.11 <i>Ground Motion Syntetic</i> .....   | 41 |
| 3.12 Karakteristik Dinamik Tanah.....  | 43 |
| 3.12.1 Kecepatan Gelombang Geser ( $v_s$ ) .....                                 | 44 |
| 3.12.2 Modulus Geser Tanah ( $G$ ).....  | 45 |
| 3.12.3 Regangan Geser Tanah ( <i>Ground shear-strain</i> ).....                  | 48 |
| 3.13 Inversi/Pemodelan Kurva HVSr .....  | 51 |

## **BAB IV DATA DAN METODOLOGI**

|   |    |
|---|----|
| 4.1 Lokasi Penelitian .....   | 52 |
| 4.2 Peralatan dan Teknik Pengumpulan Data .....   | 52 |
| 4.2.1 Peralatan .....   | 52 |
| 4.2.2 Teknik Pengumpulan Data .....   | 54 |
| 4.3 Pengolahan Data.....  | 54 |
| 4.3.1 Pengolahan Data Mikrotremor .....   | 54 |
| 4.3.1.1 Perhitungan data frekuensi dominan ( $f_0$ ), Faktor amplifikasi<br>( $A_g$ ) dan Periode Dominan ..... | 55 |
| 4.3.1.2 Perhitungan ketebalan Sedimen .....   | 57 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.3.1.3 Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik.....                                  | 58  |
| 4.3.2 Perhitungan Nilai Percepatan Tanah Maksimum.....                              | 58  |
| 4.3.3 Perhitungan Nilai Karakteristik Dinamik Tanah.....                            | 59  |
| 4.3.3.1 Perhitungan Nilai Kecepatan Gelombang Geser .....                           | 59  |
| 4.3.3.2 Perhitungan Nilai Vs30 .....  | 62  |
| 4.3.3.3 Perhitungan Nilai Modulus Geser .....                                       | 62  |
| 4.3.3.4 Perhitungan Regangan Geser Horizontal .....                                 | 62  |
| 4.3.4 Hubungan Magnitudo, PGA, Modulus Geser Tanah dan Regangan<br>Geser Tanah..... | 62  |
| 4.3.5 Kondisi Bawah Permukaan .....   | 63  |
| 4.3.6 Peta Kerentanan Seismik.....  | 63  |
| 4.4 Diagram Alir Penelitian .....   | 63  |
| <br><b>BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN</b>   |     |
| 5.1 Pengolahan Data .....   | 65  |
| 5.1.2 Topologi Kurva HVSR .....   | 73  |
| 5.1.3 Peta Sebaran Nilai Faktor Amplifikasi Spektrum Tanah.....                     | 78  |
| 5.1.4 Peta Sebaran Nilai Frekuensi Dominan Tanah .....                              | 80  |
| 5.1.5 Peta Ketebalan Sedimen di Kota Yogyakarta .....                               | 82  |
| 5.1.6 Peta Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik .....                            | 85  |
| 5.2 Analisis Percepatan Puncak Tanah ( <i>Peak Groun Acceleration</i> ) .....       | 90  |
| 5.2.1 Penentuan PGA Berdasarkan SNI 1726-2002 .....                                 | 90  |
| 5.2.2 PGA Berdasarkan Rumusan Atenuasi Champbel 1989 .....                          | 91  |
| 5.2.3 PGA Berdasarkan Data Mikrotremor .....  | 94  |
| 5.2.4 PGA dan Regangan Tanah ( <i>Ground Shear Strain</i> ) Perlapisan .....        | 96  |
| 5.2.4.1 Analisis Spectral Matching untuk wilayah Kota Yogyakarta.                   | 97  |
| 5.2.5 PGA Perlapisan .....  | 101 |
| 5.3 Parameter Dinamik Tanah.....  | 107 |
| 5.3.1 Kecepatan Gelombang Sekunder ( $v_s$ ) .....                                  | 107 |
| 5.3.1.1 $v_s$ dari <i>seismic down hole</i> .....                                   | 107 |
| 5.3.1.2 $v_s$ dari replikasi .....  | 108 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.3.1.3 $v_s$ dari Persamaan Korelasi N-SPT .....   | 111 |
| 5.3.1.4 $v_s$ dari Inversi Kurva HVSR Mikrotremor .....   | 112 |
| 5.3.2 Nilai Modulus Geser ( $G$ ).....  | 114 |
| 5.3.2.1 Nilai Modulus Geser ( $G$ ) dari Kecepatan Gelombang<br>Geser .....   | 115 |
| 5.3.3 Regangan Geser Tanah ( $\gamma$ ).....  | 121 |
| 5.3.4. Hubungan Indeks Kerentanan Seismik ( $K_g$ ), Regangan Geser ( $\gamma$ )<br>dan Percepatan Tanah ( $\alpha$ ) ..... | 126 |
| 5.3.5 Tingkat Kerentanan Seismik di Wilayah Kota Yogyakarta ..  | 126 |
| 5.4 Kondisi Bawah Permukaan Wilayah Kota Yogyakarta .....   | 129 |
| <br><b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>  |     |
| 6.1 Kesimpulan .....  | 134 |
| 6.2 Saran .....   | 135 |
| <br><b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....   | 136 |



## DAFTAR TABEL

|  | Hal |
|--|-----|
| Tabel 2.1 Rangkuman beberapa penelitian terdahulu.....   | 16  |
| Table 3.1 Nilai-nilai Konstanta atenuasi Boore et.al .....   | 31  |
| Tabel 3.2 Rekomendasi nilai kecepatan gelombang geser rata-rata<br>untuk digunakan dalam fungsi atenuasi Boore et.al .....   | 39  |
| Tabel 3.3 Sejarah gempa merusak di Yogyakarta.....   | 51  |
| Tabel 5.1 Contoh parameter hasil inversi HVSR titik A7 .....   | 70  |
| Tabel 5.2. Klasifikasi Tanah menurut SNI-1726-2002 .....   | 90  |
| Tabel 5.3 Percepatan batuan dasar dan percepatan puncak tanah/batuan<br>dasar untuk setiap zona seismik dan jenis tanah di Indonesia .....                                       | 91  |
| Tabel 5.4. Input soil profil titik uji Malangan.....   | 101 |
| Tabel 5.5. Input soil profil titik uji Sorosutan.....  | 102 |
| Tabel 5.6 Hasil perhitungan <i>Peak Ground Acceleration</i> (PGA) dalam g<br>pada permukaan tanah dari masing-masing titik uji dari<br>masing-masing <i>input motion</i> . ..... | 102 |
| Tabel 5.7 Kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ ) <i>Seismic Downhole</i> di<br>Malangan dan Sorosutan (PUP-ESDM DIY, 2010).....  | 108 |
| Tabel 5.8 Kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) replikasi .....  | 110 |
| Tabel 5.9 Kecepatan gelombang geser rumusan Imai and Tonouchi 1982 ..  | 112 |
| Tabel 5.10 $G_{max}$ pada tiap kedalaman di Sorosutan dari $v_s$ <i>downhole</i><br><i>logging</i> .....   | 117 |
| Tabel 5.11 $G_{max}$ pada tiap kedalaman di Malangan dari $v_s$ <i>downhole</i><br><i>logging</i> .....  | 117 |
| Tabel 5.12 $G_{max}$ pada tiap kedalaman di Sorosutan dengan $v_s$ dari NSPT..   | 117 |
| Tabel 5.13 $G_{max}$ pada tiap kedalaman di Malangan dengan $v_s$ dari NSPT..  | 119 |
| Tabel 5.12 Nilai <i>strain</i> dan dinamika tanah (Ishihara,1982) .....  | 123 |
| Tabel 5.13 Hasil perhitungan <i>shear strain</i> dalam % pada permukaan tanah<br>dari masing-masing titik uji dari masing-masing <i>input motion</i> ....                        | 123 |
| Tabel 5.14 Klasifikasi $K_g$ .....   | 127 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabel 5.15 Klasifikasi PGA Kanai.....                                 | 127 |
| Tabel 5.16 Klasifikasi regangan geser Champbel.....                   | 127 |
| Tabel 5.18 Klasifikasi Vs30.....                                      | 127 |
| Tabel 5.19. Hasil uji bor di Auditorium Sanata Dharma Yogyakarta..... | 132 |
| Tabel 5.20. Hasil Uji bor di titik Hotel Hartono Mall.....            | 133 |



## DAFTAR GAMBAR

Hal

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Agihan frekuensi resonansi di graben Bantul .....   | 6  |
| Gambar 2.3 Peta tingkat kerawanan bahaya gempa bumi .....  | 7  |
| Gambar 2.3 Peta Indek kerentanan seismik kampus UIN Maulana Malik<br>Ibrahim Malang .....                              | 8  |
| Gambar 2.4. Peta Persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan<br>mikrotremor di zona graben Bantul .....   | 9  |
| Gambar 2.6 Peta 3D sebaran nilai $v_s$ wilayah Surabaya .....  | 11 |
| Gambar 2.7 Peta distribusi indeks kerentanan seismik dan data<br>kerusakan di Mexico City .....                        | 12 |
| Gambar 2.8 Peta distribusi indeks kerentanan seismik dan data kerusakan di<br>Intramuros Manila Filipina .....         | 13 |
| Gambar 2.9 Profil 1-D kecepatan gelombang sekunder di beberapa titik ukur<br>hasil inversi kurva H/V di Khas Iran..... | 14 |
| Gambar 2.10. Model $v_s$ dari inversi kurva H/V di Jammu City India.....   | 15 |
| Gambar 3.1. Proses deformasi batuan yang menyebabkan terjadinya gempa<br>bumi.....                                     | 19 |
| Gambar 3.2 Gelombang Primer dan Gelombang Sekunder.....  | 22 |
| Gambar 3.3 Gelombang Love dan Gelombang Rayleigh .....   | 23 |
| Gambar 3.4 Karakteristik seismogram mikrotremor .....  | 24 |
| Gambar 3.5. Ilustrasi prinsip metode HVSR mikrotremor .....  | 25 |
| Gambar 3.6 Frekuensi resonansi $f_0$ dan puncak spektrum A .....   | 25 |
| Gambar 3.7 Model cekungan berisi material sedimen.....   | 28 |
| Gambar 3.8 Model dua lapisan: <i>bedrock</i> dan sedimen .....   | 31 |
| Gambar 3.9 Sistem perambatan satu dimensi .....  | 36 |
| Gambar 3.10 Representasi skematik Sistem Model IM.....   | 37 |
| Gambar 3.11 Hubungan $G_{max}$ dan $G_{sec}$ .....   | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Gambar 3.12 Variasi harga regangan geser .....  | 43 |
| Gambar 3.13 <i>Shear deformation of surface layer</i> .....   | 45 |
| Gambar 3.14 Peta geologi lembar Yogyakarta .....  | 50 |
| Gambar 4.1. Peta wilayah Penelitian dan rencana titik lokasi perekaman<br>mikrotremor dan bor ..... | 53 |
| Gambar 4.2. Seperangkat peralatan perekaman mikrotremor.....  | 54 |
| Gambar 4.3. Tahap-tahap Metode HVSR .....   | 57 |
| Gambar 4.4. Kurva HVSR .....  | 57 |
| Gambar 4.5 Tampilan interface ModelHVSR .....   | 61 |
| Gambar 4.6 Diagram Alir Penelitian .....  | 64 |
| Gambar 5.1 Rekaman mikrotremor tiga komponen.....   | 66 |
| Gambar 5.2 <i>Windowing</i> sinyal mikrotremor.....   | 66 |
| Gambar 5.3. Kurva HVSR .....  | 67 |
| Gambar 5.4 Inversi kurva HVSR .....   | 70 |
| Gambar 5.5 Rekaman <i>waveform time history</i> percepatan tiga gempa.....                          | 71 |
| Gambar 5.6 Input data pada NERA .....   | 72 |
| Gambar 5.7 Kurva HVSR dengan satu puncak jelas .....  | 74 |
| Gambar 5.8 Kurva dengan dua puncak.....   | 75 |
| Gambar 5.9 Kurva dengan puncak lebar.....   | 75 |
| Gambar 5.10 Distribusi tipologi kurva HVSR.....   | 76 |
| Gambar 5.11 Peta faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) .....   | 79 |
| Gambar 5.12 Peta frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ).....   | 81 |
| Gambar 5.13 Peta ketebalan sedimen .....  | 83 |
| Gambar 5.14 Grafik frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen .....                                 | 84 |
| Gambar 5.15 Grafik frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen penelitian<br>Daryono .....           | 84 |
| Gambar 5.16 Peta distribusi indek kerentanan seismik ( $K_g$ ).....                                 | 86 |
| Gambar 5.17 Peta indeks kerentanan seismik Kabupaten Bantul dan Kota<br>Yogyakarta.....             | 87 |
| Gambar 5.18 Rasio kerusakan bangunan.....   | 88 |
| Gambar 5.19 Peta $K_g$ dan rasio kerusakan bangunan.....  | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| Gambar 5.20 Peta percepatan puncak gempa (PGA) dibatuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun ..... | 92  |
| Gambar 5.21 Peta distribusi atenuasi Campbell 1997... ..   | 93  |
| Gambar 5.22 Peta distribusi atenuasi Kanai 1966 .....  | 95  |
| Gambar 5.23 Peta distribusi getaran ( <i>shakemap</i> ) USGS gempa Jogja 27 Mei 2006 .....                           | 96  |
| Gambar 5.24 Spektrum Target.....   | 98  |
| Gambar 5.25 Respon spektra aktual, desain dan target dari tiga gempa.....  | 99  |
| Gambar 5.26 <i>Time history</i> desain tiga gempa.....   | 100 |
| Gambar 5.27 Grafik profil PGA di titik tinjau Malangan.....  | 103 |
| Gambar 5.28 Grafik profil PGA di titik tinjau Sorosutan.....   | 104 |
| Gambar 5.29 Accelerogram amplifikasi di titik tinjau Malangan .....  | 105 |
| Gambar 5.30 Accelerogram amplifikasi di titik tinjau Sorosutan .....   | 106 |
| Gambar 5.31 Profil kecepatan gelombang sekunder .....  | 107 |
| Gambar 5.32 Perbandingan korelasi $v_s$ dengan N-SPT .....   | 109 |
| Gambar 5.33 Distribusi kecepatan gelombang sekunder Replikasi .....  | 110 |
| Gambar 5.34 Distribusi kecepatan gelombang geser Imai and Tonouchi .....   | 111 |
| Gambar 5.35 Grafik rasio $v_s$ <i>downhole</i> dan inversi kurva HVSR.....   | 113 |
| Gambar 5.36 Peta distribusi $V_{s30}$ dari inveri kurva HVSR .....   | 114 |
| Gambar 5.37 Parameter penentuan Modulus Geser titik Sorosutan .....  | 116 |
| Gambar 5.38 Parameter penentuan Modulus Geser titik Malangan .....   | 116 |
| Gambar 5.39 Grafik $G_{max}$ pada tiap kedalaman dari <i>Downhole</i> .....  | 118 |
| Gambar 5.40 Grafik $G_{max}$ pada tiap kedalaman dari N-SPT.....   | 120 |
| Gambar 5.41 Peta distribusi regangan geser tanah .....   | 122 |
| Gambar 5.42 Grafik <i>maximum shear strain</i> di titik tinjau Malangan.....   | 124 |
| Gambar 5.43 Grafik <i>maximum shear strain</i> di titik tinjau Sorosutan .....                                       | 125 |
| Gambar 5.44 Peta Kerentanan seismik Kota Yogyakarta .....  | 129 |

## DAFTAR LAMPIRAN

Hal

|  |     |
|--|-----|
| Lampiran 1. Data Pengukuran Lapangan.....                                | L1  |
| Lampiran 2. Data Lokasi titik ukur.....                                  | L2  |
| Lampiran 3. Ketebalan Lapisan Sedimen.....                               | L3  |
| Lampiran 4. PGA Kanai.....   | L4  |
| Lampiran 5. PGA Champbell.....   | L5  |
| Lampiran 6. Perbandingan $v_s$ .....                                     | L6  |
| Lampiran 7. Kurva hasil Model HVSR.....                                  | L7  |
| Lampiran 8. Profil 1D inversi HVSR.....                                  | L8  |
| Lampiran 9. Vs30 inversi HVSR.....                                       | L9  |
| Lampiran 10. Tabel N-SPT dari titik Bor.....                             | L10 |
| Lampiran 11. Tabel $v_s$ dari N-SPT Replikasi dan Imai and Tonouchi..... | L11 |
| Lampiran 12. Ringkasan Hasil Uji mekanika tanah.....                     | L12 |
| Lampiran 13 Data Bor.....  | L13 |
| Lampiran 14. Kontur indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ).....             | L14 |
| Lampiran 15. Kontur frekuensi dominan ( $f_0$ ).....                     | L15 |

## DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

|            |   |
|------------|---|
| $a_b$      | Percepatan getaran di <i>bedrock</i>                                    |
| $A_g$      | Faktor amplifikasi spektrum tanah<br>(nilai puncak kurva HVSR)          |
| $A_{gd}$   | Faktor perbesaran <i>displacement</i>                                   |
| $A_{gk}$   | Faktor perbesaran kecepatan getaran                                     |
| $A_{ga}$   | Faktor perbesaran cepatan getaran                                       |
| $A_m$      | Simpangan Maksimum  |
| $a_s$      | Percepatan getaran di <i>surface</i>                                    |
| $\Delta$   | Jarak hipocenter  |
| $d_b$      | <i>Displacement</i> di <i>bedrock</i>                                   |
| $d_s$      | <i>Dispalcement</i> di <i>surface</i>                                   |
| $f_g$      | Frekuensi dominan tanah   |
| $G$        | Modulus geser tanah   |
| $G_{max}$  | Modulus geser maksimum  |
| $G_{sec}$  | Secant shear modulus  |
| $G(T)$     | Faktor perbesaran/amplifikasi   |
| $\gamma$   | <i>Ground shear strain</i>  |
| $\gamma_c$ | <i>Cyclic ground shear starin</i>                                       |
| $h$        | Ketebalan sedimen   |
| $k_b$      | Kecepatan getaran di <i>bedrock</i>                                     |
| $K_g$      | Indek kerentanan seismik  |
| $k_s$      | Kecepatan getaran di <i>surface</i>                                     |
| $\lambda$  | Panjang gelombang   |
| $M$        | Magnitudo   |
| $\eta$     | Viskositas  |
| $S_{HS}$   | Spektra fourier komponen horisontal di <i>surface</i> (tanah permukaan) |
| $S_{HB}$   | Spektra fourier komponen horisontal di <i>bedrock</i>                   |

|          |   |
|----------|---|
| $S_{VB}$ | Spektra fourier komponen vertikal di <i>bedrock</i>                         |
| $\tau_c$ | <i>Cyclic shear stress</i>  |
| t        | Waktu   |
| T        | Periode   |
| $T_g$    | Periode dominan tanah   |
| $T_H$    | Fungsi transfer gelombang SH dari <i>bedrock</i> ke lapisan tanah permukaan |
| $T_m$    | Periode maksimum  |
| $v_p$    | Kecepatan gelombang Primer  |
| $v_s$    | Kecepatan gelombang Sekunder  |
| $v_{sb}$ | Kecepatan gelombang Sekunder di <i>bedrock</i>                              |
| $v_{ss}$ | Kecepatan gelombang Sekunder di <i>surface</i>                              |
| $Vs30$   | Kecepatan rata-rata gelombang sekunder sampai kedalaman 30 meter            |
| $\rho$   | Densitas  |
| $\xi$    | Damping ratio   |
| z        | Kedalaman   |



## ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian kerentanan seismik dan karakteristik dinamik tanah di Kota Yogyakarta menggunakan data mikrotremor. Penelitian ini dilakukan untuk memetakan sebaran nilai faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ), frekuensi dominan ( $f_g$ ), indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), percepatan tanah maksimum (PGA), *ground shear strain* ( $\gamma$ ), ketebalan lapisan ( $h$ ) dan kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) yang dapat menunjukkan tingkat kerentanan suatu daerah terhadap bahaya gempa bumi. Pengukuran mikrotremor dilakukan dengan seismometer tiga komponen TDS 303. Data tersebut dianalisa dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Perhitungan PGA dilakukan dengan menggunakan persamaan Kanai untuk kejadian gempa bumi 27 Mei 2006 dengan magnitudo 6.3Mw dan NERA.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran nilai faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) berkisar antara 1.69 sampai 6.48, frekuensi dominan ( $f_g$ ) berkisar antara 0.62 Hz sampai 3.4 Hz, indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) berkisar antara 0.65 sampai 18.43, percepatan tanah maksimum (PGA) Kanai berkisar antara 338.11 gal sampai 868.74 gal, *ground shear strain* ( $\gamma$ ) berkisar antara 0.0002 sampai dengan 0.0028, ketebalan lapisan ( $h$ ) berkisar antara 22 m sampai 64 m dan kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) berkisar antara 185 m/dt sampai dengan 265 m/dt.

Nilai  $K_g$ , PGA,  $\gamma$ , relatif tinggi dan  $V_{s30}$  relatif rendah di daerah penelitian pada umumnya terdapat di daerah bagian selatan dari Kota Yogyakarta di wilayah Kecamatan Kotagede, Umbulharjo, Mergangsan dan Mantriweron yang mengalami kerusakan parah. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara tingkat kerusakan dengan indeks kerentanan seismik, *ground shear strain*, PGA dan  $V_{s30}$  sebagaimana ditunjukkan peta tingkat kerentanan seismik.

Kata kunci : *mikrotremor, PGA, indeks kerentanan seismik, ground shear strain, HVSr*

## ABSTRACT

Seismic vulnerability and ground dynamic characteristic research based on Microtremor has been conducted in Yogyakarta City. This study was conducted to map the distribution of ground amplification factor ( $A_g$ ), Dominan frequency ( $f_g$ ), Vulnerability index ( $K_g$ ), Peak ground acceleration (PGA), Ground shear strain ( $\gamma$ ), Shear velocity until 30 meters depth (Vs30) and the thickness of the sedimen layer ( $h$ ), which indicated the level of the vulnerability of a region to the earthquake hazard. Data of the research using three-component seismometer type TDS 303. The method to analyze data using Horizontal to vertical Spectral Ratio (HVSr). In this study the analyzed earthquake is Yogyakarta earthquake May, 27, 2006. Peak ground acceleration in ground surface layer was calculated using Kanai empirical equation for Yogyakarta earthquake event with moment magnitude 6.3 and NERA software.

The result of this research shows us that, distribution of ground amplification factor ( $A_g$ ) value ranged form 1.69 to 6.48, dominan frequency ( $f_g$ ) 0.62 Hz to 3.4 Hz, vulnerability index ( $K_g$ ) ranged from 0.65 to 18.35, Peak ground acceleration (PGA) 338.11 gal to 868.74 gal, ground shear strain ( $\gamma$ ) ranged from 0.0002 to 0028, shear velocity until 30 meters depth (Vs30) ranged form 185 m/dt to 265 m/dt and the thickness of the sedimen layer ( $h$ ) ranged from 22 m to 64 m.

High value of  $K_g$ , PGA,  $\gamma$ , and low value of Vs30 commonly contained in Southern of Yogyakarta City that are Kotagede, Umbulharjo, Mergangsan and Mantrijeron districts, which suffered the heavy damage level. It is shows the relationship of vulnerability index ( $K_g$ ), peak groud acceleration (PGA), ground shear strain ( $\gamma$ ), shear velocity until 30 meters depth (Vs30) with the damage level which showed with the vulnerability level map.

Keyword : Microtremor, peak ground acceleration, seismic vulnerability index, ground shear strain, HVSr

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Indonesia merupakan kawasan yang mempunyai tingkat seismisitas tinggi. Hal ini dikarenakan wilayah Indonesia dilewati jalur pertemuan empat lempeng aktif, yaitu lempeng Eurasia, lempeng Indoaustralia, lempeng Pasifik dan lempeng Philipina. Lempeng-lempeng ini secara aktif bergerak karena adanya panas konveksi dari dalam bumi. Interaksi dari adanya pergerakan lempeng ini menyebabkan terjadinya tumbukan antar lempeng yang berpengaruh terhadap kondisi seismo-tekonik di Indonesia. Adanya tumbukan lempeng ini menyebabkan banyak terjadi gempa bumi di Indonesia. Pertemuan lempeng ini membentuk subduksi atau tunjaman dengan kondisi lempeng yang satu menunjam ke bawah lempeng yang lainnya. Jalur subduksi lempeng Indo-Australia relatif ke utara terhadap lempeng Euroasia dengan kecepatan rata-rata 7.7 cm/tahun. Jalur subduksi ini membentang dari sepanjang pantai barat pulau Sumatera, sepanjang selatan pulau Jawa menerus hingga selatan pulau Bali, Lombok, Flores, Maluku dan Papua. Sementara lempeng Pasifik bergerak relatif ke barat terhadap lempeng Euroasia dan lempeng Indo-Australia.

Adanya zona subduksi aktif ini menyebabkan daerah di sekitar jalur subduksi ini mempunyai tingkat seismisitas yang tinggi, termasuk wilayah Yogyakarta. Banyak terjadi gempa bumi di wilayah Yogyakarta, diantaranya gempa bumi yang terjadi pada tanggal 27 Mei 2006. Gempa tersebut menurut catatan USGS ( *United State Geological Survey*, Amerika) berkekuatan 6,2 Mw (*Moment Magnitude*), berkedalaman dangkal 17,1 km. Gempa bumi tersebut berpusat disekitar muara kali Opak 20 km selatan kota Yogyakarta. Gempa bumi ini mengakibatkan kerusakan yang sangat parah. Tercatat serta puluhan ribu infrastruktur berupa rumah penduduk dan fasilitas umum lainnya seperti hotel, stasiun kereta, bandara, sekolah berikut jembatan mengalami yang rusak berat hingga ringan.

Kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi Yogyakarta ini ternyata memiliki pola persebaran yang tidak merata, tidak teratur dan blok-blok wilayah tertentu. Faktor geologi permukaan memegang peranan penting dalam menimbulkan tingkat kerusakan. Hal ini ditunjukkan oleh pola kerusakan yang tidak merata. Daerah yang dekat dengan sumber gempa tidak semuanya rusak parah sedangkan yang jauh dari pusat gempa tidak aman secara keseluruhan. Seperti dalam kejadian gempa Mexico dan gempa Jogjakarta. Untuk gempa Mexico terdapat daerah yang dekat epicenter gempa tidak rusak sedangkan yang jauh dari epicenter gempa mengalami kerusakan yang parah. Demikian juga gempa Yogyakarta tahun 2006 terdapat daerah yang dekat dengan epicenter terdapat tidak mengalami kerusakan yang parah tetapi daerah yang jauh justru mengalami kerusakan yang parah.

Tingkat kerusakan bangunan akibat gempa bumi tidak hanya dikontrol oleh kondisi atau kualitas bangunan saja. Kerusakan bangunan juga dikontrol oleh tingkat amplifikasi respon tanah terhadap guncangan, sehingga estimasi tingkat respon tanah ini penting diperhitungkan untuk menetapkan desain konstruksi bangunan dan penyempurnaan tata ruang wilayah di wilayah rawan gempabumi. Peta kerentanan diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi masing-masing wilayah.

Sehubungan dengan hal tersebut, dalam penelitian ini akan dilakukan pengukuran mikrotremor yaitu getaran tanah dengan amplitudo mikrometer yang dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam dan aktifitas seperti angin, gelombang laut, mesin, kendaraan dan lain-lain. Pengukuran di beberapa titik ukur di wilayah kota Yogyakarta untuk mengetahui tingkat kerentanan gempa bumi dan karakteristik dinamik tanah sebagai salah satu upaya mitigasi gempa bumi. Getaran mikrotremor diukur dipermukaan dilakukan dengan seismograf. Data mikrotremor selanjutnya diolah untuk memperoleh nilai faktor amplifikasi spektrum tanah, frekuensi resonansi dan perioda dominan tanah, selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai indek kerentanan seismik ( $K_g$ ), nilai kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ), nilai percepatan tanah maksimum *peak ground acceleration* ( $PGA$ ), regangan geser tanah *ground shear strain* ( $\gamma$ ), dan modulus geser ( $G$ ) di wilayah

kota Yogyakarta. Hasilnya diharapkan dapat memberikan gambaran tingkat kerentanan wilayah kota Yogyakarta yang dapat dipertimbangkan sebagai bahan penyusunan tata ruang dalam pengembangan wilayah.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasar latar belakang tersebut, kerentanan seismik tanah suatu wilayah mempunyai kaitan erat dengan kondisi respon seismik lokal tanah setempat. Oleh karena itu dilakukan kajian tingkat kerentanan seismik tanah di wilayah Kota Yogyakarta yang di rumuskan sebagai berikut :

1. seperti apa peta distribusi nilai faktor amplifikasi spektrum, frekuensi dominan dan kerentanan seismik di wilayah Kota Yogyakarta berdasarkan data mikrotremor?
2. bagaimanakah menganalisis untuk memperoleh nilai percepatan tanah maksimum dipermukaan ?
3. seperti apa peta nilai karakteristik dinamik tanah dalam bentuk kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ), regangan geser tanah ( $\gamma$ ) dan modulus geser ( $G$ )?
4. bagaimanakah hubungan antara nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), regangan geser tanah ( $\gamma$ ) dan nilai percepatan tanah maksimum ( $PGA$ )?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini ialah:

1. membuat peta distribusi nilai faktor amplifikasi spektrum, frekuensi dominan, dan periode dominan di wilayah Kota Yogyakarta berdasarkan data mikrotremor,
2. membuat peta distribusi nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), dan nilai percepatan tanah maksimum ( $\alpha$ ) di Kota Yogyakarta,
3. membuat peta distribusi nilai karakteristik dinamik tanah dalam bentuk kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) nilai regangan geser tanah ( $\gamma$ ) dan nilai modulus geser ( $G$ ),
4. mengetahui hubungan antara nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ), regangan geser tanah ( $\gamma$ ) dan nilai percepatan tanah maksimum ( $\alpha$ ).

#### 1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini diantaranya adalah :

1. memberikan gambaran karakteristik dinamik tanah di Kota Yogyakarta
2. mendapatkan gambaran lokasi-lokasi di Kota Yogyakarta yang rentan terhadap bahaya guncangan gempa bumi
3. memberikan masukan bagi pihak-pihak yang berkepentingan dalam upaya mitigasi dan pengurangan potensi risiko gempa bumi di Kota Yogyakarta

#### 1.4 Batasan Masalah

Daerah penelitian terletak pada wilayah yang dibatasi oleh koordinat Secara geografis, Kota Yogyakarta terletak antara  $110^{\circ}24'19''$  -  $110^{\circ}28'53''$  BT dan  $07^{\circ}15'24''$  -  $07^{\circ}49'26''$  LS meliputi 14 kecamatan di wilayah Kota Yogyakarta, yaitu, kecamatan Tegajrejo, Jetis, Gondokusuman, Kraton, Gedongtengen, Danurejan, Pakualaman, Gondomanan, Ngampilan, Wirobrajan, Mergangsan, Umbulharjo, Mantriweron dan Kotagede.

Penelitian ini ditekankan pada analisis kurva H/V untuk mendapatkan informasi tentang frekuensi resonansi, faktor amplifikasi spektrum tanah, indeks kerentanan seismik, kecepatan gelombang geser dan *ground shear strain*. Perhitungan nilai PGA di Kota Yogyakarta yang dilakukan oleh peneliti dilakukan dengan menggunakan rumusan atenuasi gempa *shallow crustal* yaitu : Campbell 1989 dalam Widodo, 2012 dan Kanai 1966 dalam Daryono, 2010.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

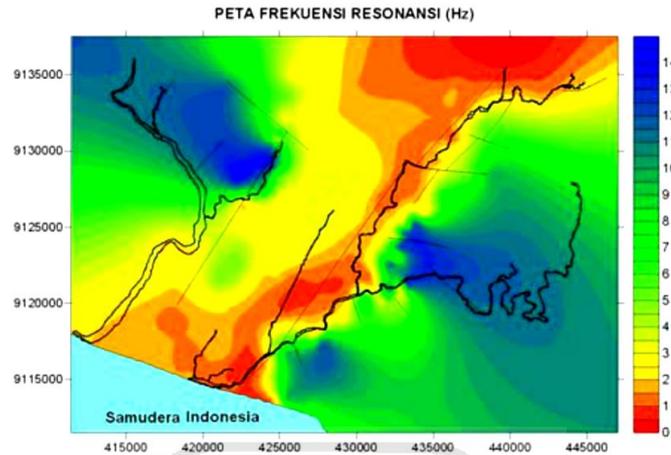
### 2.1 Penelitian terdahulu

Beberapa peneliti sebelumnya telah melakukan kajian dan penelitian terkait dengan daerah penelitian atau penelitian yang menggunakan metode terkait. Baik yang dilakukan oleh peneliti dari dalam negeri maupun peneliti dari luar negeri. Para peneliti itu diantaranya adalah Daryono (2009), Cahyanityas (2010), LitBang BMKG (2010), Irjan dan Bukhori (2011), Daryono (2011), Cahyaningtyas (2012), Mufida, dkk (2013). Penelitian dari luar negeri diantaranya Nakamura (2008), Saita *et al.* (2004), Tuladhar, *et.al.*, (2004), Zaharia, B., *et.al* (2008), Rahimi *et.al* (2012). Beberapa penelitian tersebut dirujuk dalam penelitian ini

#### 1. Daryono, dkk (2009)

Daryono, dkk (2009) melakukan penelitian dan pengukuran mikrotremor di daerah Bantul dan sekitarnya untuk mengetahui karakteristik dinamis lapisan sedimen permukaan, frekuensi resonansi ( $f_0$ ) dan nilai puncak rasio spektrum HVSR ( $A_0$ ) untuk mengetahui agihan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) dan mengungkap hubungan antara distribusi kerusakan gempa bumi Bantul 27 Mei 2006 dengan fenomena efek tapak lokal di Graben Bantul. Data mikrotremor dianalisis menggunakan Metoda *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Penelitian dilakukan dengan melakukan pengukuran mikrotremor di daerah Bantul menggunakan *portable seismograf* TDS 303. Hasil penelitian salah satunya ditunjukkan Gambar 2.1, menunjukkan bahwa nilai frekuensi resonansi ( $f_0$ ) berkisar antara 0,56 Hz hingga 14,0 Hz. Nilai puncak rasio spektrum HVSR ( $A_0$ ) berkisar antara 0,7 hingga 8,4. Indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) berkisar antara 0,04 hingga 29,22. Agihan nilai indeks kerentanan seismik sesuai dengan agihan kerusakan yang membentuk pola “*damage belt*”. Zona kerusakan parah yang terkonsentrasi di sepanjang Sesar Opak tidak disebabkan oleh reaktivasi sesar seperti yang dipredikasi oleh para ahli ilmu kebumihan sebelumnya, tetapi

merupakan cerminan adanya fenomena efek tapak lokal di Graben (cekungan) Bantul (Daryono, dkk., 2009)



Gambar 2.1 Agihan frekuensi resonansi di graben Bantul (Daryono, dkk., 2009)

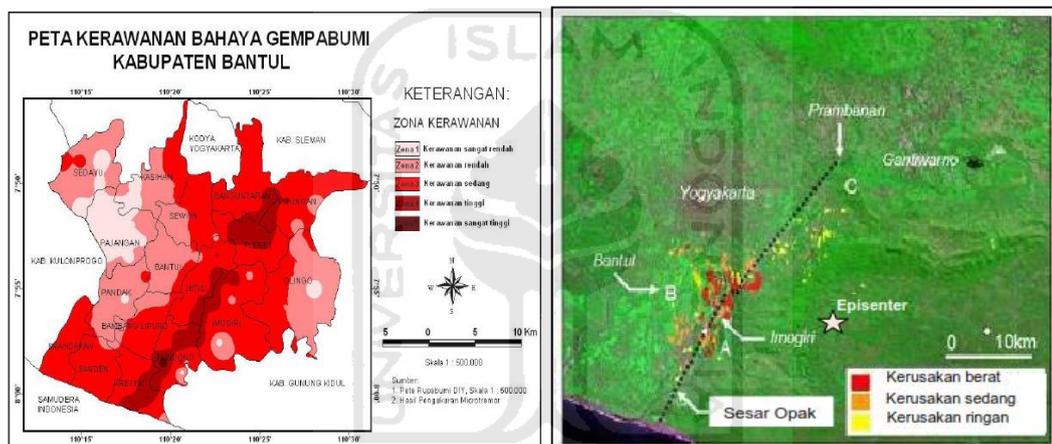
## 2. Tim Litbang BMKG (2010)

Pengkajian tingkat kerawanan di daerah Bantul Yogyakarta juga dilakukan oleh Tim dari Badan Penelitian dan Pengembangan BMKG Jakarta. Penelitian ini dilakukan mengingat daerah Bantul mengalami kerusakan yang cukup parah akibat gempa pada 27 Juli 2006 dan perkembangan kawasan pemukiman yang cukup pesat di Bantul. Ketersediaan data dan informasi geologi dan geofisika yang mendukung serta tingkat kerusakan untuk validasi hasil penelitian yang diperoleh. Tujuan penelitian ini adalah mengkaji tingkat kerawanan bahaya gempabumi, membangun kesiapsiagaan masyarakat di Kabupaten Bantul dalam menghadapi bencana, mengembangkan inovasi dan metode baru dalam zonasi rawan gempabumi, memberi rujukan baru zonasi daerah rawan gempabumi kepada masyarakat dan pihak-pihak terkait. Hasil yang diharapkan adalah tersedianya model peta tingkat kerawanan bahaya gempabumi di Kabupaten Bantul yang dapat digunakan untuk mendukung upaya pengurangan risiko bencana.

Penelitian dilakukan dengan pengukuran mikrotremor di wilayah Kabupaten Bantul menggunakan seperangkat seismograf portabel TDS 303. Data seismogram

yang terekam dilakukan analisis dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Penelitian ini juga memakai pendekatan SIG (Sistem Informasi Geografi) sebagai perangkat lunak untuk pemetaan dan analisis fenomena alam.

Penelitian ini menggunakan metodologi analisis keputusan multi kriteria sebagai petunjuk pembuat keputusan untuk mendapatkan output. Metode multi kriteria yang dipakai adalah *Simple Additive Weight* (SAW), pendekatan fungsi nilai dan *Analytical Hierarchical Process* (AHP). Dari penilaian ranking metode SAW tersebut kemudian dibuat peta kerawanan bahaya gempa bumi dibandingkan dengan zona kerusakan akibat gempa 27 Mei 2006.



a.

b.

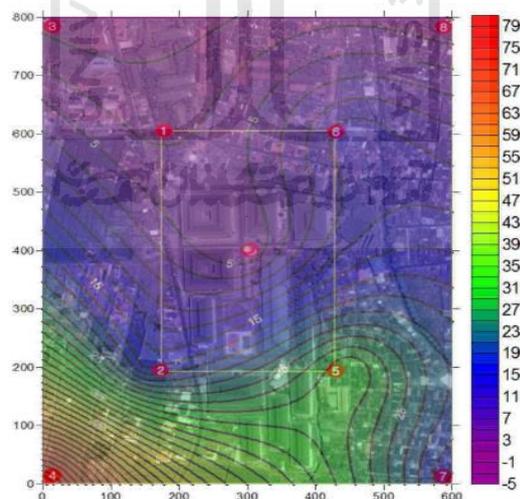
Gambar 2.2. a. Peta tingkat kerawanan bahaya gempa bumi, b. Peta kerusakan bangunan di akibat gempa di Bantul (Miura *et.al*, 2008)

Peta tingkat kerawanan gempa bumi Kabupaten Bantul hasil analisis multi kriteria, merupakan model peta tingkat kerawanan gempabumi hasil inovasi baru dalam metode zonasi daerah rawan gempa bumi. Ada kesesuaian pola antara peta rasio kerusakan aktual akibat gempa bumi Yogyakarta 26 Mei 2006 dengan peta kerawanan gempa bumi hasil kajian seperti ditunjukkan pada Gambar 2.3.a dan b. Peta tingkat kerawanan gempa bumi Kabupaten Bantul berdasarkan analisis multi kriteria dapat dijadikan sebagai rujukan baru bagi masyarakat dan pihak-pihak yang terkait dalam usaha mitigasi bencana gempa bumi di Kabupaten Bantul.

### 3. Irjan dan Bukhori, A. (2011)

Irjan dan Bukhori (2011) melakukan penelitian tentang mikrozonasi seismik di kampus I UIN Maulana Malik Ibrahim Malang dan sekitarnya. Penelitian yang dilakukan tersebut merupakan penelitian awal mikrozonasi di wilayah kampus I UIN Maulana Malik Ibrahim Malang dan sekitarnya untuk mengetahui spektral rasio H/V, sehingga dapat diketahui tingkat kerawanan kerusakan akibat gempa bumi.

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode HVSR (Horizontal Vertical Spectral Ratio, hasil penelitian seperti ditunjukkan Gambar 2.3. Peta sebaran indeks kerentanan seismik memperlihatkan bahwa potensi kerusakan akibat gempa bumi adalah cukup rendah. Hal ini bersesuaian dengan nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) yang berkisar antara 0,055 hingga 2,856. Dari analisis ketiga parameter ditemukan potensi yang tinggi di sekitar wilayah titik 5 dan 4 yang memiliki nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) sebesar 31,205 dan 76,097 (Irjan, Bukhori A, 2011)



Gambar 2.3. Peta Indeks kerentanan seismik kampus UIN Maulana Malik Ibrahim Malang (Irjan, Bukhori A, 2011)

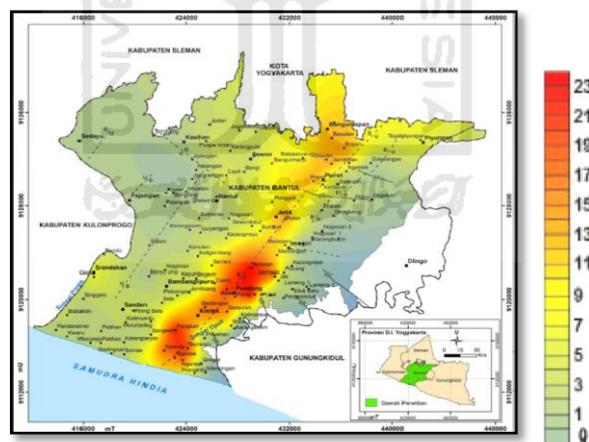
### 4. Daryono (2011)

Daryono (2011) melakukan penelitian tentang indeks kerentanan seismik berdasarkan data mikrotremor pada setiap satuan bentuk lahan di zona cekungan

(*graben*) Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta. Penelitian ini menggunakan pendekatan spasial dengan satuan bentuk lahan sebagai satuan analisis. Teknik pengambilan data mikrotremor menggunakan *proportional purposive sampling*. Analisis data mikrotremor menggunakan Metode *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio (HVSr)*. Analisis hasil penelitian dan pembahasan menggunakan analisis spasial, analisis kuantitatif, dan analisis kualitatif.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengetahui karakteristik indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul, dan (2) mengetahui persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai rata-rata indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor pada setiap satuan bentuk lahan berubah mengikuti satuan bentuk lahan seperti ditunjukkan Gambar 2.4. Nilai rata-rata indeks kerentanan seismik tertinggi terdapat pada satuan bentuk lahan Dataran Fluviovulkanik Merapi Muda ( $K_g=8,5$ ).



Gambar 2.4. Peta Persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor di zona graben Bantul (Daryono, 2011)

Nilai rata-rata indeks kerentanan seismik terendah terdapat pada satuan bentuk lahan Perbukitan Struktural Formasi Sentolo ( $K_g=0,1$ ). Persebaran daerah lebih rentan secara seismik akibat *local site effect* di zona graben Bantul terdapat pada satuan bentuk lahan asal *fluvial*, *vulkanik*, *aeoliomarin*, *denudasional*, dan *fluviomarin*. Persebaran daerah kurang rentan secara seismik terdapat pada satuan bentuk lahan asal struktural. Beberapa faktor yang mempengaruhi indeks kerentanan

seismik dalam penelitian ini adalah jenis material penyusun bentuk lahan, ketebalan sedimen, dan kedalaman muka air tanah.

#### **5. Cahyanintyas, D. R. (2012)**

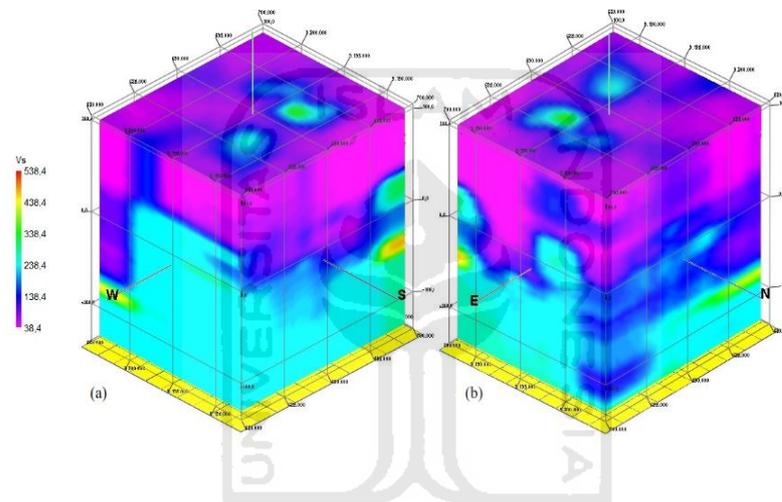
Cahyanintyas (2012) melakukan penelitian kerentanan gempa bumi dengan data mikrotremor dan data kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) di daerah Kabupaten Kulonprogo meliputi kecamatan yaitu: Temon, Wates, dan Panjatan. Sebagai upaya studi kelayakan terkait pembangunan bandara udara internasional, pembangunan pelabuhan Tanjung Adikarto dan jalan jalur lintas selatan. Penelitian terkait tingkat kerawanan gempa bumi meliputi kondisi efek lokal dan peta tingkat kerawanan gempa bumi. Kondisi efek lokal meliputi: geologi, geohidrologi, nilai amplifikasi, nilai frekuensi dominan, dan nilai kecepatan gelombang geser. Empat jenis peta tingkat kerawanan gempabumi dibuat: (1) Peta mikrozonasi gempa bumi kualitatif, (2) peta PGA dengan fungsi atenuasi Atkinson-Boore dengan  $v_s$  hasil pengukuran survei MASW, (3) peta PGA dengan fungsi atenuasi Atkinson-Boore dengan  $v_s$  diturunkan dari topografi yang berasal dari SRTM arcsec 30, dan (4) peta PGA dengan fungsi atenuasi Kanai.

Kisaran nilai amplifikasi 1,35-7,56, kisaran nilai frekuensi dominan 0,28-13,37 Hz, kisaran nilai  $V_{s30}$  berdasarkan survei MASW 96,74 – 499,74 m/s, sedangkan kisaran nilai  $V_{s30}$  berdasarkan topografi 181,95 – 651,80 m/s. Kondisi terkait efek lokal saling terkait satu dengan yang lain. Nilai amplifikasi tinggi terletak pada daerah dengan sedimen tipis untuk sedimen Kuartar (*Quaternary*), sedangkan pada sedimen Tersier (*Tertiary*). Keempat peta tingkat kerawanan gempabumi menunjukkan bahwa Kecamatan Panjatan merupakan daerah dengan tingkat kerawanan tertinggi, karena kecamatan ini merupakan daerah yang paling dekat dengan sumber gempa bumi.

#### **6. Mufida, A., dkk (2013)**

Mufida (2013) melakukan estimasi kecepatan gelombang geser bawah permukaan dari data mikrotremor dengan metode inversi kurva HVSr. *Profiling*

Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ ) Kota Surabaya berdasarkan pengolahan data mikrotremor dengan menggunakan inversi kurva HVSR yang dikembangkan oleh Herak (2008). Berdasarkan data  $V_s30$  hasil penelitian ini diketahui, wilayah Kota Surabaya diklasifikasikan menjadi tipe tanah E, yaitu lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai  $v_s$  tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antar 5 dan 20 meter. Dan  $v_s$  tanah tipe D menyebar hampir diseluruh wilayah Surabaya kecuali bagian tengah ke arah barat yang mempunyai  $v_s$  tipe tanah C. Sebaran 3D kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) ditunjukkan pada Gambar 2.6.



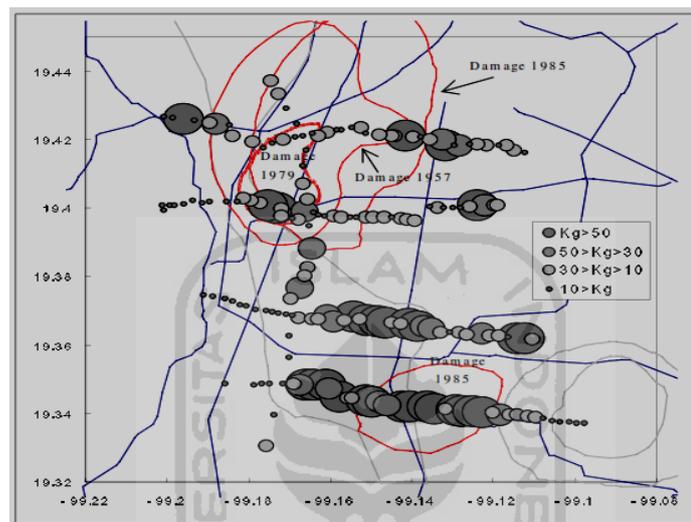
Gambar 2.6 Peta 3D sebaran nilai  $v_s$  wilayah Surabaya (a). dilihat dari arah SW atas, (b) dari arah EN atas, (Mufida A. dkk, 2013)

Penggunaan mikrotremor yang dilakukan di luar negeri diantaranya adalah sebagai berikut ini :

### 7. Gurler, et.al

Menganalisis hubungan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan data kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu di daerah Mexico City Mexico. Gurler *et al.* (2000) melakukan pengukuran mikrotremor pada 200 lokasi di Mexico City yang berulang kali dilanda kerusakan akibat gempa bumi tahun 1957, 1979 dan 1985. Jalur pengukuran mikrotremor memotong perbukitan, daerah transisi, dan rawa yang sudah direklamasi. Hasil penelitian dapat mengidentifikasi "zona lemah" Gambar 2.7, yang ditandai dengan indeks kerentanan seismik tinggi di zona bekas rawa. Indeks kerentanan seismik

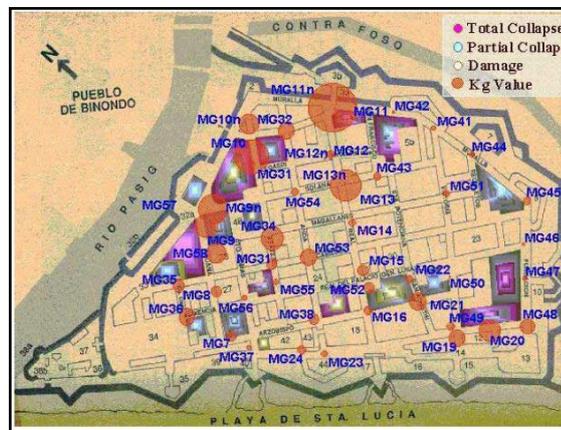
berubah semakin kecil setelah memasuki zona transisi dan zona perbukitan. Kawasan bekas rawa yang direklamasi ternyata merupakan zona indeks kerentanan tinggi dan selalu mengalami kerusakan parah setiap terjadi gempa bumi kuat. Zona lemah merupakan zona indeks kerentanan seismik tinggi. Zona indeks kerentanan seismik tinggi yang sering terjadi kerusakan terletak di zona bekas rawa.



Gambar 2.7. Peta distribusi indeks kerentanan seismik dan data kerusakan di Mexico City

### 8. Saita, *et al.* (2004)

Saita *et al.* 2004 melakukan penelitian di Intramuros, Manila, menganalisis hubungan antara tingkat kerusakan gempa bumi pada masa lampau dengan indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan melakukan survei lapangan dengan analisis HVSR dan hubungan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan kerusakan rumah. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa mikrotremor memberikan hasil stabil dan konsisten untuk jangka waktu yang panjang. Indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dapat mengestimasi kawasan yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu dan masa yang akan datang. Hasil penelitian ditunjukkan Gambar 2.8, terlihat bahwa bagian Utara dan Timur nilai  $Kg$  relatif lebih besar.

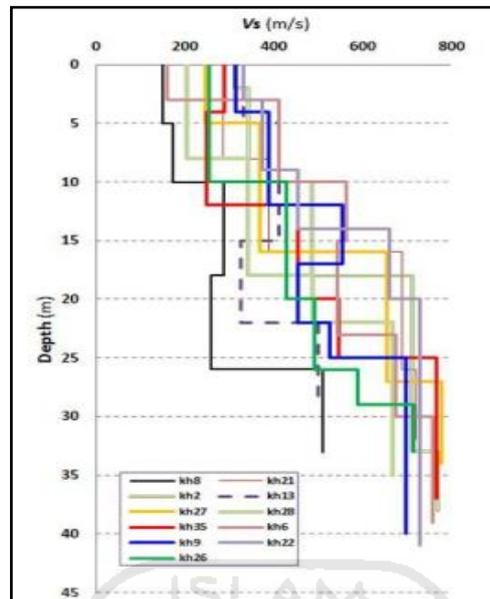


Gambar 2.8. Peta distribusi indeks kerentanan seismik dan data kerusakan di Intramuros Manila Filipina (Saita *et al.* 2004)

## 9. Rahimi, E., (2012)

Rahimi (2012) melakukan analisis terhadap efek kondisi lokal dan profil kecepatan gelombang geser untuk mengetahui struktur di daerah Khas kota bagian Tenggara dari Iran menggunakan beberapa metode. Selain dengan menggunakan data bor, penelitian ini juga menggunakan data mikrotremor. Kurva HVSR yang diperoleh kemudian dilakukan pemodelan untuk menentukan profil 1-D di daerah tersebut. Salah satu metode yang digunakan adalah inversi kurva HVSR dengan *software* ModelHVSR dari Herak.

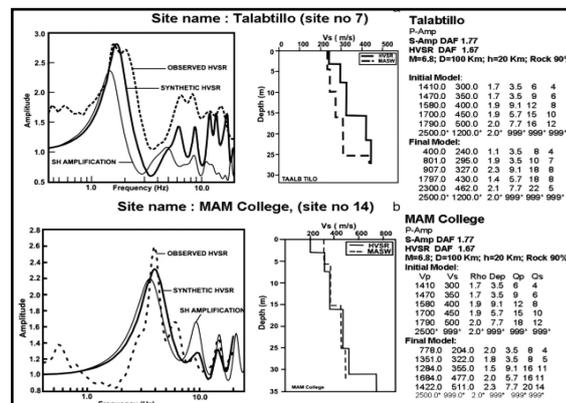
Profil 1-D Kecepatan gelombang geser yang yang diperoleh tidak jauh berbeda dengan survey seismik *downhole* yang dilakukan di daerah tersebut. Profil 1-D kecepatan gelombang geser ditunjukkan oleh Gambar 2.10. Dari penelitian ini diperoleh informasi klasifikasi tanah di daerah penelitian termasuk dalam kelas C dan II berdasarkan klasifikasi dari NHRP dan *Iranian Code*.



Gambar 2.9 Profil 1-D kecepatan gelombang sekunder di beberapa titik ukur hasil inversi kurva H/V di Khas Iran (Rahimi, E., *et.al* 2012)

#### 10. Mahakan, A.K., *et.al* (2012)

Mahakan AK *et.al* (2012) melakukan penelitian di daerah Jammu Himalaya India dengan metode aktif MASW dan metode pasif mikrotremor HVSR untuk mengetahui kecepatan gelombang geser di struktur. Kecepatan gelombang geser sampai pada kedalaman 30 m berkisar antara 238 m/s – 450 m/s. Dari pengukuran mikrotremor dihasilkan frekuensi fundamental berkisar antara 1 Hz – 3Hz di bagian tengah dan 1.75 Hz–2 Hz dibagian utara, bagian baratdaya dan bagian selatan. Inversi kurva H/V juga dilakukan di daerah tersebut yang dibandingkan dengan hasil dari survei MASW.



Gambar 2.10. Model  $v_s$  dari inversi kurva H/V di Jammu City India (Mahakan, A.K., *et.al* 2012)

Rangkuman beberapa penelitian terdahulu ditunjukkan Tabel 2.1

## 2.2 Keaslian Penelitian

Beberapa penelitian mengenai indeks kerentanan seismik sudah dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Penelitian ini memiliki beberapa kesamaan dalam hal tema dengan penelitian yang dilakukan oleh para peneliti terdahulu, namun juga memiliki perbedaan dalam hal tujuan, pendekatan, dan objek kajian yang digunakan. Penelitian indeks kerentanan seismik berdasarkan pengukuran mikrotremor yang dilakukan oleh para peneliti terdahulu hanya menggunakan pendekatan geofisika. Dalam penelitian ini untuk mengetahui kerentanan seismik tanah juga digunakan pendekatan seismologi teknik yaitu dengan menggunakan data kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ ) dari *seismic down hole* dan  $v_s$  dari inversi kurva HVSR. Selain itu juga digunakan data karakteristik dinamik tanah yaitu regangan geser tanah dan modulus geser tanah.

Tabel 2.1 Beberapa penelitian terdahulu

| No | Peneliti             | Tahun | Judul Penelitian  | Bahasan Penelitian   | Hasil Penelitian  |
|----|----------------------|-------|---|--|---|
| 5  | Gurler <i>et al.</i> | 2000  | <i>Local Site Effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement</i>  | Menganalisis hubungan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan data kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Zona lemah merupakan zona indeks kerentanan seismik tinggi.</li> <li>2. Zona indeks kerentanan seismik tinggi yang sering terjadi kerusakan terletak di zona bekas rawa.</li> </ol>   |
| 1  | Saita, <i>et al</i>  | 2004  | <i>On Relationship Between the Estimated Strong Motion Characteristics of Surface Layer and the Earthquake Damage. Case Study at Intramuros, Manila</i> | Menganalisis hubungan antara tingkat kerusakan gempa bumi pada masa lampau dengan indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor di Intramuro, Manila   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Pengukuran mikrotremor memberi hasil stabil dan konsisten untuk jangka panjang.</li> <li>2. Indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dapat mengestimasi kawasan yang mengalami kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu dan masa yang akan datang</li> </ol> |
| 2  | Nakamura             | 2008  | <i>On the H/V Spectrum</i>  | Penelitian ini dilakukan di California USA, mengkaji penggunaan metode HVSR dan aplikasinya untuk menghitung indeks kerentanan seismik   | Dataran aluvial dan kawasan reklamasi memiliki indeks kerentanan seismik tinggi, mengalami kerusakan parah. Indeks kerentanan seismik mengecil di daerah transisi hingga kawasan perbukitan   |
| 3  | Daryono, dkk         | 2009  | <i>Local Site Effect di Graben Bantul Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor untuk Pengkajian Bahaya Gempa Bumi</i>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengetahui, frekuensi resonansi (<math>f_0</math>), nilai puncak spektrum HVSR (<math>A_0</math>)</li> <li>2. Mengetahui agihan indeks kerentanan seismik (<math>K_g</math>)</li> <li>3. Mengetahui hubungan antara distribusi kerusakan Gempabumi Bantul 27 Mei 2006 dengan fenomena efek tapak lokal di Graben Bantul</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Distribusi nilai frekuensi dasar, nilai puncak HVSR</li> <li>2. Distribusi agihan indeks kerentanan seismik Daerah Bantul</li> <li>3. Adanya korelasi yang baik antara pola distribusi kerusakan dengan efek tapak lokal Bantul</li> </ol>                              |
| 4  | Tim Litbang BMKG     | 2010  | <i>Kajian Kerawanan Bahaya Gempabumi di Kabupaten Bantul, DIY</i>   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengkaji tingkat kerawanan gempa bumi di Kabupaten Bantul</li> <li>2. Mengembangkan inovasi baru dalam metoda zonasi rawan gempa bumi di Kabupaten Bantul berdasarkan analisis multikriteria</li> </ol>  | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Peta distribusi nilai periode dominan, faktor amplifikasi, PGA.</li> <li>2. Menggunakan metode multi kriteria untuk zonasi rawan gempa bumi</li> <li>3. Peta kerawanan gempa bumi dengan metode multi kriteria daerah Bantul</li> </ol>                                 |

|    |                     |      |  |  |  |
|----|---------------------|------|--|--|--|
|    |                     |      |  | 3. Memberi rujukan baru zonasi daerah rawan gempa bumi   |  |
| 5  | Daryono             | 2011 | Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuklahan di Zona Graben Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Mengetahui karakteristik indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuklahan.</li> <li>2. Mengetahui persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuklahan di zona Graben Bantul.</li> </ol> | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Karakteristik indeks kerentanan seismik, ground shear-strain, dan rasio kerusakan rumah berubah mengikuti satuan bentuklahan.</li> <li>2. Persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuk lahan menunjukkan bahwa variasi indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh jenis material penyusun, ketebalan sedimen, dan kedalaman muka airtanah.</li> </ol> |
| 6  | Irjan dan Bukhori A | 2011 | Pemetaan Wilayah Rawan Bencana Berdasarkan Data Mikroseismik Menggunakan TDS 303S  | Mengetahui Tingkat Kerawanan Gempa bumi di sekitar kampus UIN Maulana Malik Ibrahim Malang   | Nilai $f_0$ dan $A$ memperlihatkan bahwa potensi kerusakan akibat gempabumi adalah cukup rendah. Hal ini bersesuaian dengan nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ )  |
| 7  | Mahajan AK, et.al   | 2011 | <i>Active seismic and passive microtremor HVSR fro assessing site effect in Janmu city, new Himalaya, India</i>                    | Membandingkan estimasi kecepatan dengan menggunakan metode MASW dan Model kurva HVSR mikrotremor di wilayah kota Janmu India   | metode MASW dan inversi kurva HVSR mikrotremor dapat digunakan untuk investigasi site effect in Janmu dan metode HVSR baik untuk digunakan di area dengan kontras impedansi tinggi   |
| 8  | Cahyanintyas D R    | 2012 | Studi Kerawanan Seismik Kecamatan Temon, Wates dan Panjatan Kabupaten Kulonprogo   | Sebagai upaya studi kelayakan terkait pembangunan bandara udara internasional, Pembangunan pelabuhan Tanjung Adikarto dan Jalan Jalur Lintas Selatan   | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Peta mikrozonasi gempabumi kualitatif</li> <li>2. Peta PGA dengan fungsi atenuasi Atkinson-Boore dengan <math>v_s</math> hasil pengukuran survei MASW, fungsi atenuasi Atkinson-Boore dengan <math>V_s</math> diturunkan dari topografi</li> </ol>   |
| 9  | Rahimi E, et.al     | 2012 | <i>Evaluating local geological conditions and Vs profiles in Khash area, SE Iran</i>   | Melakukan analisis terhadap kondisi lokal dan profil kecepatan gelombang geser memodelkan kurva H/V untuk menentukan profil 1-D  | Profil 1-D Kecepatan gelombang geser yang yang diperoleh tidak jauh berbeda dengan seismik downhole  |
| 10 | Mufida A, dkk       | 2013 | <i>Profilling Kecepatan Gelombang Geser (<math>V_s</math>) Surabaya berdasarkan Mikrotremor</i>                                    | Estimasi kecepatan gelombang geser bawah permukaan dari data mikrotremor dengan metode inversi kurva HVSR  | Wilayah Surabaya dikalsifikasikan menjadi tipe tanah E, yaitu lapisan tanah yang terdiri aluvium pada permukaan dengan nilai $v_s$ tipe C atau D dengan ketebalan bervariasi antar 5 dan 20 meter.   |



## **BAB III**

### **DASAR TEORI**

#### **3.1. Gempa bumi**

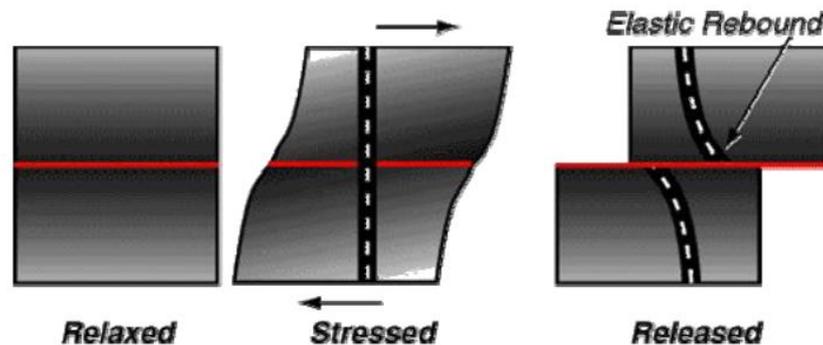
##### **3.1.1. Pengertian gempa bumi**

Gempa bumi adalah guncangan di permukaan bumi disebabkan oleh pergerakan yang cepat pada lapisan batuan terluar bumi. Gempa bumi terjadi ketika energi yang tersimpan dalam bumi, biasanya dalam bentuk tegangan pada batuan, secara tiba-tiba terlepas. Energi ini dirambatkan ke permukaan bumi oleh gelombang gempa bumi. Atau dengan kata lain gempa bumi adalah gerakan tiba-tiba atau suatu rentetan gerakan tanah yang berasal dari suatu daerah terbatas dan menyebar dari titik tersebut ke segala arah.

Menurut Teori *Elastic Rebound* yang dinyatakan oleh Seismolog Amerika, Reid, (Bullen, 1965; Bolt 1985) menyatakan bahwa gempa bumi merupakan gejala alam yang disebabkan oleh pelepasan energi regangan elastis batuan, yang disebabkan adanya deformasi batuan yang terjadi pada lapisan lithosfer. Deformasi batuan terjadi akibat adanya tekanan (*stress*) dan regangan (*strain*) pada lapisan bumi. Tekanan atau regangan yang terus-menerus menyebabkan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan mulai terjadi pergeseran dan akhirnya terjadi patahan secara tiba-tiba.

Mekanisme gempa bumi dapat dijelaskan secara singkat sebagai berikut, jika terdapat 2 buah gaya yang bekerja dengan arah berlawanan pada batuan kulit bumi, batuan tersebut akan terdeformasi, karena batuan mempunyai sifat elastis. Bila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu yang lama dan terus menerus, maka lama kelamaan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan akan mulai terjadi pergeseran. Akibatnya batuan akan mengalami patahan secara tiba-tiba sepanjang bidang patahan (Gambar 3.1). Setelah itu batuan akan kembali stabil, namun sudah mengalami perubahan bentuk atau posisi. Pada saat batuan mengalami gerakan yang tiba-tiba akibat pergeseran batuan, energi stress yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang di kenal sebagai gempa bumi. Garis putus-putus merupakan garis imajiner yang menunjukkan

posisi batuan sebelum dan sesudah daya dukung batuan terlampaui. Garis merah horizontal pada akhir proses deformasi merupakan bidang sesar yang terjadi.



Gambar 3.1. Proses deformasi batuan yang menyebabkan terjadinya gempa bumi (Bolt, 1985)

Setiap kejadian gempa bumi akan menghasilkan informasi seismik berupa rangkaian gelombang seismik yang dapat dicatat atau direkam oleh seismograf. Rekaman rangkaian gelombang seismik disebut dengan seismogram. Setelah melalui proses pengumpulan, pengolahan dan analisis maka akan didapat parameter gempabumi. Parameter gempabumi meliputi: waktu kejadian, lokasi episenter, kedalaman sumber, dan magnitudo.

### 3.1.2. Jenis-jenis gempa bumi

Berdasarkan penyebabnya gempa bumi diklasifikasikan menjadi menjadi empat jenis, yaitu :

#### 1. Gempa bumi tektonik

Gempa bumi ini terjadi akibat adanya aktivitas tektonik yaitu pergeseran kulit bumi (*lithosphere*) yang umumnya terjadi di daerah patahan kulit bumi. Gempa bumi jenis inilah yang menimbulkan kerusakan yang paling besar karena magnitudo yang ditimbulkannya bisa besar.

## 2. Gempa bumi vulkanik

Gempa bumi ini terjadi akibat adanya aktivitas dari gunung berapi, baik sebelum maupun saat meletusnya gunung berapi. Gempa bumi ini hanya terasa di sekitar lokasi gunung api tersebut.

## 3. Gempa bumi runtuh

Gempa bumi ini terjadi karena adanya keruntuhan yang terjadi baik di atas maupun di bawah permukaan tanah, Biasanya terjadi di daerah kapur atau pada daerah pertambangan. Gempa bumi ini jarang terjadi dan bersifat lokal, contohnya: tanah longsor, salju longsor, jatuhnya batu dan lain-lain.

## 4. Gempa bumi buatan

Gempa bumi jenis ini adalah getaran pada bumi akibat aktivitas dari manusia, seperti peledakan dinamit, nuklir ataupun palu yang dipukulkan ke permukaan bumi dan biasanya untuk kegiatan eksplorasi.

Berdasarkan waktunya gempa bumi diklasifikasikan menjadi tiga jenis yaitu:

### 1. Gempabumi utama (*main shock*)

Gempabumi utama yaitu gempabumi yang terjadi pada guncangan awal akibat deformasi yang diakibatkan oleh adanya interaksi antar lempeng.

### 2. Gempabumi susulan (*aftershock*)

Gempabumi susulan merupakan gempa bumi yang terjadi setelah datangnya gempabumi utama. Susulan berarti yang kedua, ketiga, dan seterusnya. Ia berlaku di kawasan.

### 3. Gempabumi *swarm*

Gempabumi ini terjadi di zona labil seperti batuan kapur dengan magnitudo kecil sekitar 2-3 SR.

### **3.1.3. Parameter gempa bumi**

Parameter gempa bumi merupakan informasi yang berkaitan dengan kejadian gempa bumi. Parameter gempa bumi ini meliputi waktu kejadian (*origin time*), lokasi episenter, kedalaman sumber gempa bumi, dan magnitudo.

Waktu kejadian gempa bumi (*origin time*) adalah waktu terlepasnya akumulasi tegangan (*stress*) yang berbentuk penjalaran gelombang gempa bumi dan dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit dan detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*)

Episenter adalah titik dipermukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari hiposenter atau *focus* gempa bumi. Lokasi episenter dibuat dalam sistem koordinat kartesian bola bumi atau sistem koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur. Kedalaman sumber gempa bumi adalah jarak hiposenter dihitung tegak lurus dari permukaan bumi. Kedalaman dinyatakan oleh besaran jarak dalam satuan kilometer (km).

Intensitas gempa bumi merupakan ukuran gempa bumi yang pertama kali digunakan untuk menyatakan besar gempa bumi sebelum manusia dapat mengukur besarnya gempa bumi dengan alat. Ukuran ini dapat diketahui dengan cara melakukan pengamatan langsung efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan dan lingkungan pada suatu lokasi tertentu.

Magnitudo gempa bumi adalah parameter gempa bumi yang berhubungan dengan besarnya kekuatan gempa bumi di sumbernya. Jadi pengukuran magnitudo yang dilakukan di tempat yang berbeda, harus menghasilkan harga yang sama walaupun gempa bumi yang dirasakan di tempat-tempat tersebut tentu berbeda.

#### **3.1.4 Gelombang Seismik**

Gelombang seismik adalah gelombang mekanis yang muncul akibat adanya gempa bumi, sedangkan gelombang secara umum adalah fenomena perambatan gangguan dalam medium sekitarnya. Gangguan ini mula-mula terjadi secara lokal yang menyebabkan terjadinya osilasi atau pergeseran kedudukan partikel-partikel medium, osilasi tekanan maupun osilasi rapat massa, karena gangguan merambat dari suatu tempat ke tempat lain, berarti ada transportasi energi. Gelombang seismik disebut juga gelombang elastik karena osilasi partikel-partikel medium terjadi akibat interaksi antara gaya gangguan (*gradien stress*) melawan gaya-gaya elastik.

Gelombang seismik dapat diklasifikasikan menjadi dua kelompok:

### 1. Gelombang Badan

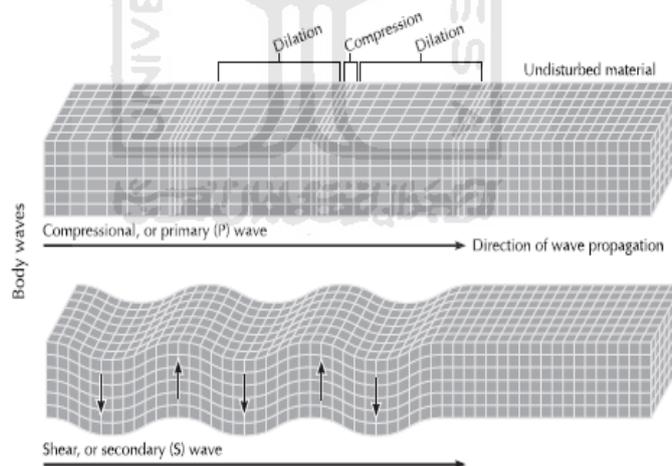
Gelombang badan adalah gelombang yang merambat dalam badan medium, yang berarti juga dapat merambat dipermukaan medium, yang mana dapat dibedakan menjadi dua jenis:

#### a. Gelombang primer ( $P$ ) atau gelombang longitudinal.

Gelombang  $P$  atau gelombang mampatan (*compression wave*), adalah gelombang yang arah geraknya sejajar dengan arah arah perambatan gelombang. Gelombang ini dapat merambat di media padat maupun cair. Semakin padat media yang dilewati kecepatannya semakin besar.

#### b. Gelombang sekunder ( $S$ ) atau gelombang transversal.

Gelombang  $S$  atau gelombang sekunder (*shear wave*) adalah gelombang yang arah geraknya tegk lurus dengan arah perambatan gelombang. Gelombang ini tidak dapat merambat pada medium cair.



Gambar 3.2 Gelombang Primer dan Gelombang Sekunder

### 2. Gelombang permukaan.

Gelombang permukaan adalah gelombang yang terjadi akibat interaksi antara gelombang badan dengan bagian permukaan lapisan bumi terpandu oleh suatu

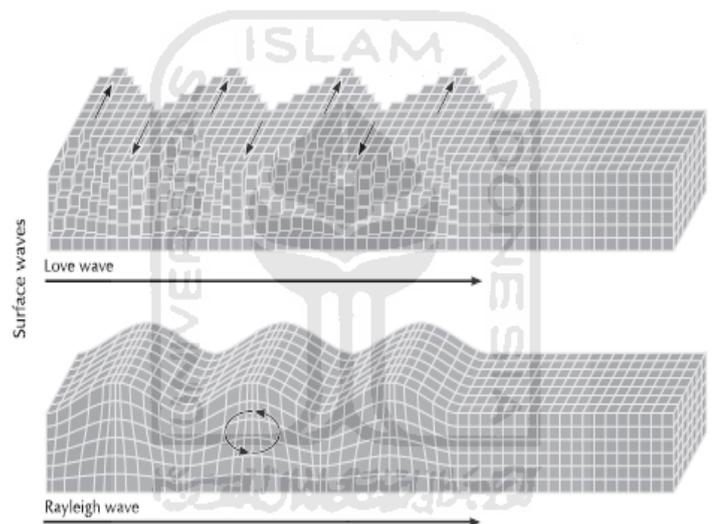
permukaan bidang batas medium. Gelombang permukaan dapat dibedakan menjadi dua jenis:

a. Gelombang *Rayleigh (R)*

Gelombang Rayleigh adalah getaran partikel batuan yang bergerak melingkar (*circular orbit*) berbentuk ellips terhadap arah perambatan gelombang.

b. Gelombang *Love (L)*

Gelombang Love adalah getaran partikel dengan yang dihasilkan dari interaksi antara SH-waves dengan permukaan tanah lunak dan tidak memiliki komponen gerakan horizontal dari partikel.



Gambar 3.3 Gelombang Love dan Gelombang Rayleigh

## 3.2 Kondisi Geologi dan Kegempaan Regional

### 3.2.1 Kondisi Geologi Yogyakarta

Daerah penelitian merupakan bagian dari zona kaki gunung Merapi, yang terdiri dari deposit *fluviovulcanic Kuartar*. MacDonald & Partners (1984), mengkategorikan endapan Kuartar menjadi beberapa formasi, yaitu formasi Merapi Tua, Formasi Sleman, dan Formasi Yogyakarta. Daerah penelitian merupakan bagian dari Formasi Yogyakarta (MacDonald & Partners, 1984). Berdasarkan pada lubang bor Data Formasi Sleman di bawah Formasi

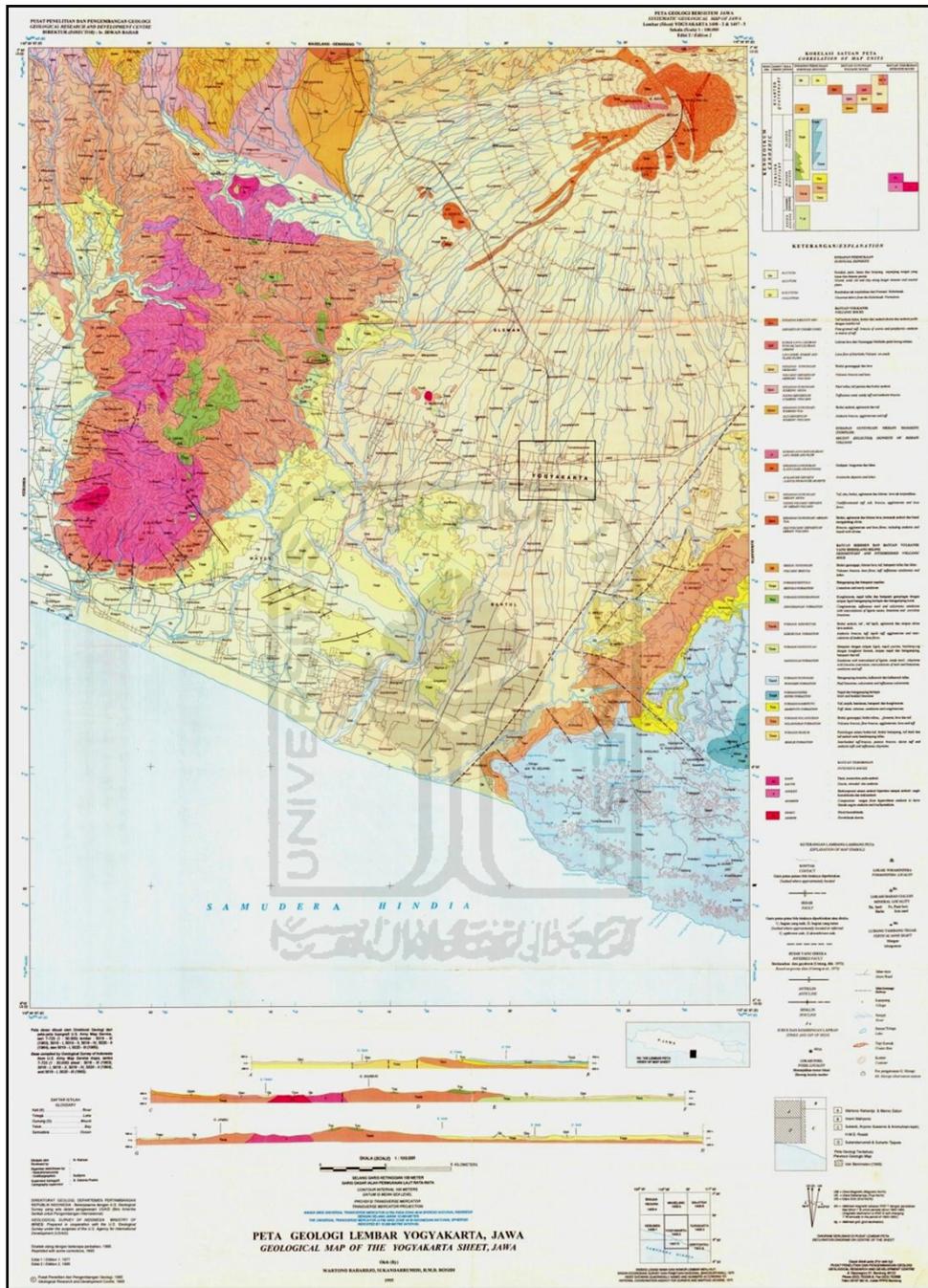
Yogyakarta, dan di bawah Formasi Sleman, ada Formasi Sentolo, yang sebagian besar terdiri dari batu kapur, juga terdiri dari napal, tufa, dan konglomerat.

Menurut peta geologi lembar Yogyakarta (Rahardjo dkk, 1977), batuan yang menyusun wilayah Yogyakarta secara umum dapat dibedakan menjadi endapan permukaan, batuan sedimen yang berselingan dengan batuan vulkanik serta batuan terobosan. Batuan endapan permukaan terdiri dari endapan rombakan gunungapi, endapan aluvium dan endapan koluvium. Sedangkan batuan terobosan berupa andesit seperti ditunjukkan pada gambar

Memiliki tujuh belas jenis batuan yang berumur kuarter dan tersier, batuan kuarter tersebut penyusunnya adalah batuan endapan permukaan aluvium (Qa), endapan permukaan koluvium (Qc), endapan rombakan bahan vulkanik yang berdampingan dengan endapan aluvium sungai atau dikenal dengan endapan gunung Merapi muda (Qmi) dan endapan longsor dari gunung Merapi (na). Sedangkan batuan yang berumur tersier penyusunnya berupa batuan sedimen yang berselingan dengan batuan vulkanik dan batuan terobosan.

Batuan sedimen yang berselingan dengan batuan vulkanik antara lain formasi langgrang (tmn), formasi sambipitu (Tms), formasi semilir (Tmse), formasi sentolo (Tmps), formasi wonosari (Tmwl), formasi jonggrangan (Tmj), formasi kepek (Tmpk), formasi kebobutak (Tmok) dan formasi nanggulan (teon). Untuk melihat persebaran batuan dapat dilihat pada gambar 2.11. Batuan yang menyusun daerah ini terdiri atas empat kelompok batuan yakni kelompok batuan Pra-Tersier, Tersier, Kuarter dan Holosen. Kelompok batuan Pra-Tersier berupa batuan malihan yang terdiri dari skiss dan filit merupakan bagian dari batuan tertua di daerah ini. Kelompok batuan Tersier (Formasi Nanggulan, Kebo Butak, Semilir, Nglanggran, Sambipitu, Jonggrangan, Sentolo, Wonosari dan Kepek).

Pada formasi-formasi tersebut dijumpai batuan batuan sedimen laut di bagian bawah (tua) sedangkan bagian atas (muda) terdiri dari perselingan antara sedimen laut dan sedimen gunungapi. Kelompok batuan Kuarter terdiri dari endapan gunung api Merapi, Merbabu dan Sumbing sedangkan kelompok batuan Holosen umumnya terdiri dari produk gunung Merapi sekarang, endapan sungai dan endapan beting pantai.



Gambar 3.4 Peta geologi lembar Yogyakarta (Rahardjo dkk, 1977)

Selain batuan tersebut di atas, di daerah ini dijumpai juga batuan terobosan berupa Dasit, Andesit dan Diorit yang berumur Miosen. Daerah kerusakan gempabumi Yogyakarta umumnya terkonsentrasi pada daerah-daerah yang disusun oleh sedimen gunungapi Merapi yang berumur Kuartar. Selain itu daerah kerusakan dapat pula dijumpai di daerah-daerah yang disusun oleh batuan Holosen berupa endapan sungai dan gosong pantai. Daerah-daerah kerusakan yang terletak pada batuan Tersier umumnya selain di kontrol oleh sifat fisik batuan yang telah lapuk, juga di kontrol oleh adanya sesar-sesar gempa. Dalam peta geologi di atas Patahan Opak digambarkan sederhana sebagai patahan turun, karena memang tidak mudah melihat bidang patahannya yang diperkirakan tertutup oleh endapan Merapi muda.

### **3.2.2 Sejarah Kegempaan Yogyakarta**

Sejarah kegempaan Jawa antara tahun 1840 hingga 2006 mencatat bahwa daerah Yogyakarta sudah beberapa kali mengalami gempabumi merusak. Gempabumi yang pertamakali tercatat adalah Gempabumi Purworejo (1840). Menurut Newcomb & McCann (1987) gempabumi ini terjadi pada tanggal 4 Januari 1840. Daerah yang mengalami kerusakan meliputi Kebumen, Purworejo, Bantul, Salatiga, Demak, Semarang, Kendal, dan Banjarnegara. Selanjutnya adalah gempabumi besar pada tanggal 10 Juni 1867 menyebabkan 372 rumah roboh dan 5 orang meninggal (Newcomb & McCann, 1987). Getaran gempabumi ini terasa hingga Klaten, Salatiga, Surakarta, dan Sragen. Gempabumi besar juga terjadi pada tanggal 23 Juli 1943. Kota-kota yang mengalami kerusakan adalah Cilacap, Tegal, Purwokerto, Kebumen, Purworejo, Bantul, dan Pacitan. Korban meninggal sebanyak 213 orang, sedangkan korban luka mencapai 2.096 jiwa (Bemmelen, 1949). Terakhir adalah Gempabumi pada tanggal 27 Mei 2006. Meskipun kekuatan gempabumi ini relatif kecil ( $M=6.4$ ), namun mengakibatkan lebih dari 6000 korban meninggal (Walter *et al.*, 2008).

Tabel 2.2 Sejarah gempa merusak di Yogyakarta

| Tanggal    | Episenter |        | Hipo. (km) | Mag. | Keterangan  |
|------------|-----------|--------|------------|------|---|
|            | Lintang   | Bujur  |            |      |   |
| 04-01-1840 | -         | -      | -          | -    | Disertai tsunami  |
| 20-10-1859 | -         | -      | -          | -    | Disertai tsunami  |
| 10-06-1867 | -         | -      | -          | -    | 500 orang tewas, ribuan rumah rusak                                     |
| 28-03-1875 | -         | -      | -          | -    | Dirasakan pada V-VII MMI  |
| 27-09-1937 | 8,88      | 110,65 | -          | 7,2  | VII-IX, 2.200 rumah roboh   |
| 23-07-1943 | 8,60      | 109,90 | 90         | 8,1  | 213 orang tewas, 15.275 rumah rusak                                     |
| 12-10-1957 | 8,30      | 110,30 | -          | 6,4  | Dirasakan pada VI MMI   |
| 14-03-1981 | 7,20      | 109,30 | 33         | 6,0  | Dirasakan pada VII MMI  |
| 09-06-1992 | 8,47      | 111,10 | 56         | 6,5  | Dirasakan pada IV MMI   |
| 25-05-2001 | 8,62      | 110,10 | 50         | 6,2  | Dirasakan pada IV MMI   |
| 19-08-2004 | 9,22      | 109,50 | 55         | 6,3  | Dirasakan pada IV MMI   |
| 27-05-2006 | 7,96      | 110,45 | 15         | 6,4  | Lebih dari 6.000 orang tewas, 1.000.000 orang kehilangan tempat tinggal |

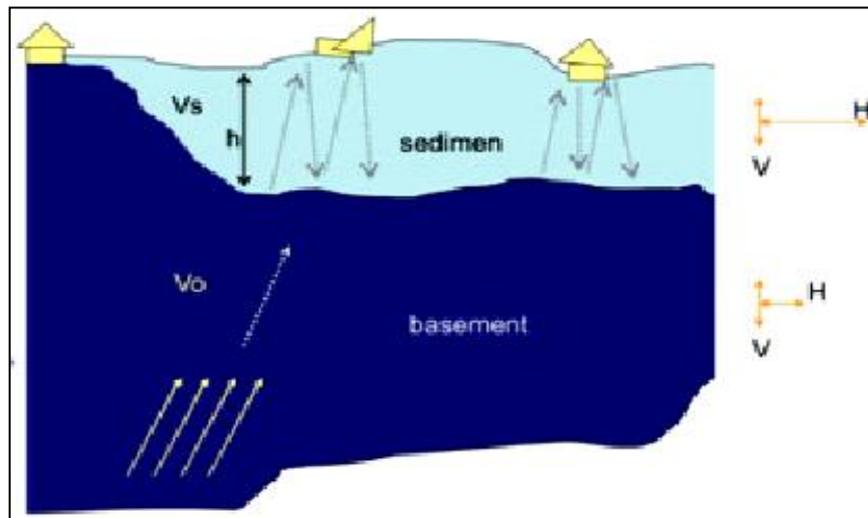
Sumber: Newcomb dan McCann (1987); Utsu (2002); Elnashai *et al.*(2006), dan Walter *et al.* (2007)

### 3.3 Mikrotremor dan HVSR

#### 3.3.1 Mikrotremor

Mikrotremor adalah sebutan untuk gelombang seismik yang beramplitudo rendah sering juga disebut mikroseismik. Amplitudo gelombang mikrotremor berkisar  $10^{-4}$  sampai dengan  $10^{-2}$  mm (Okada, 2003). Mikrotremor menggambarkan medan gelombang dengan energi yang terdiri dari interferensi penjalaran gelombang dari berbagai sumber dan arah di berbagai frekuensi. Mikrotremor dengan frekuensi lebih dari 1Hz pada umumnya berkaitan dengan kegiatan manusia, lalu lintas, kereta, mesin dan sebagainya. Sedangkan yang bernilai kurang dari 1Hz dikaitkan dengan fenomena alam seperti angin, gerak gelombang dan variasi tekanan atmosfer. Karakteristik rekaman getaran (*seismogram*) dari mikrotremor berubah terhadap kondisi geomorfologis.

Seismogram di dataran aluvial lunak memiliki amplitudo lebih tinggi dengan durasi lebih panjang, sementara seismogram di batuan dasar amplitudonya sangat rendah dengan durasi pendek. Ilustrasinya seperti terlihat pada Gambar 3.4



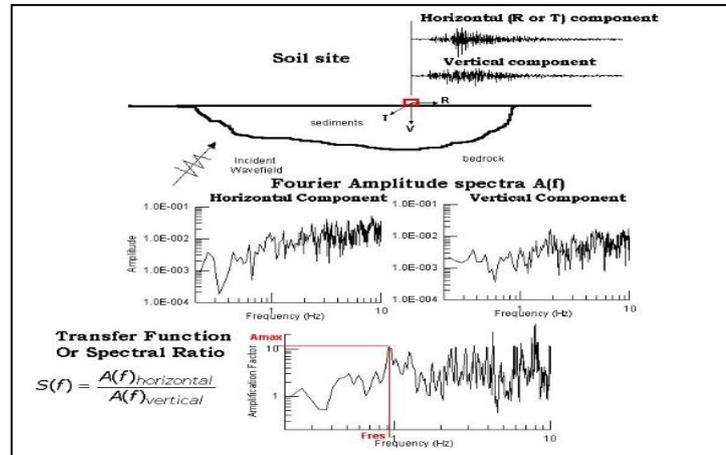
Gambar 3.4 Karakteristik seismogram mikrotremor

Data mikrotremor dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik dinamik lapisan tanah permukaan. Salah satu metode yang digunakan dalam analisis mikrotremor adalah Metode Nakamura atau disebut juga metode *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* (HVSr).

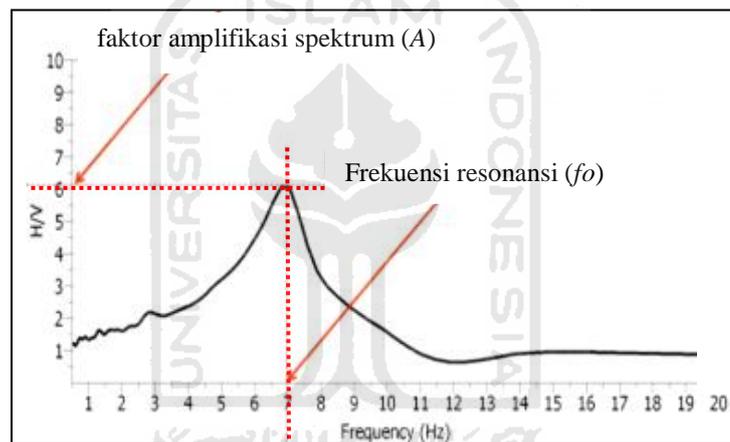
### 3.3.2 Prinsip dasar metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr)

Metode ini pertama kali diperkenalkan oleh Nogoshi dan Igarashi (1971) kemudian dimodifikasi dan dikembangkan oleh Yutaka Nakamura (Nakamura, 1989). Metode HVSr menggunakan data dari rekaman getaran (*seismogram*) mikrotremor 3 komponen, yaitu komponen horisontal N-S, horisontal E-W dan komponen vertikal. Pada *seismogram* tersebut dilakukan transformasi Fourier Cepat (*Fast Fourier Transform*) pada setiap komponennya menghasilkan spektrum fourier 3 komponen. Dari spektrum fourier ini diperoleh rasio amplitudo spektrum antara komponen horisontal terhadap vertikal (HVSr) dari sinyal rekaman mikrotremor. Prinsip metode HVSr diilustrasikan pada Gambar 3.5.

Hasil analisis HVSr menghasilkan sebuah spektrum HVSr dengan puncak spektrum pada frekuensi resonansinya. Frekuensi resonansi ( $f_0$ ) dan puncak spektrum mikrotremor ( $A$ ) merupakan parameter yang mencerminkan karakteristik dinamika lapisan tanah permukaan, diilustrasikan Gambar 3.6.



Gambar 3.5. Ilustrasi prinsip metode HVSR mikrotremor



Gambar 3.6 Frekuensi resonansi  $f_0$  dan puncak spektrum (A)

Metode HVSR berguna untuk mengidentifikasi respon resonansi pada cekungan yang berisi material sedimen. Fenomena resonansi dalam lapisan sedimen yakni terjebakanya gelombang seismik di lapisan permukaan karena adanya kontras impedansi antara lapisan sedimen dengan lapisan batuan keras yang lebih dalam. Interferensi antar gelombang seismik yang terjebak pada lapisan sedimen berkembang menuju pola resonansi yang berkenaan dengan karakteristik lapisan sedimen.

### 3.4 Site effect

Karakteristik geologi permukaan dan geoteknik dari tanah mempunyai peran penting dalam kaitannya dengan getaran seismik tanah. Variasi parameter getaran tanah berupa amplitudo, kandungan frekuensi dan durasi dikenal dengan *site effect*. *Site effect* utamanya terjadi karena adanya kontras impedansi antara lapisan tanah dengan batuan dasar (*bedrock*).

Pada umumnya *site effect* didefinisikan sebagai modifikasi (perubahan) dari karakteristik gelombang yaitu amplitudo, kandungan frekuensi dan durasi terhadap kondisi lapisan soil dan topografi permukaan. Modifikasi ini termanifestasikan sebagai amplifikasi ataupun deamplifikasi dari amplitudo gelombang dalam semua frekuensi, yang tergantung pada banyak parameter, diantaranya  $PI$ ,  $v_s$ ,  $v_p$ ,  $G_0$ , modulus geser, dan lain-lain.

Pengaruh dari kondisi geologi lokal dan kondisi soil terhadap intensitas getaran gempa dan kerusakan yang terjadi karena gempa telah di ketahui semenjak dahulu. Guthenberg (1927) dalam Thomso and Silva (2013), mengembangkan faktor amplifikasi dari rekaman microseismik pada lokasi-lokasi yang berbeda kondisi bawah permukaannya. Kondisi *site* lokal secara mendalam mempengaruhi semua karakteristik penting yaitu parameter amplitudo, kandungan frekuensi dan durasi dari gerakan gempa. Besarnya pengaruh tergantung pada bentuk geometri dan sifat-sifat material bawah permukaan, kondisi topografi, dan karakteristik *input motion*.

*Site effect* mempunyai peranan penting dalam desain bangunan tahan gempa dan harus di hitung berbasis kasus ke kasus. Ini biasanya diselesaikan dengan pengembangan satu atau lebih desain *ground motion*. *Site effect* ( $T_{site}$ ) biasanya digambarkan dengan cara membandingkan spektrum antara komponen horisontal rekaman seismogram pada dataran aluvial ( $S_{HS}$ ) dengan komponen horisontal rekaman seismogram pada singkapan batuan keras ( $S_{HB}$ ) seperti ditunjukkan Gambar 3.7.

Jika fungsi transfer komponen horisontal dan vertikal dari mikrotremor di permukaan tanah dan di batuan dasar dinotasikan sebagai  $T_H$  dan  $T_V$  dimana :

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.1)$$

Beberapa asumsi yang digunakan dalam metode Nakamura diantaranya adalah :

1. Data mikrotremor terdiri atas beberapa jenis gelombang, utamanya adalah gelombang Rayleigh yang merambat pada lapisan sedimen di atas batuan dasar.
2. Efek gelombang Rayleigh ( $T_V$ ) pada noise terdapat pada spektrum komponen vertikal didataran aluvial ( $S_{VS}$ ), tetapi tidak terdapat pada spektrum komponen vertikal di batuan dasar ( $S_{VB}$ )

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.2)$$

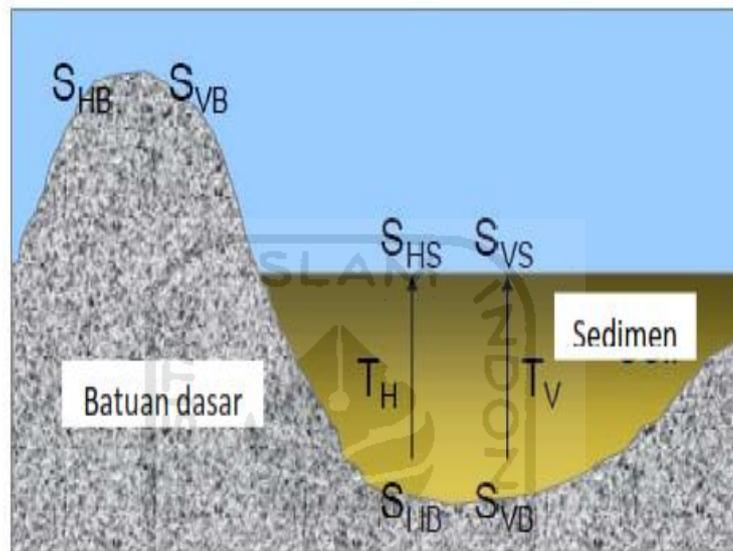
3. Komponen vertikal mikrotremor tidak teramplifikasi oleh lapisan sedimen didataran aluvial
4. Efek gelombang Rayleigh pada rekaman mikrotremor adalah ekuivalen untuk komponen vertikal dan horisontal. Untuk rentang frekuensi lebar (0.2 – 20.0 Hz), rasio spektrum antara komponen horisontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu.
5. Pada kondisi tersebut rasio spektrum antara komponen horisontal dan vertikal dari mikrotremor yang terekam dipermukaan memungkinkan efek gelombang Rayleigh untuk dieliminasi, menyisakan hanya efek yang disebabkan oleh kondisi geologi lokal. Ini merupakan konsep dasar metode Horizontal to Vertical Spectrum Ratio atau yang populer disebut sebagai metode HVSR ditulis :

$$T_{site} = \frac{T_H}{T_V} = \frac{S_{HS} \cdot S_{VB}}{S_{HB} \cdot S_{VS}} \quad (3.3)$$

$$T_{site} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3.4)$$

$T_{site}$  ini merupakan nilai puncak dari kurva HVSR yang merupakan faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) yang terjadi pada saat frekuensi resonansi, sehingga :

$$T_{site} = A_g = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \sqrt{\frac{(S_{NE})^2 + (S_{EW})^2}{S_V}} \quad (3.5)$$



Gambar 3.7 Model cekungan yang berisi material sedimen (Nakamura, 2000)

### 3.5 Faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ )

Sinyal gempa berupa gelombang seismik tiba di suatu tempat dipengaruhi oleh sumber gempa (*source activation*), jalur penjalaran sinyal (*propagation path*), efek geologi lokal (*effect of local geology*). Amplifikasi maupun deamplifikasi dapat terjadi karena kondisi geologi lokal yang dapat menyebabkan perubahan karakteristik gelombang seismik yang datang.

Faktor amplifikasi spektrum tanah merupakan rasio spektrum fourier yang dihasilkan pengolahan data rekaman mikrotremor di titik ukur dipermukaan tanah menggunakan metode HVSR. Menurut Nakamura *et al.* (2000) nilai faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) dapat diketahui dari tinggi puncak spektrum kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor yang telah diolah sehingga dihasilkan spektrum

HVSR (persamaan 3.5). Beberapa peneliti telah menemukan adanya korelasi antara puncak spektrum H/V dengan distribusi kerusakan gempa bumi (Mucciarelli et al., 1998; Nakamura et al., 2000; Panou et al., 2004). Amplifikasi merupakan dampak adanya *site effect* pada kondisi tanah permukaan.

### 3.6 Frekuensi resonansi tanah ( $f_g$ ) dan periode dominan tanah ( $A_g$ )

Kondisi tanah setempat secara substansional mempengaruhi karakteristik gelombang gempabumi selama gempabumi terjadi. Endapan tanah lunak akan memperbesar amplitudo getaran tanah, sehingga akan menambah efek kerusakan yang ditimbulkan.

Kandungan frekuensi dari suatu getaran tanah berkaitan dengan magnitudo gempa. Pada saat gelombang seismik berjalan dari suatu patahan (*fault*) komponen frekuensi yang lebih besar di serap dan disebarkan dengan lebih cepat dari pada komponen frekuensi yang lebih rendah. Sebagai akibatnya, kandungan frekuensi juga berubah terhadap jarak. Gelombang seismik pada saat menjalar, terjebak dalam lapisan tanah lunak dan fenomena multi refleksi terjadi, menghasilkan getaran tanah dengan frekuensi yang sama sehingga terjadi interferensi yang memperkuat getaran gempabumi.

Frekuensi dominan didefinisikan sebagai frekuensi dari getaran yang terjadi pada saat nilai maksimum dari spektrum amplitudo fourier (*Fourie Amplitude Spectrum*). Frekuensi yang terjadi pada saat terjadinya amplitudo maksimum dari spektrum amplitudo fourier. Frekuensi dominan berkaitan dengan periode dominan tanah. Nilai periode dominan tanah di suatu tempat berbanding terbalik dengan nilai frekuensi dominannya. Nilai frekuensi dominan tanah dapat diestimasi dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR) dari rekaman mikrotremor yang diperkenalkan secara luas oleh Nakamura (1989), seperti dijelaskan di atas, dengan diketahui frekuensi dominan tanah, diketahui periode getaran tanahnya.

Nilai periode dominan dapat digunakan untuk memperkirakan tingkat kekerasan batuan. Sedangkan frekuensi dominan dapat dipergunakan untuk memperkirakan ketebalan lapisan. Frekuensi dominan disuatu tempat dapat

mengalami resonansi dengan frekuensi bangunan jika frekuensi keduanya bernilai sama atau mendekati sama. Efek resonansi ini akan memperbesar simpangan bangunan saat terjadi goyangan yang menyebabkan bangunan mudah rusak.

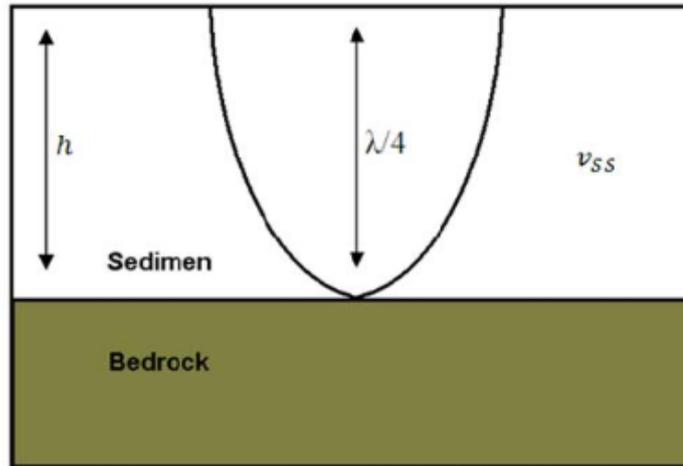
Pada daerah dengan nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) rendah rentan terhadap getaran dengan periode panjang yang dapat mengancam bangunan bertingkat tinggi (Tuladhar, 2002). Hal ini dikarenakan bangunan tinggi memiliki frekuensi dominan struktur yang rendah, sehingga menimbulkan resonansi apabila bangunan ini dibangun pada daerah yang memiliki frekuensi dominan yang rendah pula. Dengan mengetahui sebaran frekuensi dominan/resonansi pada suatu daerah dan memanfaatkannya dalam perencanaan struktur bangunan tahan gempa, diharapkan akan dapat mengurangi risiko kerusakan akibat gempa bumi di masa yang akan datang.

### 3.7 Ketebalan Sedimen Tanah

Frekuensi dominan mempunyai hubungan dengan ketebalan sedimen di suatu wilayah. Frekuensi dominan dari hasil pengukuran mikrotremor dilapangan dapat digunakan untuk mengestimasi ketebalan sedimen. Perbandingan antara frekuensi dominan observasi dan numerik juga menunjukkan adanya hubungan pengukuran mikrotremor yang tergantung pada kedalaman dan kecepatan gelombang geser. Ilustrasi sederhana berupa model struktur tanah dua lapis yaitu *bedrock* yang tertutupi lapisan lunak (sedimen) di atasnya memiliki ketebalan lapisan sedimen ( $h$ ) dan kecepatan gelombang geser rata-rata ( $v_{ss}$ ) pada lapisan lunak (sedimen). Maka persamaan frekuensi dominannya yaitu :

$$f_g = \frac{v_{ss}}{4h} \quad (3.6)$$

Notasi untuk rumusan diatas adalah  $f_g$  frekuensi dominan,  $v_{ss}$  kecepatan rata-rata gelombang geser,  $h$  ketebalan sedimen. Berdasar persamaan ini selain frekuensi dominan, kecepatan gelombang sekunder juga menentukan hasil perhitungan ketebalan sedimen.



Gambar 3.8 Model dua lapisan: *bedrock* dan sedimen (Ibs-von dan Jurgen, 1999)

### 3.8 Indeks Kerentanan seismik ( $K_g$ )

Indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) adalah indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempa bumi. Menurut Nakamura (2000), Nakamura et al. (2000), Gurler et al. (2000), Saita et al. (2004), dan Nakamura (2008), indeks kerentanan seismik diperoleh dengan mengkuadratkan nilai puncak spektrum mikrotremor dibagi frekuensi resonansi, yang dirumuskan sebagai:

$$K_g = \frac{A_g^2}{f_g} \quad (3.7)$$

Notasi dalam persamaan (3.6) tersebut adalah:  $K_g$  (indeks kerentanan seismik),  $A_g$  (puncak spektrum HVSR), dan  $f_g$  (frekuensi resonansi tanah, Hz).

Nilai indeks kerentanan seismik dapat memberikan informasi potensi tingkat guncangan akibat gempa bumi pada suatu daerah. Efek lokal yang menyebabkan kerusakan saat gempa bumi berkorelasi dengan parameter HVSR mikrotremor, yang dicirikan oleh frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ) rendah (periode tinggi) dan faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) tinggi. Indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) menunjukkan korelasi hubungan antara amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) dengan frekuensi dominan ( $f_g$ ).

Data faktor amplifikasi spektrum tanah dan frekuensi natural hasil HVSR, tidak berkorelasi. Dengan demikian, mikrozonasi dengan mempertimbangkan

keduanya agak rumit. Untuk itu, diperkenalkan parameter lain, dalam hal ini indeks kerentanan tanah. Menurut Nakamura (2000), Nakamura et.al (2000), indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) dapat di hitung dari nilai faktor amplifikasi dan frekuensi dominan seperti ditunjukkan oleh persamaan 3.7.

### **3.9 Percepatan puncak anah (*Peak Ground Acceleration*)**

Percepatan adalah parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai pada kecepatan tertentu. Percepatan getaran tanah merupakan gangguan yang perlu dikaji untuk setiap gempa bumi, kemudian dipilih percepatan getaran tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) untuk dipetakan agar bisa memberikan pengertian tentang efek paling parah yang pernah dialami suatu lokasi (Edwiza, 2008).

Percepatan getaran tanah maksimum adalah nilai percepatan getaran tanah yang terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat yang diakibatkan oleh gempa bumi. Semakin besar nilai PGA yang pernah terjadi di suatu tempat, semakin besar bahaya dan risiko gempa bumi yang mungkin terjadi. Efek primer gempa bumi adalah kerusakan struktur bangunan baik yang berupa gedung perumahan rakyat, gedung bertingkat, fasilitas umum, monumen, jembatan dan infrastruktur struktur lainnya, yang diakibatkan oleh getaran yang ditimbulkannya.

Secara garis besar, tingkat kerusakan yang mungkin terjadi tergantung dari kekuatan dan kualitas bangunan, kondisi geologi dan geotektonik lokasi bangunan, dan percepatan tanah di lokasi bangunan akibat dari getaran suatu gempa bumi. Faktor yang merupakan sumber kerusakan dinyatakan dalam parameter percepatan tanah sehingga data PGA akibat getaran gempa bumi pada suatu lokasi menjadi penting untuk menggambarkan tingkat bahaya gempa bumi di suatu lokasi tertentu.

Pengukuran percepatan tanah dilakukan dengan *accelerograph* yang dipasang di lokasi penelitian. Akan tetapi apabila tidak dapat dilakukan pengukuran di lokasi penelitian pengukuran percepatan tanah dapat dilakukan dengan cara empiris, yaitu dengan pendekatan dari beberapa rumus yang diturunkan dari parameter gempa bumi. Perumusan ini tidak selalu benar bahkan

dari satu metode ke metode lainnya tidak selalu sama, namun cukup memberikan gambaran umum tentang PGA.

Getaran gempa yang terasa dipermukaan tanah merupakan rambatan dari energi gempa dari sumbernya. Suatu benda yang bergerak dalam suatu media dan mengalami perubahan kecepatan maka akan mempunyai percepatan. Sebagaimana parameter gempa yang lain, percepatan tanah juga mengalami atenuasi, berkurangnya nilai parameter gempa karena pengaruh jarak dan pengaruh-pengaruh lainnya.

Pada umumnya *peak ground acceleration* diplot sebagai fungsi dari jarak untuk suatu magnitudo dan kondisi tanah tertentu. Fungsi atenuasi dapat diturunkan dari hasil regresi data percepatan gempa maupun percepatan gempa sintetis yang diperoleh dari model numerik. Fungsi atenuasi yang diturunkan dari data percepatan suatu wilayah mungkin tidak dapat digunakan di wilayah yang lain. Karena tidak adanya cukup data untuk menurunkan suatu fungsi atenuasi untuk wilayah Indonesia, pemakaian fungsi atenuasi dari tempat lain tidak dapat dihindari.

Banyak peneliti telah merumuskan atenuasi gelombang seismik (gelombang gempa). Pada generasi awal penentuan besarnya PGA (*peak ground acceleration*) adalah percepatan di batuan dasar, penentuan besarnya PGA hanya menggunakan parameter jarak epicenter dan magnitudo gempa bumi. Kemudian rumusan PGA berkembang dengan mempertimbangkan kondisi tanah dan pola patahan sumber gempa, sampai pada generasi atenuasi NGA (*New Generation Atenuation*) yang lebih kompleks. Penelitian ini menggunakan atenuasi percepatan tanah di batuan dasar (*baserock*) yang dirumuskan oleh Campbell (1989) dan rumusan atenuasi Kanai yang menambahkan parameter periode dominan tanah dalam rumus atenuasi.

Persamaan Campbell (1989), yang digunakan dalam penelitian ini merupakan salah satu persamaan percepatan tanah di batuan dasar. Persamaan ini menggunakan parameter gempa Magnitudo Lokal ( $M_L$ ) dalam perhitungan atenuasi, persamaan lengkapnya adalah sebagai berikut :

$$\ln Y = -2.501 + 0.623.M_L - \ln(R + 7,28) \quad (3.8)$$

dengan  $Y$  (atenuasi percepatan tanah, g),  $M_L$  (magnitudo lokal gempa bumi) dan  $R$  (jarak sumber gempa, Km).

Percepatan tanah permukaan disuatu tempat menurut rumusan atenuai Kanai yang disebabkan oleh getaran seismik bergantung pada perambatan gelombang seismik dan karakteristik lapisan tanah (*alluvial deposit*) ditempat tersebut (Kanai, 1966). Sifat-sifat lapisan tanah salah satunya ditunjukkan oleh periode dominan (*predominant period*) dari lapisan tanah tersebut bila ada getaran seismik. Periode getaran seismik dan periode dominan tanah akan mempengaruhi nilai percepatan batuan pada lapisan batuan dasar (*baserock*) dan pada permukaan (*ground surface*). Sedangkan perbedaan respon seismik pada batuan dasar dan permukaan tanah akan menentukan faktor perbesaran  $G(T)$ . Berdasarkan hal-hal tersebut di atas Kanai mengusulkan salah satu metode perhitungan nilai percepatan getaran tanah maksimum dipermukaan yang memperhitungkan karakteristik lapisan tanah (*alluvial deposit*) berupa periode dominan, yang ikut berpengaruh terhadap percepatan tanah maksimum suatu tempat (Doughlas, 2003 dalam Brotospito, 2006), yang dirumuskan sebagai berikut :

$$\alpha_g = G(T)\alpha_0 \quad (3.9)$$

dengan :

$$\alpha_0 = \frac{i}{T} 10^{0.61M - (1.66 + \frac{3.66}{R}) \log R + 0.167 - \frac{1.83}{R}} \quad (3.10)$$

dan

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2 + \left(\frac{0.2 T}{\sqrt{T_0} T_0}\right)^2}} \quad (3.11)$$

Bila terjadi resonansi ( $T=T_0$ ) maka harga  $G(T)$  akan mencapai maksimum. Gelombang yang melalui lapisan sedimen akan menimbulkan resonansi yang disebabkan karena gelombang gempa bumi mempunyai spektrum yang lebar sehingga hanya gelombang gempa bumi yang sama dengan periode dominan

tanah dari lapisan sedimen yang diperkuat. Percepatan tanah pada permukaan akan menjadi maksimum yang ditulis dengan persamaan berikut :

$$\alpha_g = \frac{5}{\sqrt{T_0}} 10^{0.61M - 1.66 + \frac{36}{R} \log R + 0.167 \frac{1.83}{R}} \quad (3.12)$$

Notasi dalam rumus diatas adalah ,

$G(T)$  = faktor perbesaran

$\alpha_0$  = percepatan tanah pada baserock (gal)

$\alpha_g$  = nilai percepatan tanah titik pengukuran (gal)

$T_0$  = periode dominan tanah titik pengukuran (s)

$T$  = periode gelombang gempabumi (s)

$M$  = magnitudo gempabumi (Skala Richter)

$R$  = jarak hipocenter (km)

### 3.10 Perambatan gelombang geser 1 dimensi (PGA dengan *Non Liniear*

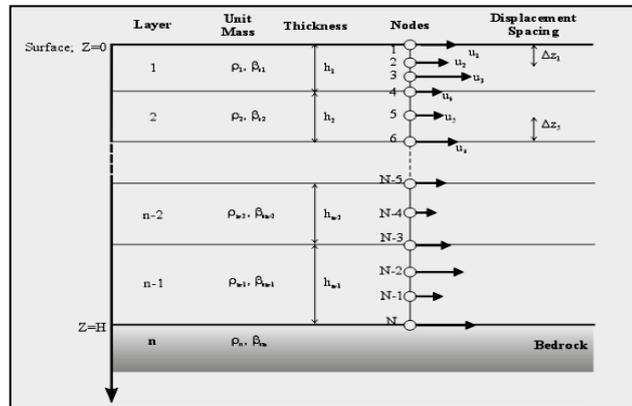
#### *Earthquake Site Response Analysis - NERA)*

Analisis perambatan gelombang geser 1 dimensi didasarkan pada asumsi bahwa lapisan tanah menerus horisontal dan respon tanah sebagian besar diakibatkan oleh gelombang geser horisontal (*SH-wave*) yang merambat vertikal dari batuan dasar ke permukaan. Teori ini dikemukakan pertama kali oleh Kanai (1951) dan dikembangkan lebih lanjut oleh Lysmer, *et.al* (1951).

Teori yang dipergunakan dalam analisis ini memperhitungkan respon yang berhubungan dengan perambatan vertikal dari gelombang geser melewati suatu sistem viskoelastik linier seperti terlihat pada Gambar 3 .8. Sistem tersebut terdiri dari N lapisan horisontal, yang memanjang tidak terhingga dalam arah horisontal dan lapisan dasar dianggap sebagai sebuah sistem *half space*. Masing-masing lapisan adalah homogen dan isotropik dengan parameter ketebalan ( $h$ ), *mass density*( $\rho$ ) , *shear modulus* ( $G$ ), kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) dan faktor damping ( $D$ ). Perambatan gelombang vertikal melauai sistem ini seperti terlihat pada Gambar 3.8 hanya menyebabkan perpindahan dalam arah horisontal, yang harus memenuhi persamaan gelombang :

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \eta \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial \tau}{\partial z} \quad (3.13)$$

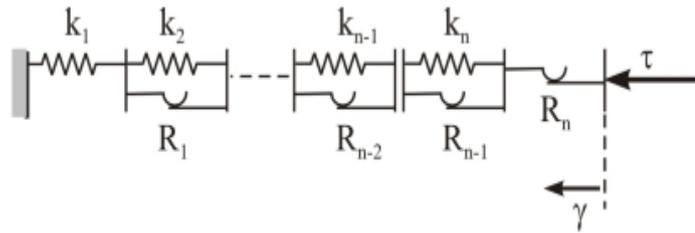
Notasi diatas adalah,  $\rho$  adalah rapat masa  $\text{kg/m}^3$ ,  $\eta$  koefisien damping tanah.



Gambar 3.9 Sistem perambatan satu dimensi (Bardet and Tobita, 2010)

Analisis perambatan gelombang dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu menggunakan pendekatan linear ekuivalen atau menggunakan metode nonlinear. Pendekatan pertama dapat dianalisa dengan menggunakan program SHAKE (Schnabel et. al, 1972) atau EERA (Bardet et. al 2000). Penelitian ini menggunakan metode nonlinier dengan bantuan program NERA (Bardet dan Tobita., 2001) untuk analisis. Program ini merupakan pengembangan program SHAKE dan EERA. Program ini menggunakan model material yang dikembangkan oleh Iwan (1967) dan Mroz (1967) untuk memodelkan perilaku nonlinier dari tanah dan juga berdasarkan solusi menerus dari persamaan gelombang (Kanai, 1951) disesuaikan untuk penggunaan *transient motions* dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (Colley dan Tukey, 1965). Model ini lazim juga disebut IM model.

Model ini menggunakan suatu deret elemen mekanik yang disebut *slider* dengan kekauan dan tahanan geser ( $R_i$ ) yang berlainan. *Slider* memiliki tahanan meningkat antara satu *slider* ke *slider* yang berikutnya ( $R_1 < R_2 < \dots < R_n$ ). Gambaran skematik tentang model tegangan-regangan yang digunakan dalam model IM dapat dilihat dalam Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Representasi skematik Sistem Model IM (Bardet and Tobita, 2010).

Kelebihan model nonlinier ini dibandingkan pendekatan linier ekivalen (Kramer, 1966) adalah :

1. Kekakuan dari kondisi tanah yang aktual berubah sepanjang kejadian gempa sehingga kondisi amplifikasi yang sangat tinggi yang terjadi jika digunakan pendekatan linier tidak akan terjadi dalam kondisi sesungguhnya di lapangan.
2. Metode nonlinier dapat digunakan untuk memodelkan redistribusi atau dissipasi eksese tegangan air tanah selama dan setelah kejadian gempa bumi.

### 3.11 *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, dalam penelitian ini digunakan atenuasi Boore et.al. Atenuasi ini digunakan karena atenuasi ini untuk menghitung spektra percepatan akibat gempa *shallow crustal* dan mempunyai standar error relatif rendah dibandingkan yang lain.
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. Mentrasformasi fourier spektra desain menjadi *time history* percepatan desain.

Perhitungan spektra target dalam penelitian ini menggunakan persamaan atenuasi Boore et.al pada batuan yaitu :

$$\ln Y = b_1 + b_2(M - 6) + b_3 (M - 6)^2 + b_5 \ln R + b_v \ln \frac{v_s}{v_a} \quad (3.14)$$

Notasi dalam persamaan ini adalah :

$$R^2 = r_{jb}^2 + h^2$$

$B_1 = r_{b1ss}$  untuk strike slip

=  $r_{b1RS}$  untuk reverse slip

=  $r_{1ALL}$  untuk mekanisme yang tidak ditentukan

M = Momen magnitude (Mw)

$R_{jb}$  = jarak terdekat dengan bidang patahan (km)

$V_s$  = kecepatan gelombang geser (m/s)

Y = nilai PGA dalam g

Persamaan ini menggunakan ukuran kuantitatif (kecepatan gelombang geser pada 30 m lapisan teratas) untuk merepresentasikan kondisi lokal tanah dan merekomendasikan penggunaannya seperti pada Tabel 3.2.

Table 3.1 Nilai-nilai Konstanta atenuasi Boore et.al

| Periode (s) | b1ss   | b2    | b3     | b5     | bv     | va   | h    |
|-------------|--------|-------|--------|--------|--------|------|------|
| PGA         | -0.313 | 0.527 | 0      | -0.778 | -0.371 | 1396 | 5.57 |
| 0.10        | 1.006  | 0.753 | -0.226 | -0.934 | -0.212 | 1112 | 6.27 |
| 0.20        | 0.999  | 0.711 | -0.207 | -0.924 | -0.292 | 2118 | 7.02 |
| 0.30        | 0.598  | 0.711 | -0.161 | -0.893 | -0.401 | 2133 | 5.94 |
| 0.40        | 0.212  | 0.769 | -0.12  | -0.867 | -0.487 | 1954 | 4.91 |
| 0.50        | -0.112 | 0.831 | -0.09  | -0.846 | -0.553 | 1782 | 4.13 |
| 0.75        | -0.737 | 0.884 | -0.046 | -0.813 | -0.653 | 1507 | 3.07 |
| 1.00        | -1.133 | 0.979 | -0.032 | -0.798 | -0.698 | 1406 | 2.9  |
| 1.50        | -1.552 | 1.036 | -0.044 | -0.796 | -0.704 | 1479 | 3.92 |
| 2.00        | -1.699 | 1.085 | -0.085 | -0.812 | -0.655 | 1795 | 5.85 |

Tabel 3.2 Rekomendasi nilai kecepatan gelombang geser rata-rata untuk digunakan dalam fungsi atenuasi Boore et.al

| Kelas site         | Kecepatan gelombang geser |
|--------------------|---------------------------|
| NEHRP kelas site B | 1070 m/dt                 |
| NEHRP kelas site C | 520 m/dt                  |
| NEHRP kelas site D | 250 m/dt                  |
| Rock               | 620 m/dt                  |
| Soil               | 310 m/dt                  |

### 3.12 Karakteristik dinamik tanah

Selama terjadinya gempa akan terjadi penjalaran gelombang dari batuan dasar ke permukaan tanah. Dalam penjalarnya gelombang gempa akan mengalami amplifikasi atau deamplifikasi. Perjalanan perambatan gelombang sangat dipengaruhi oleh karakteristik dinamik tanah atau sifat-sifat dinamik tanah yang dilewati oleh gelombang gempa. Sifat dan penyebaran kerusakan akibat gempa terutama dipengaruhi oleh respons tanah terhadap beban siklik. Respons tanah ini ditentukan oleh parameter tanah, dalam hal ini adalah parameter dinamik tanah tersebut.

Perilaku dinamik tanah sangat tergantung dari faktor sifat mekanis tanah dan sejarah pembebanan. Sifat mekanis tanah yang dipengaruhi oleh tingkat regangan bahan akibat pembebanan dan keadaan tegangan efektif. Parameter-parameter yang banyak digunakan untuk mempelajari dan memodelkan sifat mekanis tanah akibat pembebanan dinamik adalah kecepatan gelombang sekunder (*shear wave velocity,  $v_s$* ), modulus geser (*shear modulus,  $G$* ), rasio redaman (*damping ratio,  $D$* ) dan *poison rasio* ( *$n$* ), yang selanjutnya disebut sebagai parameter dinamik tanah (*dynamic soil properties*). Nilai-nilai karakteristik tanah sangat diperlukan dalam persoalan daya dukung dinamik tanah, interaksi antara tanah dengan fondasi dan lain sebagainya. Parameter dinamik tanah dapat ditentukan dengan tiga metode yang dapat digunakan yaitu : Uji lapangan, Uji laboratorium dan Korelasi empirik.

### 3.12.1 Kecepatan Gelombang Geser ( $v_s$ )

Kecepatan gelombang geser (*shear wave*) adalah parameter yang penting untuk menentukan karakteristik dinamika tanah. Gelombang S diperlukan dalam analisa dan evaluasi *site effect* khususnya pada lapisan sedimen yang berada diatas batuan dasar.  $V_s$  ditentukan dari perambatan gelombang seismik yang tegak lurus terhadap arah rambatan gelombangnya. Nilai kecepatan gelombang geser dapat merupakan representasi dari sifat geser struktur tanah.

Beberapa metode dapat digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang geser tanah, diantaranya metode geofisika dan metode geoteknik. Kecepatan gelombang geser dapat dicari dengan menggunakan beberapa teknik misalnya teknik lobang silang (*cross-hole technique*), *downhole logging*, N-SPT *value* dan metode survei lainnya.

Beberapa rumusan korelasi  $V_s$  dengan nilai N-SPT telah disampaikan oleh beberapa peneliti, salah satunya yang disampaikan oleh Imai dan Tonouchi (1982) mengusulkan rumus empirik untuk kecepatan gelombang geser  $v_s$  sebagai fungsi dari N-SPT (Fauzi, dkk, 2014), yaitu :

$$v_s = 96.9 N^{0.314} \quad (\text{all sites}) \quad (3.15)$$

dengan  $v_s$  adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan N (ditentukan dari SPT).

Selain persamaan empiris, nilai kecepatan gelombang sekunder dapat didekati dengan metode replikasi, yaitu dengan cara membuat persamaan dari kesesuaian nilai N-SPT. Nilai N-SPT yang telah diketahui nilai  $V_s$  nya sebagai titik referensi kemudian dibuat persamaannya, selanjutnya persamaan ini digunakan pada titik lain yang diketahui nilai N-SPTnya, sehingga diperoleh nilai  $v_s$  di titik tersebut.

Titik bor referensi pada penelitian ini digunakan titik *sesimic down hole* Sorosutan. Dari titik referensi ini diperoleh persamaan replikasi untuk estimasi kecepatan gelombang geser dari korelasi  $v_s$  dan N-SPT. Persamaan replikasinya adalah sebagai berikut:

$$V_s = 40.083 \times (N)^{0.5562} \quad (3.16)$$

dengan  $v_s$  adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan N (determined from SPT). Karena terbatasnya data log bor, untuk estimasi kecepatan gelombang geser selain dilakukan dengan replikasi data *seismic down hole*, korelasi  $V_s$  dan N-SPT dengan rumusan Imai dan Tonouchi (1982), juga dilakukan dengan inversi kurva *Horizontal to Vertical Ratio* (HVSr) dari mikrotremor. Inversi ini dilakukan dengan metode yang di sampaikan oleh Herak (2008), prinsip metode ini adalah mencocokkan kurva HVSr hasil observasi dengan kurva HVSr teori sampai didapatkan kedua kurva sedikit *misfit* (ketidaksesuaian). Setelah kecepatan gelombang geser di wilayah penelitian diperoleh selanjutnya diestimasi kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ). Inversi dilakukan pada per lapisan dengan data bor yang berdekatan dengan lokasi pengukuran mikrotremor. Persamaan  $V_{s30}$  diestimasi dengan persamaan berikut :

$$V_{s30} = \frac{\sum_i^n h_i}{\sum_i^N \frac{h_i}{V_{si}}} \quad (3.17)$$

dengan

$V_{s30}$  : kecepatan gelombang geser sampai pada kedalaman 30 meter,

$h_i$  : ketebalan lapisan tanah,

$v_s$  : kecepatan gelombang geser pada lapisan.

### 3.12.2 Modulus Geser Tanah ( $G$ )

Salah satu penelitian untuk mengetahui perilaku tanah dan respon tanah terhadap gaya gempa sangat tergantung pada parameter tanah yaitu modulus geser tanah. Dari nilai modulus geser tanah akan diketahui kekakuan tanah yang nantinya diketahui percepatan tanah.

Nilai modulus geser tanah pada dasarnya merupakan rasio antara tegangan geser ( $\tau$ ) dan regangan geser tanah ( $\gamma$ ) . Banyak peneliti yang sudah melakukan penelitian tentang besarnya nilai modulus geser. Harga 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.

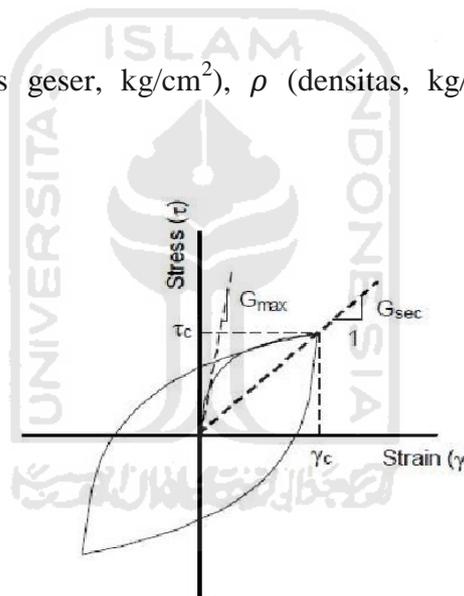
Parameter ini digunakan langsung dalam analisis respon dinamik. Terdapat dua jenis modulus geser berdasar besarnya regangan yang terjadi yaitu :

1. modulus geser regangan kecil ( $< 0.0001\%$ ) sering disebut dengan  $G_{max}$ .
2. modulus geser regangan besar ( $>0.0001\%$ ) disebut  $G$ .

Besaran  $G_{max}$  berhubungan langsung dengan cepat rambat gelombang geser ( $V_s$ ). Nilai modulus geser tanah ( $G$ ) dari pengukuran lapangan kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ), didapatkan persamaan:

$$G = \rho v_s^2 \quad (3.18)$$

dengan  $G$  (modulus geser,  $\text{kg/cm}^2$ ),  $\rho$  (densitas,  $\text{kg/m}^3$ ),  $v_s$  (kecepatan gelombang geser,  $\text{m/s}$ ).

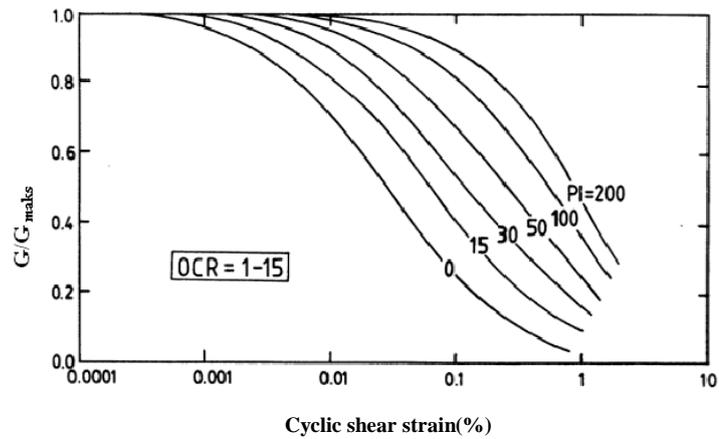


Gambar 3.11 Hubungan  $G_{max}$  dan  $G_{sec}$

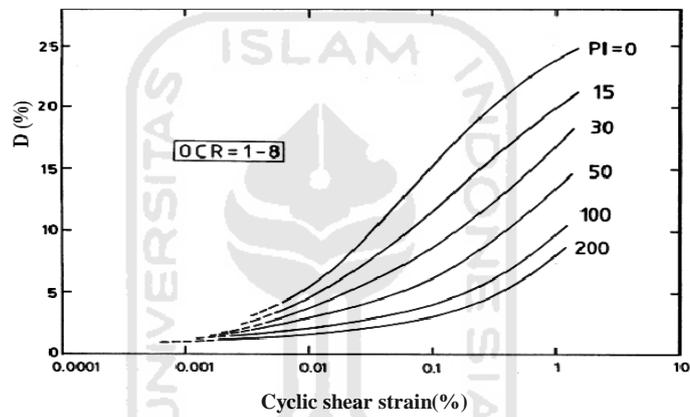
Karena modulus geser berubah menurut besarnya *shear stress* dan *shear strain* sehingga modulus geser disederhanakan kedalam *secant shear modulus* ( $G_{sec}$ ). Parameter  $G_{sec}$  ini dirumuskan dengan,

$$G_{sec} = \frac{\tau_c}{\gamma_c} \quad (3.19)$$

*Shear modulus reduction* ( $G/G_{max}$ ) disebut juga normalisasi modulus geser 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 3.12



a.



b.

Gambar 3.12 Variasi harga regangan geser a. Regangan geser v.s  $G/G_{maks}$   
 b. Regangan geser v.s rasio redaman untuk setiap nilai indeks plastisitas (PI)

Suatu hal yang sangat penting untuk diperhatikan pada Gambar 3.11 diatas adalah bahwa tanah yang mempunyai indeks plastisitas tinggi mempunyai nilai normalisasi modulus geser relatif lebih besar pada suatu regangan geser tertentu dibanding dengan tanah dengan indeks plastisitas yang relatif rendah. Dengan demikian tanah dengan indeks plastisitas yang sangat tinggi cenderung masih berperilaku elastik ( $G/G_{maks}$  masih cukup besar) pada regangan geser yang relatif besar (terjadi pada lempung). Sebaliknya tanah dengan indeks plastisitas rendah seperti tanah pasir maka kekuatannya akan cepat sekali menurun ( $G/G_{maks}$  menurun drastis) pada regangan geser yang semakin besar. Pada gambar tersebut

dapat dilihat pengaruh indeks plastisitas terhadap rasio redaman pada suatu regangan geser tertentu. Hasil penelitian diperoleh kesimpulan bahwa rasio redaman akan meningkat pada regangan geser yang semakin besar. Untuk nilai regangan geser, rasio redaman semakin besar pada tanah dengan indeks plastisitas yang semakin kecil.

### 3.12.3 Regangan geser tanah (*ground shear-strain*)

Pada saat suatu benda terkena gaya, maka benda tersebut akan mengalami deformasi atau perubahan bentuk. Deformasi ini bisa dalam bentuk regangan atau tekanan. Kemampuan material penyusun tanah atau untuk saling meregang dan bergeser saat gempa bumi dinyatakan dengan regangan geser tanah (*ground shear-strain*). Regangan geser tanah merupakan derajat distorsi elemen tanah yang umumnya di beri notasi  $\gamma$ , besarnya regangan ini dapat dinyatakan dalam rasio antara perubahan horisontal dengan tinggi sample/elemen (Widodo, 2012).

Menurut Nakamura (2000), dalam kajian kerentanan gempabumi di suatu tempat, estimasi tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan perlu mempertimbangkan nilai regangan horisontal tanah (*ground shear-strain*). Nilai regangan horisontal geser tanah ini dapat diperoleh atau didekati dengan mengalikan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor ( $K_g$ ) dengan percepatan di batuan dasar ( $\alpha_g$ ).

Dalam Nakamura et al. (2000), dan Nakamura (2008) Regangan geser tanah ( $\gamma$ ) dirumuskan sebagai berikut,

$$\gamma = K_g \times (10)^{-6} \times \alpha_g \quad (3.20)$$

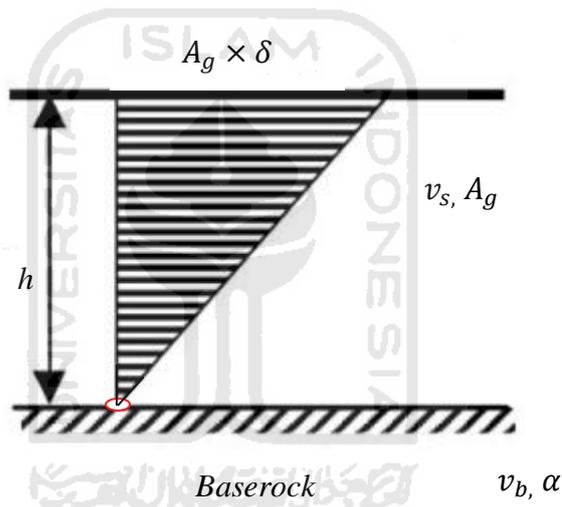
dengan  $\gamma$  (*ground shear-strain*),  $K_g$  (indeks kerentanan seismik),  $10^{-6}$  ditetapkan untuk mengestimasi nilai *strain* pada satuan  $10^{-6}$  pada lapisan tanah permukaan, dan  $\alpha$  (percepatan tanah maksimum di batuan dasar, gal).

Rumusan 3.20 diatas disampaikan oleh Nakamura (Nakamura et al, 2002), diilustrasikan pada Gambar 3.13.

Jika  $f_g = \frac{v_s}{4h}$ ,  $A_g = \frac{v_b}{v_s}$  dan  $h = \frac{v_b}{4f_g A_g}$ , dengan  $f_g$  adalah frekuensi dominan,  $A_g$  adalah faktor amplifikasi tanah dan  $h$  ketebalan sedimen.

Jika regangan di permukaan tanah pada saat gempa bumi di notasikan  $\gamma_g$ , pergeseran di *basement*  $\delta$ , faktor amplifikasi spektrum  $A_g$ , ketebalan lapisan  $h$ , maka regangan geser  $\gamma_g$  dapat di rumuskan sebagai :

$$\gamma_g = \frac{A_g \delta}{h} \quad (3.21)$$



Gambar 3.13 *Shear deformation of surface layer*

Jika  $v_b$  kecepatan gelombang geser di *basement*,  $v_s$  kecepatan gelombang geser di permukaan, frekuensi dominan di permukaan  $f_g$  dapat di ekspresikan sebagai:

$$f_g = v_b / (4A_g h) \quad (3.22)$$

Jika percepatan di batuan dasar (*basement*)  $\alpha = (2\pi f_g)^2 \delta$ , maka regangan geser  $\gamma_g$  dapat ditulis sebagai :

$$\begin{aligned} \gamma_g &= \left( A_g \alpha / (2\pi f_g)^2 \right) \left( \frac{4A_g f_g}{v_b} \right) \\ &= (A_g^2 / f_g) (\alpha / \pi^2 v_b) \\ &= C_g K_g \alpha \end{aligned} \quad (3.23)$$

dengan,

$$K_g = \frac{A_g^2}{f_g} \quad (3.24a)$$

$$C_g = \frac{1}{(\pi^2 \cdot v_b)} \quad (3.24b)$$

Nilai  $C_g$  konstan di setiap site, dan  $K_g$  adalah nilai indeks kerentanan dari suatu *site*.

Nakamura mengasumsikan kecepatan gelombang geser di batuan dasar adalah 600 m/s, maka  $1/(\pi^2 v_b) = 1.69 \times 10^{-6}$  (s/m). Kemudian dengan mengasumsikan bahwa *ground shear strain* efektif adalah 60% dari *ground shear strain maksimum*. Maka *shear strain* efektif menjadi :

$$\begin{aligned} \gamma &= \left( \frac{A_g^2}{f_g} \right) \times \left( \frac{\alpha}{\pi^2 v_b} \right) \times 60\% \\ &= K_g (10^{-6}) \times \alpha \end{aligned} \quad (3.25)$$

Dari pengukuran mikrotremor akan didapatkan parameter frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) di titik pengukuran. Berdasarkan pada persamaan 3.18a, maka diperoleh nilai indek kerentanan seismik ( $K_g$ ). Nilai indeks kerentanan seismik ini dikalikan dengan nilai percepatan tanah ( $\alpha$ ) akan menghasilkan nilai regangan geser tanah ( $\gamma$ ). Dari persamaan 3.16, nilai regangan geser tanah sangat dipengaruhi oleh nilai indek kerentanan seismik  $K_g$  dan percepatan tanah ( $\alpha$ )

Nilai *ground shear-strain* diperoleh dengan mengalikan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan percepatan di batuan dasar. Nilai percepatan di batuan dasar dari rumusan yang sederhana dipengaruhi oleh besarnya magnitudo gempa bumi dan jarak sumber dengan titik amat. Hubungan ini dapat digunakan untuk melihat hubungan antara magnitudo dan jarak epicenter gempa dengan besarnya regangan geser horisontal tanah.

### 3.13 Inversi Kurva HVSR

Berkaitan dengan HVSR untuk karakterisasi geologi lokal, perlu diketahui parameter-parameter bawah permukaan yang mempengaruhi frekuensi dominan dan faktor amplifikasi tanah berdasar kurva HVSR.

Pemodelan kurva HVSR dari hasil pengolahan mikrotremor dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser dititik pengukuran dengan menggunakan *software* ModelHVSR yang dikembangkan oleh Herak (2008). ModelHVSR ini didasarkan pada medium homogen viscoelastisitas dengan gelombang vertikalnya diganti gelombang primer ( secara teori gelombang SV), namun demikian Herak (2008) menyatakan bahwa pendekatan ini valid. Sebagaimana dipaparkan oleh Herak, dalam pengembangan *software* ModelHVSR bahwa kurva HVSR dipengaruhi oleh 6 parameter, yaitu  $v_s, v_p, Q_s, Q_p, h$  dan  $\rho$ .

ModelHVSR membandingkan antara kurva HVSR teoritis dengan kurva HVSR hasil pengukuran lapangan (HVSR Observasi). Dengan merubah parameter input ModelHVSR diatas, maka kurva HVSR teoritis akan berubah. Dengan melakukan iterasi maka akan didapatkan kurva HVSR yang paling bagus (dengan ketidaksesuaian terkecil) antara kurva HVSR teoritis dengan kurva HVSR hasil pengukuran, dirumuskan dengan persamaan 3.26 dan 3.27.

$$m = \sum_i \{ [HVSR_{Obs}(f_i) - HVSR_{THE}(f_i)] W_i \}^2 \quad (3.26)$$

$$W_i = [HVSR_{Obs}(f_i)]^E, E \geq 0 \quad (3.27)$$

Notasi rumus diatas adalah  $HVSR_{Obs}$  (HVSR observasi lapangan),  $HVSR_{THE}$  (HVSR teori), dan  $W$  adalah pembobotan.

## **BAB IV**

### **DATA DAN METODOLOGI**

#### **4.1 Lokasi Penelitian**

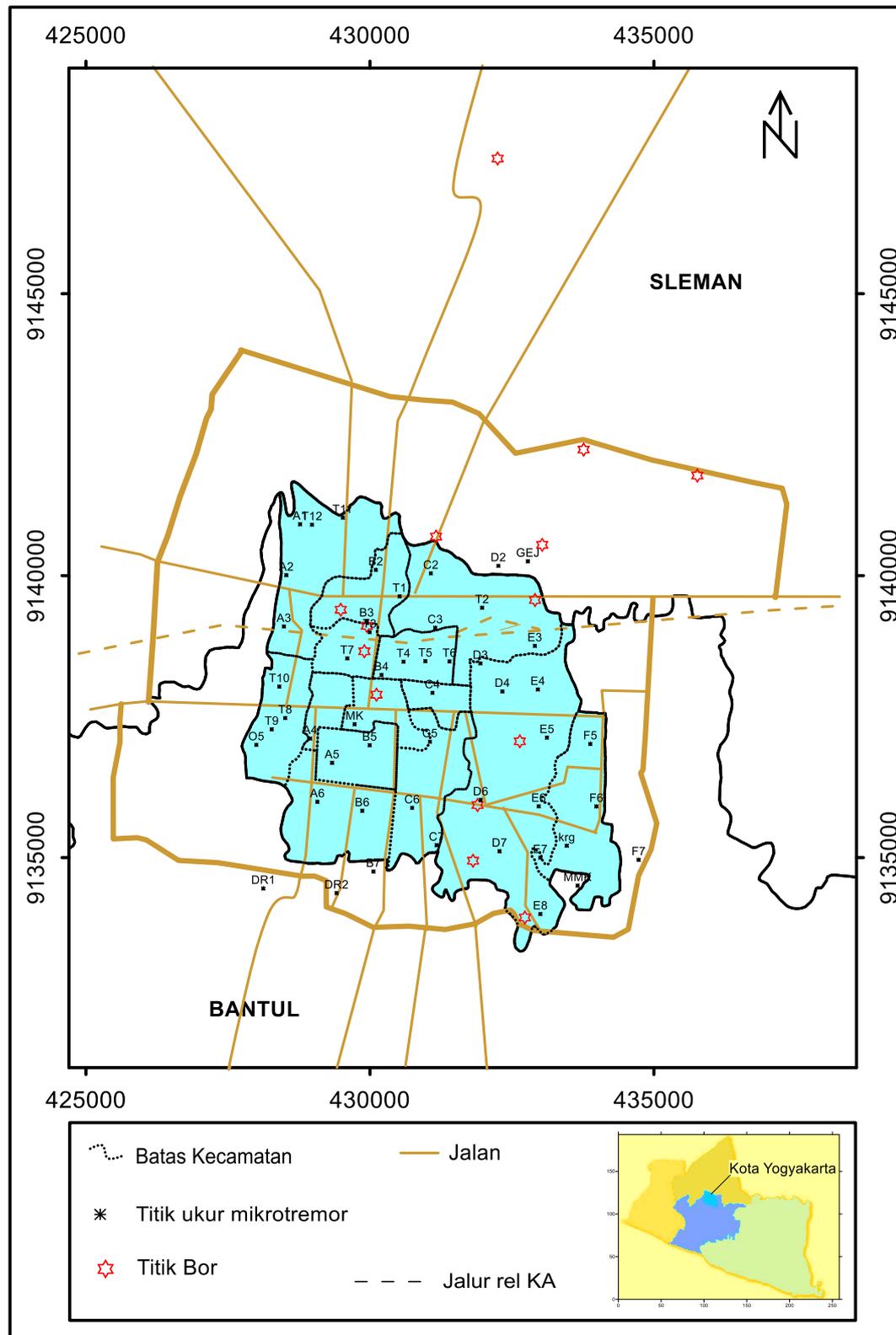
Lokasi penelitian terletak di wilayah Kota Yogyakarta meliputi 14 kecamatan, yaitu : Kecamatan Tegajrejo, Jetis, Gondokusuman, Kraton, Gedongtengen, Danurejan, Pakualaman, Gondomanan, Ngampilan, Wirobrajan, Mergangsan, Umbulharjo, Mantrijeron dan Kotagede (Gambar 4.1).

#### **4.2 Peralatan dan Teknik Pengumpulan Data**

Data survei mikrotremor diperoleh dari pengukuran yang dilakukan di titik pengukuran yang direncanakan tersebar di daerah penelitian. Teknik penentuan titik ukur direncanakan berupa grid meliputi daerah penelitian dengan interval  $\pm 1\text{km}^2$ . Pengukuran dilakukan dengan menggunakan TDL 303s *Digital Portable Seismograph*.

##### **4.2.1 Peralatan**

1. Seperangkat pengukur mikrotremor : seismometer periode pendek (*sensitive velocity sensor*) tipe TDS-303 (3 komponen), frekuensi sampling 100 Hz, *digitizer*, *solar cell panel*, GPS, UPS, dan laptop akuisisi data.
2. Perangkat lunak DATAPRO untuk akuisisi data mikrotremor.
3. Perangkat lunak GEOPSY untuk analisis HVSR (Bonneyoy-Claudet, 2008).
4. Perangkat lunak Model HVSR untuk pemodelan Inversi kurva HVSR
5. Perangkat lunak ArcGIS dan surfer untuk pemetaan.



Gambar 4.1. Peta wilayah Penelitian dan rencana titik lokasi perekaman mikrotremor dan bor



Gambar 4.2. Seperangkat peralatan perekaman mikrotremor

#### 4.2.2 Teknik Pengumpulan Data

1. Data Primer. Data primer yang digunakan dalam penelitian ini adalah data mikrotremor. Data mikrotremor ini tersimpan dalam *harddisk* berupa sinyal digital 3 komponen, yaitu komponen utara-selatan, timur-barat, dan vertikal dalam bentuk *soft file*. Data ini dikumpulkan melalui survei mikrotremor di lapangan. Durasi rekaman kurang lebih 15-30 menit.
- 2 Data Sekunder. Data sekunder diperoleh dari studi pustaka berupa laporan hasil penelitian maupun data dari instansi terkait dengan data yang diperlukan. Data *Vs downhole logging*, data hasil uji tanah, data mikrotremor, peta-peta pendukung lainnya.

### 4.3 Pengolahan Data

#### 4.3.1 Pengolahan Data Mikrotremor

Pengolahan data mikrotremor menggunakan metode analisis *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* (HVSr). Hasil pengukuran mikrotremor di lapangan mendapatkan data getaran tanah fungsi waktu. Data ini tercatat dalam 3 komponen, yaitu komponen vertikal (*Up-Down*), utara-selatan (*North-South*), dan barat-timur (*East-West*). Data mentah ini tidak dapat langsung diolah karena dalam format *hexadecimal*. Data ini harus diubah ke format ASCII atau format

miniseed menggunakan perangkat lunak DATAPRO dan menghasilkan empat file, yaitu file komponen vertikal, utara-selatan, barat-timur, dan *file header*.

#### **4.3.1.1 Perhitungan data frekuensi dominan ( $f_0$ ), faktor amplifikasi ( $A_g$ ) dan periode dominan**

Proses pengolahan data mikrotremor menggunakan perangkat lunak GEOPSY untuk memperoleh rata-rata spektrum H/V dari rekaman getaran yang datanya telah disiapkan sebelumnya. Perangkat lunak geopsy ini akan memberikan grafik kurva HVSR, yang terdapat nilai frekuensi dominan ( $f_g$ ) dan puncak kurva HVSR (faktor amplifikasi tanah,  $A_g$ ). Secara ringkas tahap pengolahan metode HVSR dengan perangkat *geopsy* di sajikan dalam Gambar 4.3.

Pengolahan dengan *geopsy* ini dimulai dengan

1. input data (file rekaman mikrotremor yang telah dirubah formatnya menjadi *ascii* atau *miniseed*) ke dalam *geopsy*.
2. *windowing* sinyal, sinyal akan dibagi menjadi beberapa kotak (*window*). Pemilahan *window* dapat dilakukan secara manual maupun otomatis. Untuk data yang panjang digunakan otomatis. Pemilahan ini (*windowing*) dilakukan untuk memisahkan antara sinyal tremor dengan *event transien* (sumber spesifik seperti langkah kaki dan kendaraan lewat dan lain-lainnya yang dianggap *noise*). Cara untuk mendeteksi sinyal *transien* adalah dengan membandingkan STA (*short term average*) dan LTA (*long term Average*). STA merupakan rata-rata amplitudo jangka pendek (0.5-2.0 detik), sedangkan LTA merupakan nilai rata-rata amplitudo jangka panjang (>10 detik). Pada saat perbandingan STA/LTA melebihi ambang batas yang sudah ditentukan, maka dapat dikatakan sebagai *event*. Setelah *event transien* terdeteksi maka data selain *transient* dibagi menjadi beberapa *window*.
3. transformasi fourier pada masing-masing komponen untuk diperoleh spektrum fourier pada masing-masing *window*.

Sebelum menghitung perbandingan H/V, amplitudo spektral fourier dari komponen NS, EW dan V dilakukan *smoothing* dengan fungsi Konno-Ohmachi :

$$\frac{\sin\left(\left(\log_{10}\left(\frac{f}{f_c}\right)\right)^b\right)}{\left(\left(\log_{10}\left(\frac{f}{f_c}\right)\right)^b\right)^4} \quad (4.1)$$

dengan  $f$  frekuensi,  $f_c$  frekuensi tengah dimana *smoothing* dilakukan dan  $b$  koefisien *bandwith*. Untuk meminimalkan efek perbatasan karena *windowing* amplitudo dari spektrum digunakan kosinus lancip.

Spektrum Fourier komponen horisontal dirata-rata dengan akar rerata kuadrat dan dibagi dengan spektrum fourier komponen vertikal dalam kawasan frekuensi hingga didapatkan rata-rata spektrum H/V, dari rata-rata spektrum H/V ini dapat ditentukan frekuensi dominan ( $f_o$ ) serta puncak spektrum HVSR yang merupakan nilai faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ )

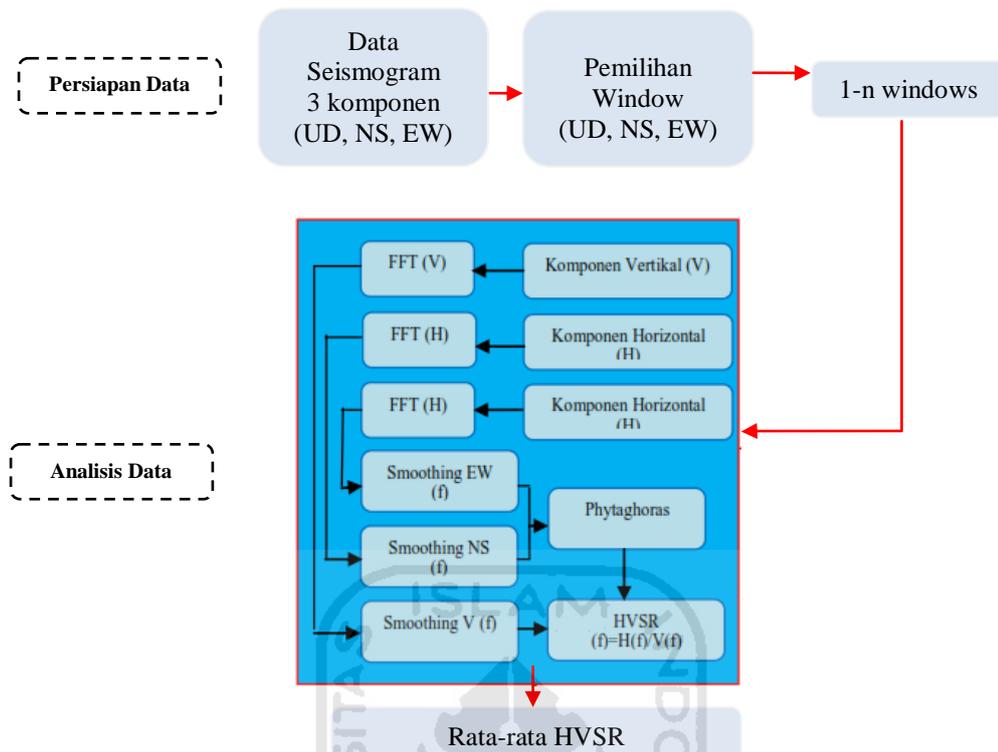
Kriteria untuk kurva H/V yang dapat dipercaya (*reliable*) meliputi tiga hal yang penting. Ketiga kriteria itu adalah :

1.  $f_o > 10/l_w$
2.  $n_c(f_o) > 200$
3.  $\sigma_A(f) < 2$  for  $0.5 < f < 2(f_o)$  if  $f_o > 0.5$  Hz dan  
 $\sigma_A(f) < 3$  for  $0.5 < f < 2(f_o)$  if  $f_o < 0.5$  Hz

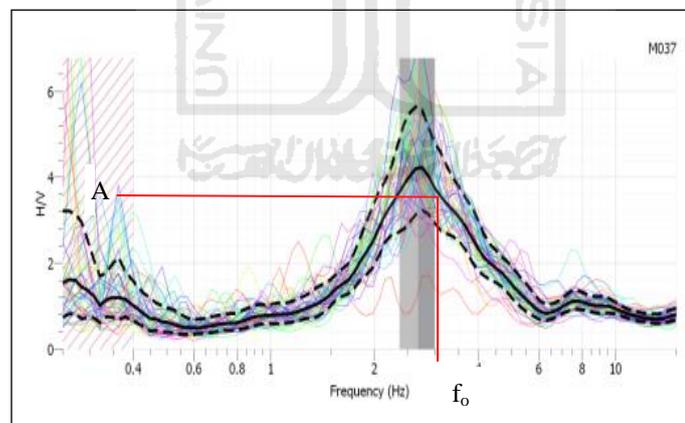
dengan  $f_o$  frekuensi pada puncak H/V,  $l_w$  panjang window dan  $n_c = l_w \cdot n_w \cdot f_o \cdot \sigma_A(f)$  deviasi standar dari  $A_{H/V}(f)$ .

Berdasarkan hubungan  $T = \frac{1}{f_o}$ , dari pengolahan data dengan metode

HVSR maka akan didapatkan nilai periode dominan tanah ( $T_g$ ) di lokasi pengukuran, karena yang terukur dari kurva adalah  $f_o$  (Gambar 4.4). Dari nilai-nilai yang terukur dari semua titik pengukuran kemudian dibuat peta frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ) dan peta faktor amplifikasi spektrum ( $A_g$ ) daerah penelitian.



Gambar 4.3. Tahap-tahap Metode HVSR



Gambar 4.4. Kurva HVSR

#### 4.3.1.2 Perhitungan ketebalan sedimen ( $h$ )

Nilai ketebalan sedimen dihitung dengan menggunakan persamaan 3.6. Nilai kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) yang digunakan pada penelitian ini adalah digunakan nilai dari korelasi antara nilai  $v_s$  dan N-SPT. Pada peta distribusi kecepatan gelombang geser disetiap titik ukur mikrotremor mempunyai nilai  $v_s$ ,

nilai ini digunakan untuk perhitungan ketebalan di masing-masing titik. Sehingga di dapatkan distribusi nilai ketebalan di setiap titik kemudian di buat peta ketebalan meliputi daerah penelitian.

#### 4.3.1.3 Perhitungan indeks kerentanan seismik ( $K_g$ )

Sedangkan nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) di semua titik ukur diperoleh dengan menggunakan persamaan 3.7 dengan mengkuadratkan faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) dibagi dengan frekuensi dominan ( $f_g$ ). Nilai-nilai indeks kerentanan seismik yang diperoleh kemudian di petakan untuk mengetahui distribusi nilai indeks kerentanan seismik di daerah penelitian.

#### 4.3.2 Perhitungan nilai percepatan tanah maksimum (PGA)

Pengukuran *Peak Ground Acceleration* (PGA) daerah penelitian dilakukan dengan beberapa metode, sebagaimana dijelaskan dalam urai berikut ini :

1. peraturan Gempa SNI 1726-2002 (diperbarui dengan SNI 726-2010 tahun 2010) dengan mempertimbangkan kondisi lapisan tanah dari hasil *Standart Penetration Test* (SPT) dan survei *seismic downhole*.
2. prediksi empiris dengan persamaan atenuasi Campbel 1989

Data nilai PGA diperoleh dari perhitungan menggunakan parameter gempa yang terjadi pada tanggal 27 Mei 2006, yang dikeluarkan oleh USGS. Fungsi atenuasi yang digunakan adalah atenuasi Campbell (1989) seperti tertulis pada persamaan 3.8

3. penentuan PGA dari hasil survei mikrotremor menggunakan persamaan atenuasi Kanai (1966) persamaan 3.12, yang mempertimbangkan hubungan PGA dengan periode dominan tanah, magnitudo gempa dan jarak epicenter.
4. penentuan PGA dengan pemodelan numerik Nonlinear Earthquake Response Analysis (NERA)

Perhitungan nilai PGA dan *ground shear strain* dihitung menggunakan metode *nonlinier* menggunakan bantuan program NERA (*Nonlinier Earthquake site Response Analyses* / Bardet dan Tobita., 2001).

Parameter input NERA untuk menghitung besarnya *site respon* gempa yang terjadi pada tanah berlapis, adalah :

1. profil perlapisan tanah pada titik yang ditinjau (data kecepatan gelombang S tiap lapisan, data berat jenis tiap lapisan, ketebalan tiap lapisan, jenis material tanah)
2. data *ground motion*, dapat dipergunakan gempa terdahulu sebagai *input motion* dalam perhitungan (*time history* percepatan pada *bedrock* atau *outcrop*)

Profil tanah pada titik tinjauan ditentukan berdasarkan hasil uji bor yang digabung dengan hasil uji laboratorium pada beberapa sampel yang diambil dari titik uji bor tersebut. Perhitungan pada penelitian ini menggunakan dua titik yaitu titik di Malang dan titik di Sorosutan, dimana kedua titik ini juga merupakan titik uji bor sekaligus merupakan titik pengambilan sampel untuk di uji di laboratorium dan juga merupakan titik uji *seismic down hole* (PUP-ESDM).

Dalam perhitungan PGA dan *ground shear strain* pada perhitungan ini *input motion* menggunakan 4 rekaman gempa yaitu El Centro 1967, Kobe 1995 dan Parkfield. Penentuan *ground motion* dengan menggunakan 4 *input motion* ini untuk mengurangi ketidakpastian kondisi lokasi yang ditinjau.

### **4.3.3 Perhitungan nilai karakteristik dinamik tanah**

#### **4.3.3.1 Perhitungan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ )**

Perhitungan kecepatan gelombang geser dalam penelitian ini dilakukan dengan metode lapangan seismik *seismic downhole*, korelasi empirik, replikasi dan inversi.

#### **1. Seismic Downhole**

Metode *seismic down hole* merupakan salah satu metode penentuan kecepatan gelombang geser dengan melakukan pengukuran waktu tempuh gelombang dan kedalaman penetrasi kedalam bawah permukaan. *Seismic down hole* dilakukan dengan melakukan perekaman kecepatan gelombang dari suatu sumber impuls ke penerima (*receiver*) yang berada di kedalaman tertentu yang

bervariasi. Dari pengukuran ini akan didapat informasi *travel time* dan jarak tempuh gelombang P dan S, sehingga di dapatkan kecepatan gelombang P dan gelombang S. Data kecepatan gelombang sekunder ini merupakan data sekunder dari dinas PUP-ESDM Daerah Istimewa Yogyakarta (PUP-ESDM, 2010).

## 2. Korelasi Vs dengan N-SPT rumusan Imai and Tonouchi (1982)

Persamaan korelasi Vs dengan N-SPT yang digunakan pada persamaan ini adalah persamaan yang dirumuskan oleh Imai and Tonouchi (1982) seperti yang ditunjukkan persamaan 3.15. Nilai N-SPT yang digunakan meliputi beberapa titik bor di Kota Yogyakarta yang merupakan data sekunder didapat dari beberapa sumber.

Titik-titik bor dalam penelitian yaitu titik bor Malangan, titik bor Sorosutan, titik bor Janturan, titik bor Golo, titik bor Palagan, titik bor Jl. Mangkubumi, titik bor Hotel Grage Ramayana, titik bor Hotel Aston, titik bor Book Store UGM, titik bor Kanwil Pajak Yogyakarta, titik bor Hartono Mall, titik bor Auditorium Sanata Dharma, titik bor Kantor Pusat Bank BPD dan titik bor Jl. Remujung, data selengkapnya ada di lampiran. Dengan memasukan nilai N-SPT pada persamaan 3.15 tersebut maka akan diperoleh nilai estimasi kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) dititik tersebut. Dari nilai-nilai yang didapat kemudian dibuat peta spasialnya untuk melihat distribusi kecepatan gelombang geser.

## 3. Replikasi

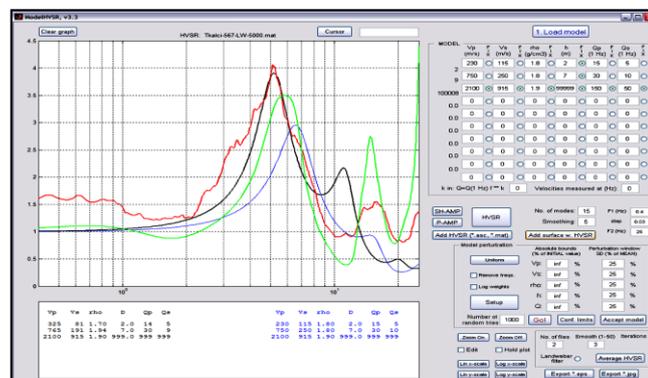
. Karena hanya ada dua titik bor *seismic downhole* yang dilakukan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser, maka untuk mendapatkan data kecepatan gelombang geser di titik yang lain dilakukan replikasi berdasar titik bor referensi. Titik bor referensi pada penelitian ini digunakan titik *sesimic down hole* Sorosutan. Dari titik referensi ini diperoleh persamaan replikasi untuk estimasi kecepatan gelombang geser dari korelasi Vs dan N-SPT. Persamaan replikasi untuk estimasi kecepatan gelombang geser adalah persamaan 3.16.

#### 4. Pemodelan/Inversi kurva HVSR

Selain dengan metode tersebut diatas, estimasi  $v_s$  dilakukan dengan pemodelan mundur atau inversi kurva HVSR dengan menggunakan *software* ModelHVSR yang dikembangkan oleh Herak (2008). Prinsip metode ini adalah melakukan pencocokan model kurva HVSR awal (*input*) yaitu kurva HVSR teori dari input parameter  $v_p$ ,  $v_s$ ,  $\rho$ ,  $h$ ,  $Q_p$  dan  $Q_s$  dengan kurva HVSR hasil observasi. Pemodelan ini dilakukan dengan melakukan iterasi sebanyak yang ditentukan sampai didapatkan kurva model akhir (*final model*) yang sedikit *misfit* (ketidakcocokan) terhadap kurva HVSR observasi, sehingga didapatkan parameter  $v_p$ ,  $v_s$ ,  $\rho$ ,  $h$ ,  $Q_p$  dan  $Q_s$  dari model akhir yang merepresentasikan parameter kurva HVSR observasi. Pemodelan ini dilakukan di semua titik pengukuran mikrotremor. Data parameter model awal diperoleh dari data bor. Tampilan *software* ModelHVSR seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3.

Langkah pemodelan/inversi kurva HVSR dengan ModelHVSR sebagai berikut :

1. memasukan input model awal (*initial model*) berupa parameter  $v_p$  ( m/dt),  $v_s$  (m/dt),  $Q_p$  (Hz),  $Q_s$  (Hz),  $h$  (m) dan  $\rho$  (massa jenis,  $\text{gr/cm}^3$ ) maka akan di peroleh kurva HVSR teori,
2. selanjutnya dimasukan kurva HVSR observasi. *Software* ModelHVSR akan melakukan iterasi pencocokan kurva,
3. melakukan perubahan pada input sampai didapatkan kurva HVSR teori identik dengan kurva HVSR observasi, sehingga diperoleh parameter model *final*,
4. diperoleh parameter model terbaik dengan nilai  $v_p$  ,  $v_s$ , densitas, ketebalan per lapisan,  $Q_p$  dan  $Q_s$  tiap kedalaman ditunjukkan pada model parameter.



Gambar 4.5 Tampilan interface ModelHVSR

### 1.3.3.2 Perhitungan nilai Vs30

Perhitungan nilai Vs30 dilakukan menggunakan data  $v_s$  hasil inversi kurva HVSR. Setelah didapat kecepatan gelombang geser per lapisan, maka dapat ditentukan kecepatan sampai kedalaman 30 meter (Vs30). Perhitungan berdasar persamaan (3.17). Semua titik dilakukan inversi kemudian diinterpolasikan untuk melihat sebaran nilai Vs30.

### 4.3.3.3 Perhitungan nilai modulus geser ( $G$ )

Nilai modulus geser di peroleh dari perhitungan data propertis densitas tanah dan kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) dengan menggunakan persamaan 3.18 pada bab sebelumnya. Nilai gelombang geser yang digunakan menggunakan kecepatan gelombang geser titik di Malang dan Sorosutan dari hasil *seismic down hole*.

### 4.3.3.3 Perhitungan Regangan Geser Horisontal ( $\gamma$ )

Nilai regangan geser horisontal ( $\gamma$ ) di semua titik ukur diperoleh dengan mengalikan nilai indek kerentanan seismik ( $K_g$ ) dengan nilai percepatan tanah di batuan dasar (persamaan 3.7). Nilai percepatan tanah yang digunakan dalam perhitungan regangan geser didapat dari hasil perhitungan persamaan Campbell 1982 seperti tertulis persamaan 3.8 dan persamaan atenuasi Kanai seperti tertulis pada persamaan 3.12. Nilai regangan geser juga dihitung dengan pemodelan numerik yang lakukan dengan *software* NERA. Perhitungan ini memperoleh regangan geser per lapisan tanah. Nilai-nilai regangan geser yang diperoleh kemudian dipetakan untuk mengetahui distribusi regangan geser di daerah penelitian.

### 4.3.4 Hubungan magnitudo, PGA, Modulus geser tanah ( $G$ ) dan Regangan geser tanah ( $\gamma$ )

Sumber gempa digunakan dalam perhitungan ini menggunakan parameter gempa yang terjadi pada tanggal 26 Mei 2006 yang tercatat oleh USGS. Untuk mengetahui pengaruh parameter yang berpengaruh terhadap regangan geser.

Dengan menggunakan persamaan 3.25 diperoleh nilai regangan geser untuk titik-titik tertentu. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk titik yang lain untuk mendapatkan distribusi nilai modulus geser dan regangan geser di wilayah penelitian.

#### **4.3.5 Kondisi bawah permukaan**

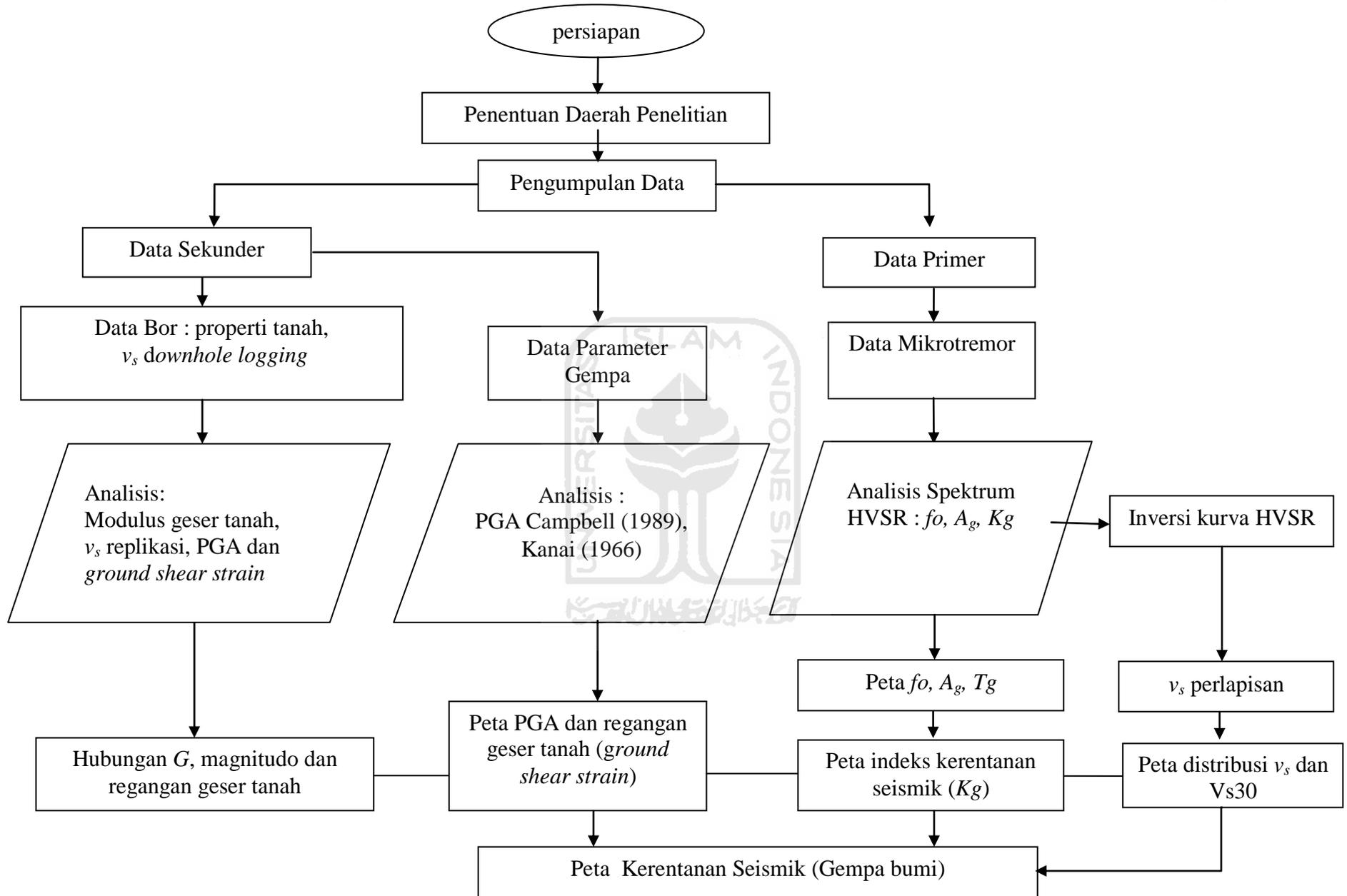
Kondisi bawah permukaan berupa data klasifikasi jenis tanah didasarkan pada jenis lapisan tanah yang diperoleh dari data bor, dan untuk titik-titik yang lain diperkirakan dari nilai parameter properti tanah lainnya, seperti densitas dan kecepatan gelombang geser yang dilakukan pada titik-titik di wilayah penelitian.

#### **4.3.6 Peta Kerentanan seismik**

Peta ini dibuat dengan melakukan penggabungan nilai-nilai yang diperoleh dari hasil pengukuran. Nilai-nilai yang digunakan dalam menentukan peta kerentanan ini adalah nilai indek kerentanan seismik tanah ( $K_g$ ), percepatan puncak tanah (PGA), regangan geser tanah dan kecepatan gelombang geser tanah sampai kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ).

#### **4.4 Diagram alir penelitian**

Gambaran rangkaian penelitian di gambarkan dalam diagram alir (Gambar 4.6)



Gambar 4.6 Diagram Alir Penelitian

## BAB V

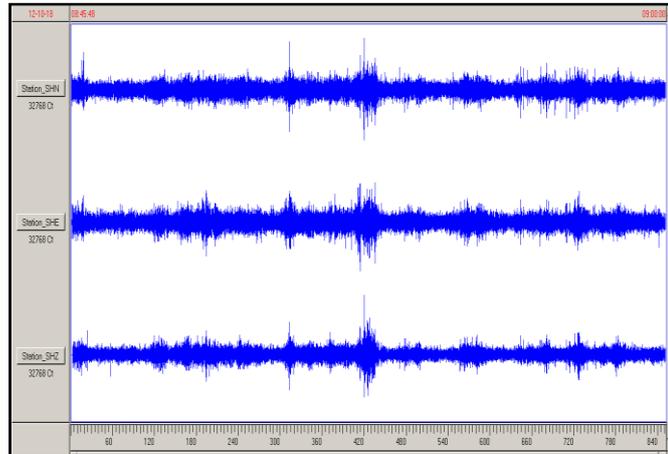
### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 5.1 Pengolahan Data

Pengukuran mikrotremor merupakan salah satu metode seismik pasif yang banyak digunakan dalam penelitian bawah permukaan. Metode ini menggunakan HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) dari mikrotremor untuk mengestimasi frekuensi *natural* dan faktor amplifikasi tanah setempat (Nakamura, 1989). Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSR ialah frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ) dan faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) yang merupakan nilai puncak kurva HVSR, berkaitan dengan geologi setempat dan parameter fisik bawah permukaan. Perkembangan selanjutnya, metode ini mampu untuk mengestimasi indeks kerentanan tanah (Nakamura, 2007), indeks kerentanan bangunan (Sato et al., 2008; Triwulan et al., 2010) dan interaksi antara tanah dan bangunan (Gallipoli et al., 2004; Triwulan et al., 2010).

Pengukuran mikrotremor di wilayah penelitian dilakukan untuk mendapatkan rekaman mikrotremor yang akan dilakukan pengolahan untuk mendapatkan nilai karakteristik dinamik berupa frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ) dan faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ). Pengambilan data mikrotremor ini meliputi 51 titik ukur yang berada di wilayah Kotamadya Yogyakarta, dari titik ukur primer dan sekunder.

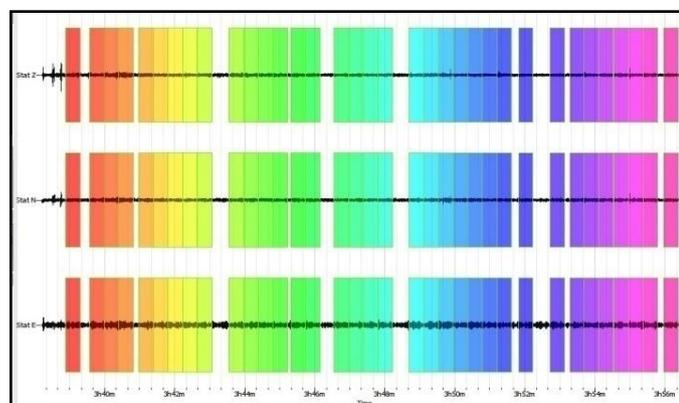
Hasil pengukuran di titik-titik ukur berupa data rekaman mikrotremor dalam interval waktu (durasi) tertentu, dalam pengukuran ini durasi perekaman antara 15-30 menit. Contoh seismogram mikrotremor hasil rekaman di Kota Yogyakarta seperti di perlihatkan pada Gambar 5.1. Komponen Vertikal (*Up-Down*), komponen horisontal Utara-Selatan (*North-South*) dan komponen horisontal Timur-Barat (*East-West*) dari sinyal mikrotremor. Seismogram dan data pengukuran mikrotremor selengkapnya ada di lampiran 1.



Gambar 5.1 Rekaman mikrotremor tiga komponen (UD, EW dan NS)

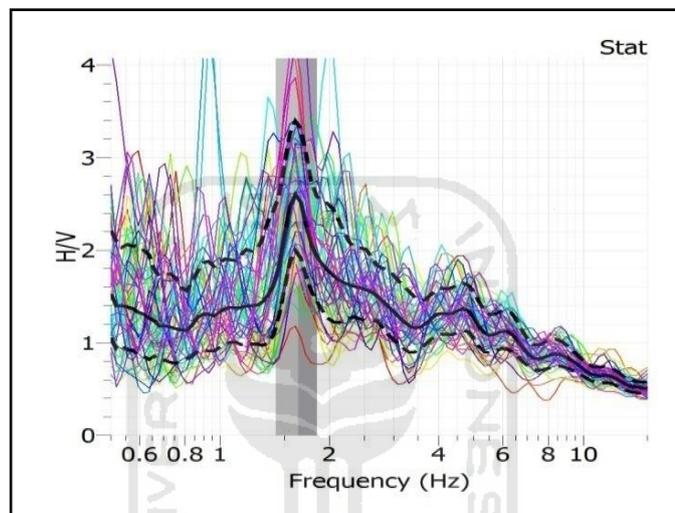
Tahapan selanjutnya adalah melakukan *windowing* pada rekaman mikrotremor, adalah terbaginya *seismogram* mikrotremor menjadi beberapa jendela (*window*) berupa kotak-kotak berwarna. Satu warna mewakili satu *window* dengan lebar kotak yang tertentu (lebar kotak dalam satuan waktu, dt). Contoh *windowing* seperti ditunjukkan Gambar 5.2.

Satu *window* membentuk satu kurva HVSR, sehingga jumlah kurva HVSR yang terbentuk sejumlah *window* yang ada dalam satu rekaman mikrotremor. Jumlah *window* tergantung dari sinyal yang masuk dalam kategori data dan terhindar dari *noise*. Jumlah data dalam suatu rekaman mikrotremor tidak sama banyak, tergantung kualitas rekaman dan *noise* yang masuk. Semakin bagus sinyal, maka semakin banyak *window* yang terbentuk.

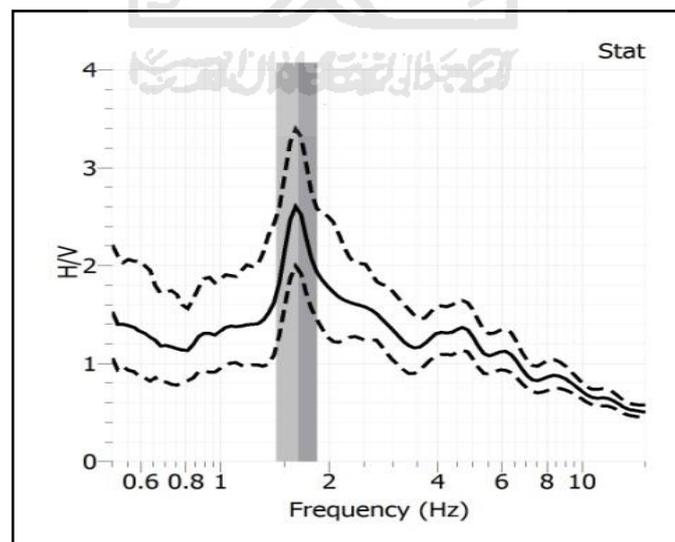


Gambar 5.2 *Windowing* sinyal mikrotremor

Kurva HVSR yang terbentuk dari hasil dari *windowing* ditampilkan dari semua *window* sesuai dengan warna *window* (kotaknya). Kurva dengan warna hitam menunjukkan kurva rata-rata HVSR, sedangkan garis hitam putus-putus menunjukkan simpangan kurva HVSR. Contoh kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor di Kota Yogyakarta seperti ditunjukkan pada gambar 5.3. Kurva HVSR selengkapnya ada pada lampiran I.



a.



b.

Gambar 5.3. Kurva HVSR a. Kurva HVSR total, b. Kurva HVSR rata-rata

Pada kurva HVSR di atas nilai faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ) yakni 2.6 dan nilai frekuensi dominannya ( $f_g$ ) yakni 1.7. Perhitungan selanjutnya yaitu menghitung indeks kerentanan seismik dengan menggunakan persamaan 3.7. Nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) di pengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi tanah serta frekuensi dominan.

$$K_g = \frac{2.56^2}{1.64} = 3.99$$

Pengolahan selanjutnya yakni menghitung percepatan di batuan dasar ( $\alpha$ ) dengan menggunakan persamaan (3.8).

$$\ln Y = -2.501 + 0.623.M_L - \ln (R+7.28)$$

$$\ln Y = -2.501 + 0.623(6.3) - \ln (23.06+7.28)$$

$$\ln Y = -1.988$$

$$Y = 0.137 \text{ g}$$

$$Y = 137 \text{ gal}$$

Setelah mendapatkan PGA di batuan dasar selanjutnya menghitung *ground shear strain*. Perhitungan ini menggunakan persamaan (3.25)

$$\gamma = \left( \frac{2.56^2}{1.64} \right) \times \left( \frac{137}{\pi^2 \times 60000} \right) \times 60\%$$

$$\gamma = 0.000547$$

Perhitungan PGA Kanai dengan persamaan (3.12)

$$\alpha_g = \frac{5}{\sqrt{0.61}} 10^{0.61(6.3) - 1.66 + \frac{36}{23.06} \log 23.06 + 0.167 \frac{1.83}{23.06}}$$

$$= 582.07 \text{ gal}$$

Penentuan kecepatan gelombang geser dalam penelitian ini digunakan beberapa cara yaitu dengan proses replikasi nilai  $v_s$ ,  $v_s$  *seismik downhole*,  $v_s$  korelasi N-SPT dan  $v_s$  inversi HVSR. Penentuan kecepatan gelombang sekunder dengan korelasi N-SPT rumusan Imai and Tonouchi (1982) berdasarkan pada persamaan (3.14)

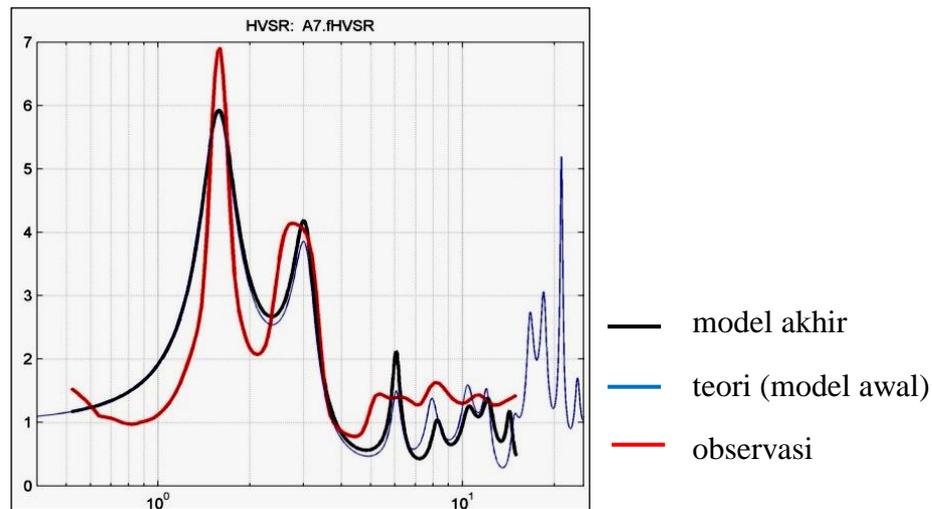
$$\begin{aligned}
 V_s &= 96.9 (N)^{0.314} \\
 &= 96.9 \times (20)^{0.314} \\
 &= 248. \text{m/s}
 \end{aligned}$$

Untuk penentuan kecepatan gelombang sekunder dengan proses replikasi berdasarkan pada persamaan (3.15) :

$$\begin{aligned}
 V_s &= 40.083(N)^{0.5562} \\
 &= 40.803 \times (20)^{0.5562} \\
 &= 212.13 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Penelitian ini juga menggunakan data sekunder untuk kecepatan gelombang geser hasil *down hole logging* yaitu di titik Malang dan titik Sorosutan.

Untuk melakukan perhitungan  $V_{s30}$ , maka diperlukan data kecepatan dan perlapisan sampai pada kedalaman 30 meter. Pada penelitian ini untuk mendapatkan data  $V_{s30}$  dilakukan dengan inversi kurva H/V, dikarenakan data kurva HVSR cukup banyak sehingga data  $V_{s30}$  yang diperoleh juga banyak. Inversi ini menggunakan *software* ModelHVSR, *software* ini bekerja dengan melakukan iterasi pada model awal (*inisial model*) untuk dicocokkan dengan kurva HVSR hasil pengukuran sampai didapatkan model akhir (*final model*) yang sedikit ketidakcocokannya dengan kurva HVSR hasil pengukuran. Model awal yang diberikan adalah dengan  $v_p$ ,  $v_s$ , masa jenis lapisan, kedalaman,  $Q_p$  dan  $Q_s$  pada setiap perlapisan. Model awal  $v_s$  dapat digunakan dari data bor yang didapat dari seismik *downhole logging* maupun dari korelasi  $v_s$  dengan N-SPT. Sebagai contoh hasil dari inveri kurva HVSR seperti ditunjukkan Tabel 5.1, sebagai hasil dari inveri kurva HVSR pada titik ukur A7 yang ditunjukkan oleh Gambar 5.4, garis merah adalah kurva HVSR dari data lapangan model awal, garis biru model kurva awal dan kurva hitam model akhir hasil iterasi. Kemudian data tersebut untuk menghitung besarnya  $V_{s30}$ . Kecepatan gelombang sekunder perlapisan hasil inversi HVSR selengkapnya di lampiran 10.



Gambar 5.4 Inversi kurva HVSr

Tabel 5.1 Contoh parameter hasil inversi HVSr titik A7

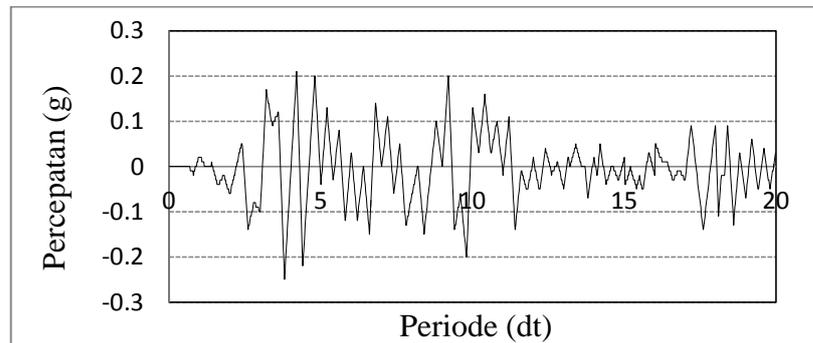
| $v_p$ | $v_s$ | Rho  | Depth | Qp  | Qs  |
|-------|-------|------|-------|-----|-----|
| 323   | 76    | 1.61 | 1     | 21  | 12  |
| 595   | 240   | 1.73 | 1     | 24  | 12  |
| 2473  | 512   | 1.2  | 1.5   | 27  | 18  |
| 585   | 144   | 1.32 | 0.5   | 19  | 12  |
| 200   | 88    | 1.2  | 1     | 14  | 9   |
| 325   | 142   | 1.43 | 1     | 19  | 13  |
| 478   | 239   | 1.41 | 3.2   | 19  | 13  |
| 208   | 102   | 1.9  | 1.2   | 9   | 5   |
| 689   | 208   | 1.22 | 19    | 18  | 9   |
| 2500  | 999   | 1.9  | 999   | 999 | 999 |

Selanjutnya Vs30 dapat dihitung :

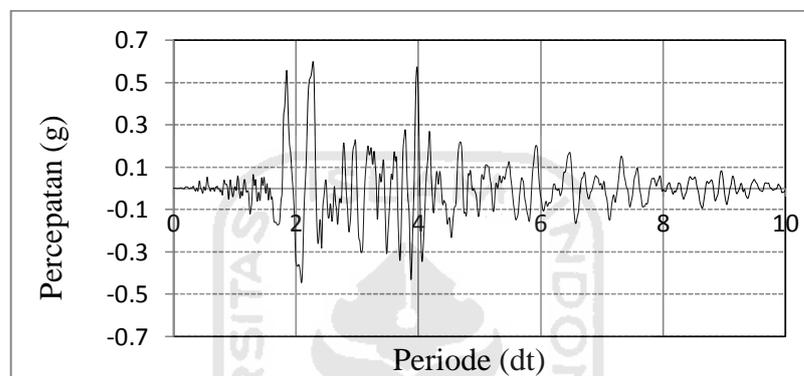
$$Vs30 = \frac{30}{\frac{1}{76} + \frac{1}{240} + \frac{1.5}{512} + \frac{0.5}{144} + \frac{1}{88} + \frac{1}{142} + \frac{3.2}{239} + \frac{1.2}{102} + \frac{19}{203}}$$

$$Vs30 = 186.47$$

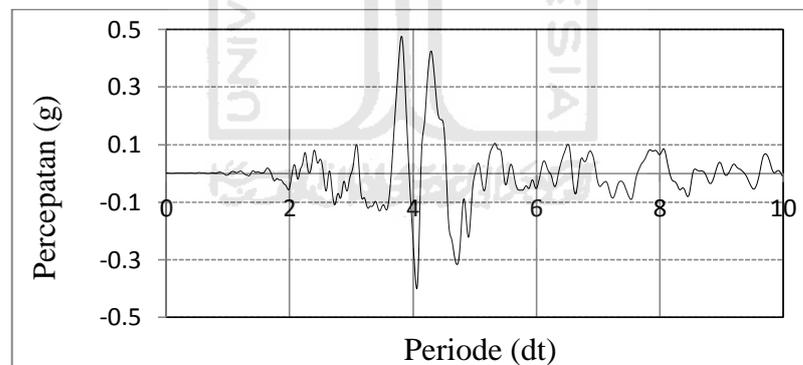
Perhitungan *ground shrear strain* dan *peack ground acceleration* perlapisan yang dihitung dengan menggunakan *software* NERA. Data yang digunakan adalah data *ground motion synthetic* dari percepatan tiga gempa yaitu gempa El Centro, Kobe dan Parkfield. Gambar 5.5 merupakan rekaman *waveform time series* percepatan tiga gempa gempa tersebut.



a. El Centro



b. Kobe 95

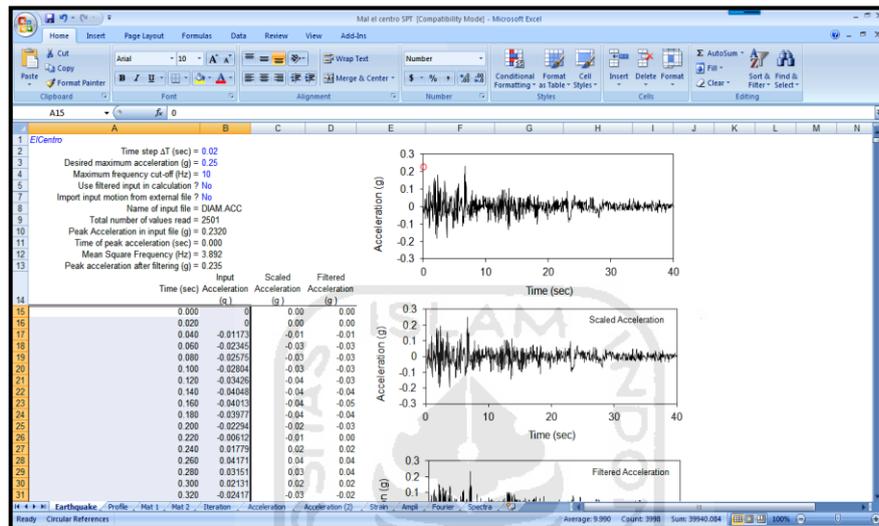


c. Parkfield

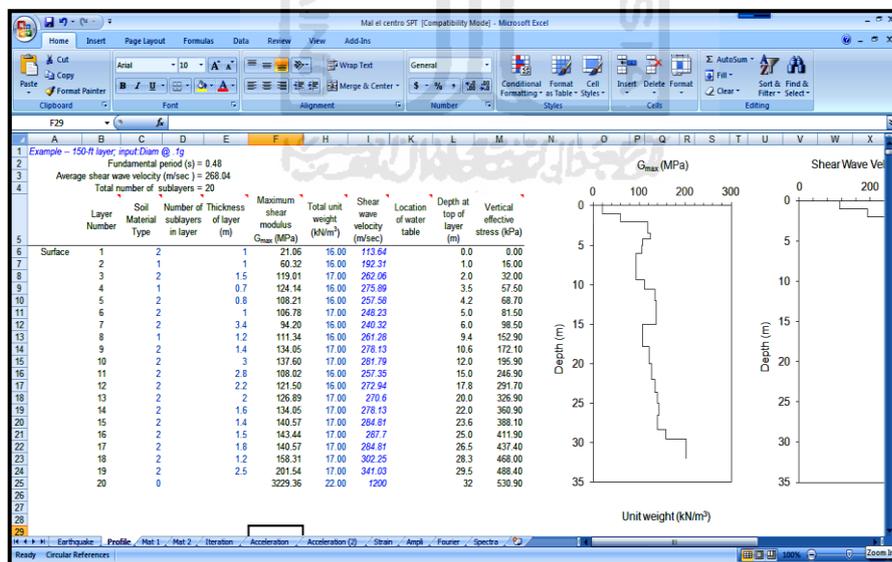
Gambar 5.5 Rekaman *waveform time history* percepatan tiga gempa

Data yang dimasukkan kedalam software NERA adalah data *time history desain*. *Time history* desain ini diperoleh melalui proses *spectral matching*. Selanjutnya untuk input profil lapisan tanah digunakan data yang diperoleh dari data bor berupa nilai N-SPT yang telah dikonversikan ke dalam  $v_s$ , dengan menggunakan persamaan 3.14. Setelah diolah dengan menggunakan *software*

NERA hasilnya berupa *ground shear strain* dan *peak ground acceleration* perlapisan dan akan dibahas pada point selanjutnya. *Input time history* percepatan gempa dan *input soil profil* pada software NERA ditunjukkan oleh Gambar 5.6 a dan b.



a. Input data percepatan gempa



b. Input soil profile

Gambar 5.6 Input data pada NERA

### 5.1.2 Topologi Kurva HVSR

Karakteristik kurva HVSR ditunjukkan dengan pola kurva HVSR yang terbentuk. Kurva HVSR dari mikrotremor untuk karakterisasi geologi lokal, dipengaruhi parameter-parameter bawah permukaan. Parameter tersebut mempengaruhi nilai frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ) dan nilai puncak kurva HVSR atau faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) yang dihasilkan. Bentuk kurva HVSR bervariasi terkait dengan kondisi geologi bawah permukaan dan proses saat perekaman.

Topologi kurva HVSR hasil pengukuran di lokasi penelitian antara lain yaitu :

#### 1. Kurva HVSR dengan satu puncak

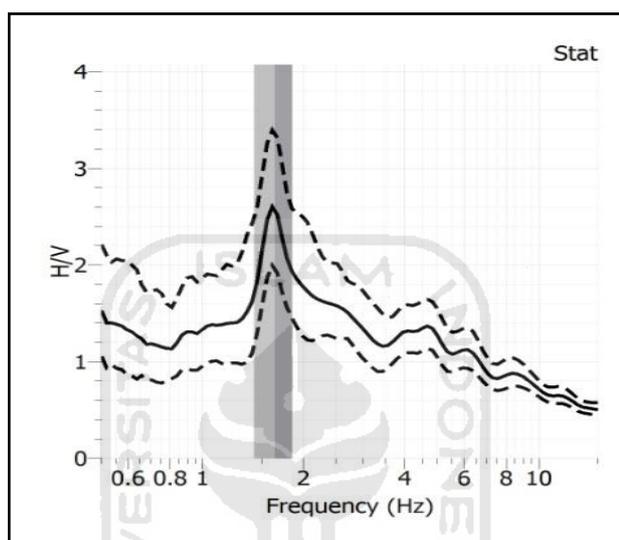
Bentuk kurva dengan puncak yang jelas didapatkan pada kurva HVSR muncul sebagai satu buah puncak tunggal dengan nilai yang signifikan. Puncak seperti ini menunjukkan adanya kontras impedansi pada suatu kedalaman tertentu sehingga gelombang mengalami amplifikasi atau penguatan. Ada syarat yang harus terpenuhi ketika ingin menentukan apakah kurva H/V merupakan puncak yang jelas atau bukan.

Penelitian menjelaskan bahwa suatu kurva H/V dapat dikatakan memiliki puncak yang jelas jika kurva tersebut memiliki beberapa kriteria tertentu yaitu :

- a.  $A_0 > 2$  (nilai puncak kurva lebih dari dua)
- b.  $\exists f^- \in [f_0/4, f_0] < A_0/2$  (nilai puncak kurva turun signifikan ke arah kiri dengan perpotongan di  $(f_0^-, A_0/2)$  dimana nilai  $A_{H/V}(f)$  harus bernilai lebih kecil dari  $A_0/2$ )
- c.  $\exists f^+ \in [f_0/4, f_0] | A_{H/V}(f^+) < A_0/2$  (faktor amplifikasi turun signifikan ke arah kanan dengan perpotongan di  $(f_0^+, A_0/2)$  dimana nilai  $A_{H/V}(f_0^+)$  harus bernilai lebih kecil dari  $A_0/2$ )

Nilai faktor amplifikasi kurva setidaknya harus memiliki nilai lebih dari 2. Kemiringan lereng (*slope*) pada kurva harus menurun secara signifikan, yaitu nilai amplifikasi pada frekuensi selanjutnya harus kurang dari setengah nilai  $A_0$  (SESAME, 2004).

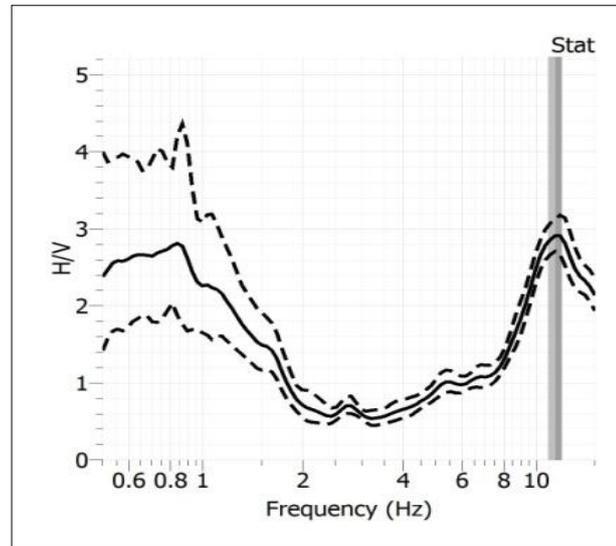
Kurva HVSR dengan satu puncak pada titik ukur mikrotremor dalam penelitian ini salah satunya ditunjukkan pada Gambar 5.7. Dari gambar kurva tersebut nilai amplifikasi kurva pada  $f_0$  adalah 2.56, dan kurva menurun dengan *slope* yang curam dan signifikan, sehingga didapatkan nilai amplifikasi pada  $f_0:1$  jatuh pada nilai amplifikasi disekitar 1.4 yang nilainya kurang dari  $A_0/2 = 1.76$ .



Gambar 5.7 Kurva HVSR dengan satu puncak jelas

## 2. Kurva HVSR dengan dua puncak (*double peak*)

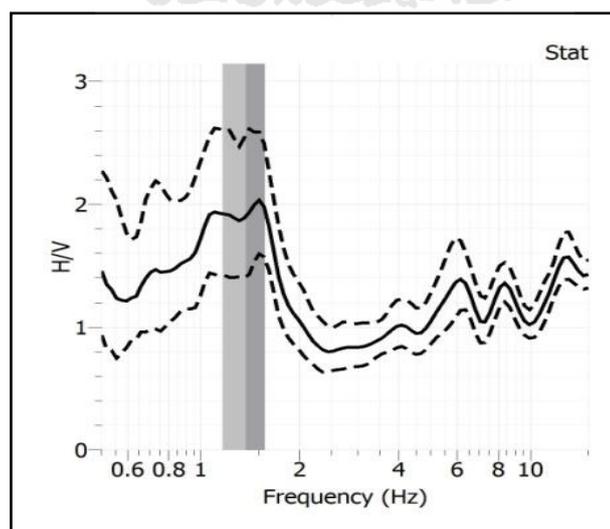
Kurva HVSR yang memiliki dua buah puncak menunjukkan karakteristik tertentu, diasumsikan adanya kontras impedansi pada kedalaman yang berbeda, yaitu kedalaman dangkal dan kedalaman yang lebih dalam. Kurva seperti ini kemungkinan disebabkan oleh keadaan geologi di suatu daerah yang berupa sedimen tidak kompak yang ada di permukaan, kemudian di bawahnya tersusun oleh sedimen yang sudah kompak dan paling bawah tersusun oleh *bedrock* yang sangat kompak, misalnya batuan beku. Bahwa amplifikasi terjadi tidak hanya pada frekuensi rendah tetapi juga dapat terjadi pada frekuensi tinggi. Hal ini dapat terjadi karena faktor geologi maupun non geologi. Kurva dengan puncak ganda seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 5.8.



Gambar 5.8 Kurva dengan dua puncak

### 3. Kurva HVSR dengan puncak lebar

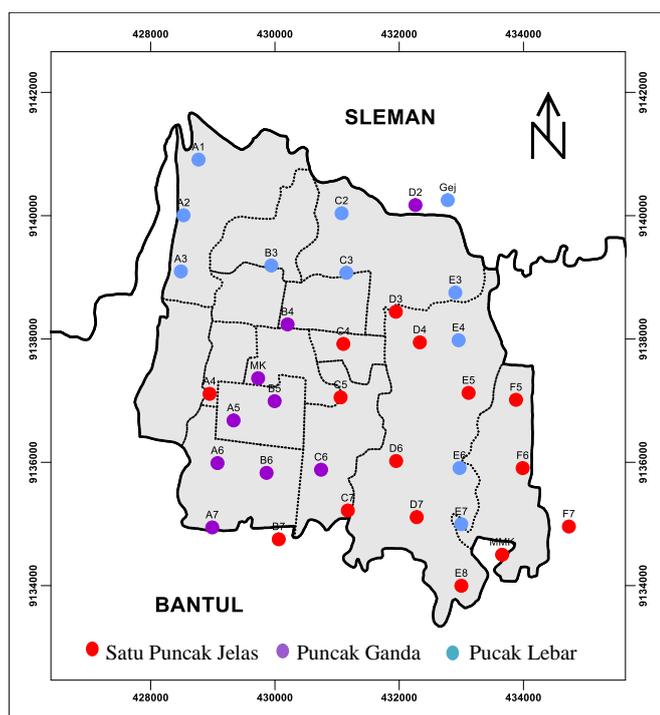
Kurva HVSR yang memiliki puncak yang lebar dimungkinkan berkaitan dengan keadaan geologi lokal atau geometri yang berhubungan dengan cekungan suatu lembah atau *bedrock* yang miring, kemungkinan juga karena adanya variasi struktur *sedimen-bedrock*. Kurva HVSR dengan puncak lebar seperti yang ditunjukkan oleh gambar 5.9.



Gambar 5.9 Kurva dengan puncak lebar

Sebaran tipologi kurva HVSR di daerah penelitian ditunjukkan oleh Gambar 5.10. Titik merah untuk bentuk kurva dengan satu puncak jelas (*single peak*), titik biru untuk kurva dengan puncak lebar (*broad peak*) dan titik ungu untuk bentuk kurva puncak ganda (*double peak*). Peta topologi memperlihatkan kurva *single peak* dominan berada didaerah Tenggara, kurva *double peak* dominan di wilayah Selatan sedangkan kurva *broad peak* dominan berada di Utara dari daerah penelitian.

Diantara penyebab variasi bentuk kurva HVSR adalah variasi kontras impedansi, kekompakan lapisan, kekerasan batuan, geologi bawah permukaan dan lainnya. Herak (2008) menyebutkan enam parameter yang mempengaruhi kurva HVSR, yaitu kecepatan gelombang primer ( $V_p$ ), kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ), ketebalan lapisan ( $h$ ), densitas lapisan ( $\rho$ ), faktor kuasi gelombang ( $Q_p$  dan  $Q_s$ ).



Gambar 5.10 Distribusi tipologi kurva HVSR

Dari karakterisasi kurva HVSR yang dilakukan Sungkono (2008) menggunakan *software* ModelHVSR dari Herak (Herak, 2008) menunjukkan

pengaruh dari parameter diatas mempunyai pengaruh yang berbeda-beda. Kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) mempengaruhi nilai frekuensi dominan dan nilai faktor amplifikasi spektrum cukup signifikan. Hal ini dikarenakan kecepatan gelombang geser berpengaruh terhadap nilai kontras impedansi lapisan tanah. Pada kecepatan yang lebih rendah, nilai amplifikasi akan lebih besar dari pada lapisan yang mempunyai kecepatan lebih tinggi.

Sedangkan variasi dari gelombang primer  $v_p$ , tidak berpengaruh terhadap frekuensi dominan namun berpengaruh terhadap faktor amplifikasi. Faktor amplifikasi berbanding lurus dengan  $v_p$ , namun pengaruh  $v_p$  pada nilai puncak kurva HVSR tidak sebesar  $v_s$ .

Ketebalan lapisan ( $h$ ) berpengaruh secara signifikan pada frekuensi dominan. Semakin besar tebal lapisan sedimen, nilai frekuensi dominan semakin kecil demikian sebaliknya, semakin kecil lapisan sedimen nilai frekuensi dominan semakin tinggi. Nilai frekuensi yang diukur diatas perbukitan akan bernilai lebih besar jika dibandingkan dengan nilai ukur di lembah. Ketebalan lapisan sedimen juga berpengaruh pada nilai puncak kurva HVSR meski relatif kecil. Ini menunjukkan bahwa, ketebalan lapisan berpengaruh pada frekuensi dominan dan nilai amplifikasi.

Pengaruh densitas lapisan tanah ( $\rho$ ) terhadap kurva HVSR terkait oleh adanya kontras impedansi. Namun densitas hanya mempengaruhi nilai puncak kurva HVSR (faktor amplifikasi spektrum tanah) dan tidak mempengaruhi frekuensi dominan. Pengaruh densitas bawah permukaan terhadap kurva HVSR tidak sebesar  $v_s$  bawah permukaan.

Estimasi besarnya pengaruh variasi faktor Quasi P ( $Qp$ ) pada kurva HVSR didapatkan bahwa  $Qp$  tidak berpengaruh terhadap kurva HVSR pada  $v_s/v_p$  rendah (rasio Poisson tinggi), parameter ini pada umumnya terdapat pada batuan sedimen. Hal ini sesuai dengan Xia et al. (2002), yang mengatakan bahwa pada rasio  $v_s/v_p$  rendah,  $Qp$  memiliki efek kecil terhadap redaman gelombang.

Variasi faktor Quasi S ( $Qs$ ) terhadap nilai puncak kurva HVSR tetapi tidak berpengaruh terhadap frekuensi dominan. Kuo (2009) menunjukkan bahwa penjalaran gelombang SH sebagai fungsi frekuensi (fungsi transfer gelombang

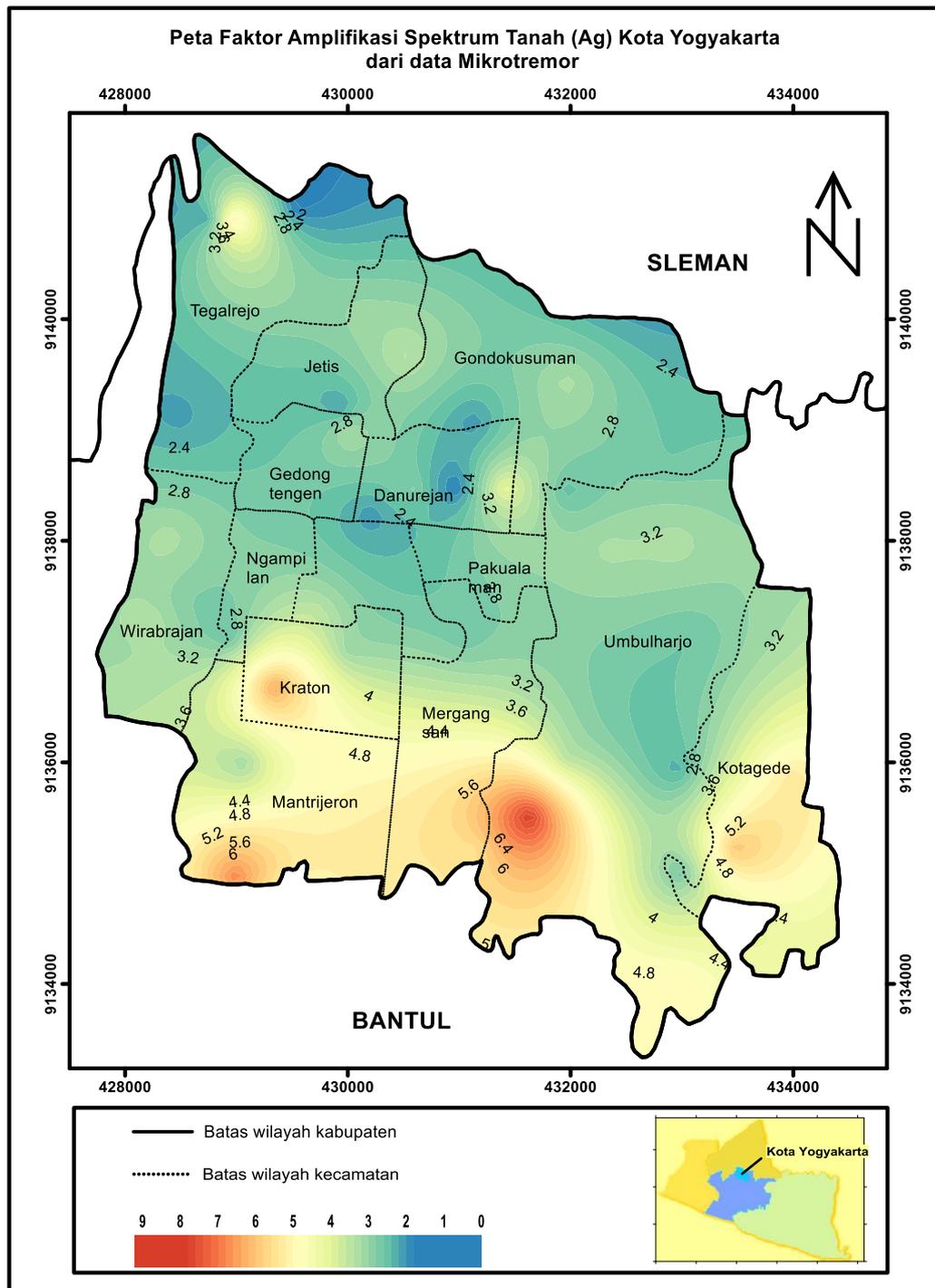
SH) dipengaruhi oleh faktor quasi gelombang geser ( $Q_s$ ). Amplitudo fungsi transfer gelombang SH berbanding lurus dengan  $Q_s$  dan frekuensi amplitudo puncak tidak terpengaruh dengan  $Q_s$ . Oleh karena itulah, amplifikasi dipengaruhi  $Q_s$  dan frekuensi dominan tidak bergantung  $Q_s$ .

### 5.1.3 Peta Sebaran nilai Faktor Amplifikasi Spektrum Tanah ( $A_g$ )

Kerusakan bangunan akibat gempa selain dipengaruhi kekuatan gempa itu sendiri sangat dipengaruhi oleh amplifikasi dari *bedrock* sampai permukaan tanah. Amplifikasi tanah setempat dikontrol oleh faktor-faktor *sedimentary* tanah diantaranya densitas lapisan tanah, kecepatan gelombang geser, karakteristik redaman dan sebagainya. Faktor amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) merupakan nilai puncak kurva HVSR dan cerminan dari sifat fisik keras lunaknya sedimen. Secara teoritis jika nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya besar maka sedimen di daerah itu semakin lunak, sebaliknya jika nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya rendah, maka semakin keras lapisan sedimennya. Hal ini juga dapat disimpulkan jika nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya besar potensi kerusakan bangunan di daerah tersebut juga semakin besar jika daerah tersebut terkena guncangan gempa.

Dengan demikian, daerah yang rawan kerusakan bangunan akibat getaran gempa ialah daerah yang permukaannya tersusun atas sedimen lunak (gambut, pasir, pasir lanauan) dengan *bedrock* yang keras. Karena pada kondisi geologi yang seperti ini, kontras impedansinya (perbedaan antara lapisan sedimen dan *bedrock*) besar. Sebaran nilai faktor amplifikasi tanah di Kota Yogyakarta ditunjukkan pada gambar 5.11. Nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 1.69 sampai dengan 6.48. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan lampiran 1. Menurut Seiawan (2008) nilai faktor amplifikasi tanah yang dihasilkan dari pengukuran mikrotremor terbagi menjadi 4 zona yaitu :

- |                                  |                    |
|----------------------------------|--------------------|
| 1.zona amplifikasi rendah        | : $A_g < 3$        |
| 2.zona amplifikasi sedang        | : $3 \leq A_g < 6$ |
| 3.zona amplifikasi tinggi        | : $6 \leq A_g < 9$ |
| 4.zona amplifikasi sangat tinggi | : $A_g \geq 9$     |



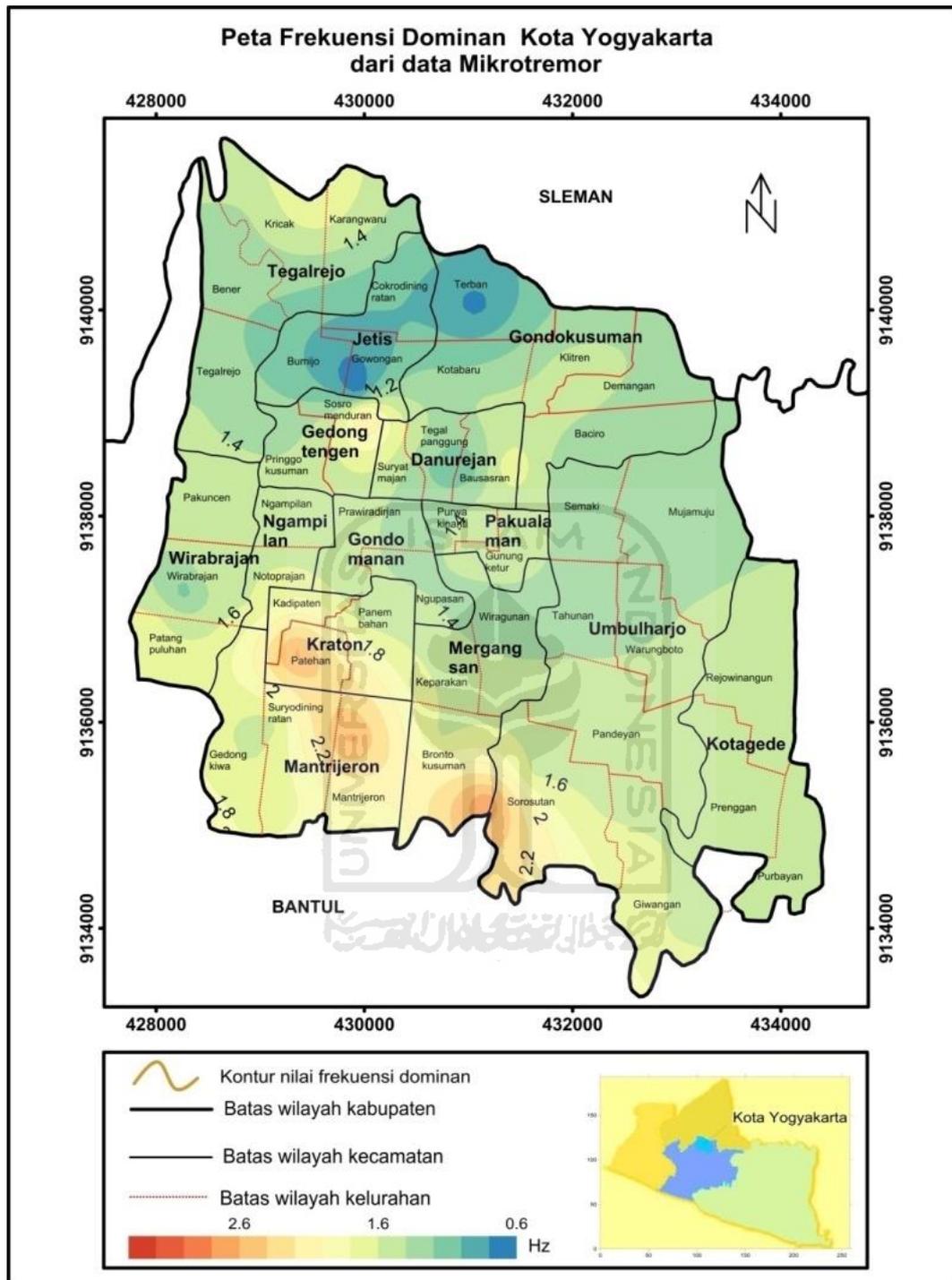
Gambar 5.11 Peta faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ )

Berdasar klasifikasi tersebut nilai amplifikasi tanah didaerah penelitian berkisar dari zona dengan nilai relatif rendah sampai sedang. Daerah dengan nilai amplifikasi spektrum tanah ( $A_g$ ) rendah meliputi sebagian besar bagian tengah

wilayah Kota Yogyakarta sampai dengan wilayah utara, meliputi Kecamatan Tegalreja (kecuali di Kelurahan Kricak yang masuk kategori sedang), Kecamatan Jetis, Kecamatan Gondokusuman, Kecamatan Wirabrajan, Kecamatan Gedongtengen, Kecamatan Ngampilan, bagian utara Kecamatan Umbulharjo dengan nilai  $A_g$  kurang dari 3. Sedangkan zona wilayah yang mempunyai nilai faktor amplifikasi spektrum tanah relatif sedang berada di wilayah sebagian wilayah tengah dan selatan, meliputi bagian selatan Kecamatan Mantrijeron, Kecamatan Mergangsan, di Kecamatan Umbulharjo bagian tengah hingga selatan terutama sekitar Kelurahan Sorosutan, Giwangan, Pandeyan dan kecamatan Kotagede dengan nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 3 sampai dengan 6. Nilai nilai puncak kurva HVSR yang juga merupakan nilai faktor amplifikasi tanah  $A_g$  menunjukkan adanya perubahan impedansi dari per lapisan, kemungkinan adanya perubahan  $v_s$  atau perubahan densitas yang disebabkan oleh perubahan kekompakan batuan. Hal ini menjadikan daerah dengan nilai faktor amplifikasi tanahnya tinggi menjadi lebih rentan terhadap guncangan gempa bumi.

#### **5.1.4 Peta Sebaran nilai Frekuensi Dominan Tanah ( $f_g$ )**

Frekuensi merepresentasikan banyaknya gelombang yang terjadi dalam satuan waktu. Frekuensi dominan adalah frekuensi saat dimana nilai puncak kurva HVSR terjadi. Peta sebaran frekuensi dominan tanah di Kota Yogyakarta, ditunjukkan pada gambar 5.12. Nilai frekuensi dominan didaerah penelitian berkisar antara 0.62 Hz sampai dengan 3,4 Hz. Dari peta frekuensi dominan dapat dilihat daerah yang mempunyai nilai frekuensi tanah tinggi berada di daerah Kecamatan Kraton di Kelurahan Patehan, Kecamatan Mantrijeron di sekitar Kelurahan Mantrijeron dan di Kecamatan Mergangsan di Kelurahan Brontokusuman serta di Kecamatan Umbulharjo di bagian selatan Kelurahan Sorosutan. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan lampiran 1.



Gambar 5.12 Peta frekuensi dominan tanah (fg)

Daerah yang mempunyai frekuensi rendah berada didaerah Kelurahan Gowongan bagian selatan Kecamatan Jetis dan Kelurahan Terban bagian Kecamatan Gondokusuman. Frekuensi dominan dipengaruhi oleh besarnya

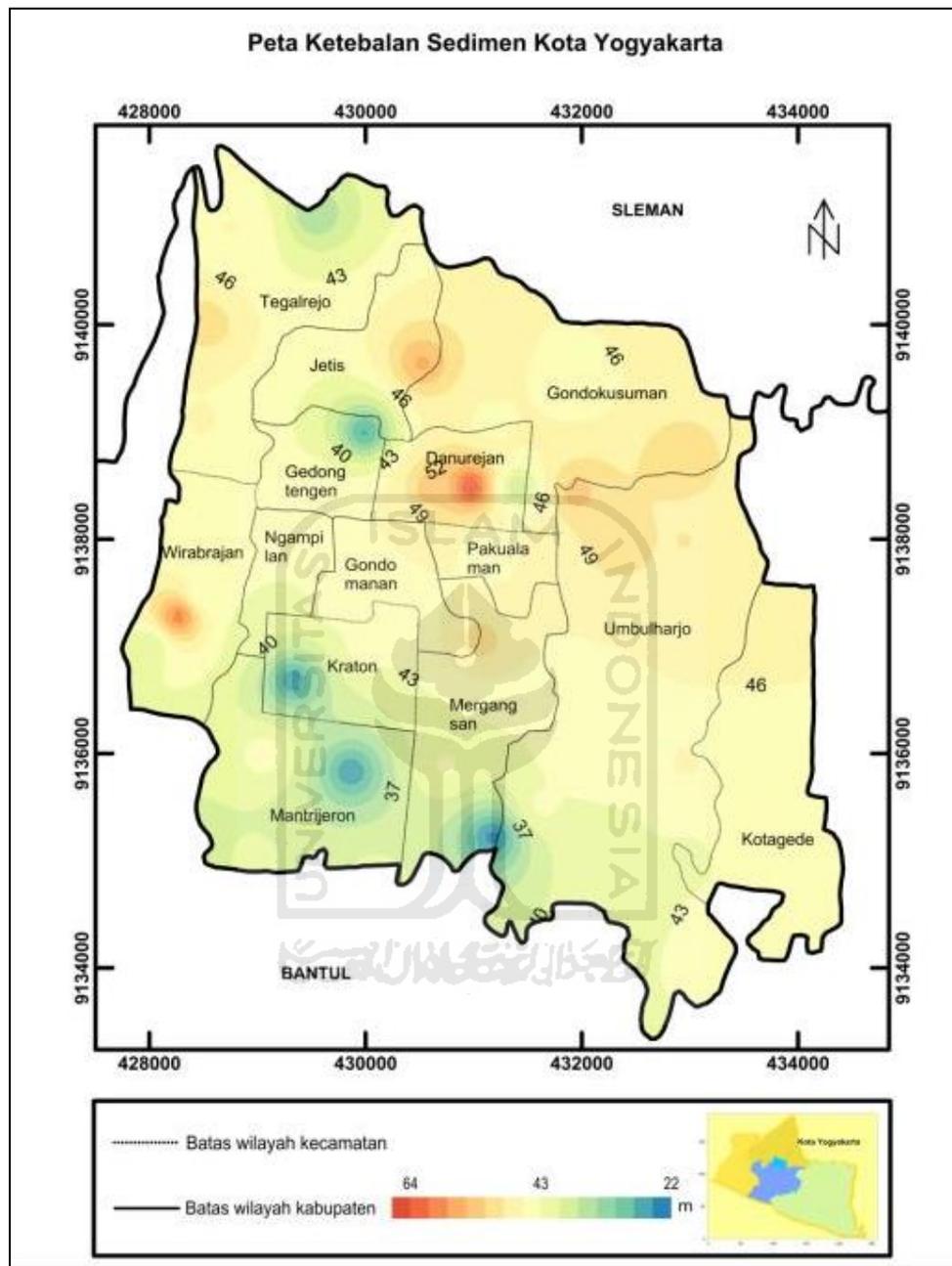
kecepatan rata-rata gelombang geser ( $v_s$ ) dan ketebalan sedimen bawah permukaan ( $h$ ). Keras atau lunaknya lapisan bawah permukaan berpengaruh terhadap kecepatan gelombang geser. Sedemikian frekuensi dominan dipengaruhi oleh keras lunaknya lapisan tanah. Frekuensi dominan berbanding terbalik dengan ketebalan sedimen dan berbanding lurus dengan kecepatan rata-rata gelombang sekunder. Pada daerah sedimen dengan tingkat kekerasan dan jenis tanah yang sama, nilai frekuensi dominan yang tinggi berkorelasi dengan daerah yang memiliki ketebalan sedimen rendah dan demikian sebaliknya daerah dengan nilai frekuensi dominan rendah berkorelasi dengan ketebalan sedimen yang tinggi.

### 5.1.5 Peta sebaran ketebalan Sedimen Kota Yogyakarta

Ketebalan sedimen dihitung dengan menggunakan rumusan seperti dalam persamaan 3.6. Selain frekuensi dominan, kecepatan gelombang sekunder juga menentukan hasil perhitungan ketebalan sedimen. Ketebalan sedimen dalam penelitian ini dihitung dengan menggunakan kecepatan gelombang sekunder dari korelasi  $V_s$  dan N-SPT (rumusan Imai and Tonouchi, 1982). Secara umum daerah penelitian mempunyai ketebalan berkisar antara 22.42m sampai dengan 64.85m (Gambar 5.13). Daerah dengan ketebalan relatif tinggi berada di sebagian wilayah Kecamatan Danurejan dengan ketebalan mencapai 64 m. Daerah dengan ketebalan lebih rendah (sekitar 22 sampai dengan 40 m) berada di wilayah Kecamatan Kraton, Kecamatan Mantrijeron dan bagian selatan Kecamatan Mergangsan. Di bagian lain wilayah Kota Yogyakarta ketebalan di antara 45 sampai dengan 55m. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan lampiran 3.

Nilai ketebalan terkait dengan nilai frekuensi dominan tanah. Secara grafik hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen di tunjukkan oleh Gambar 5.14.

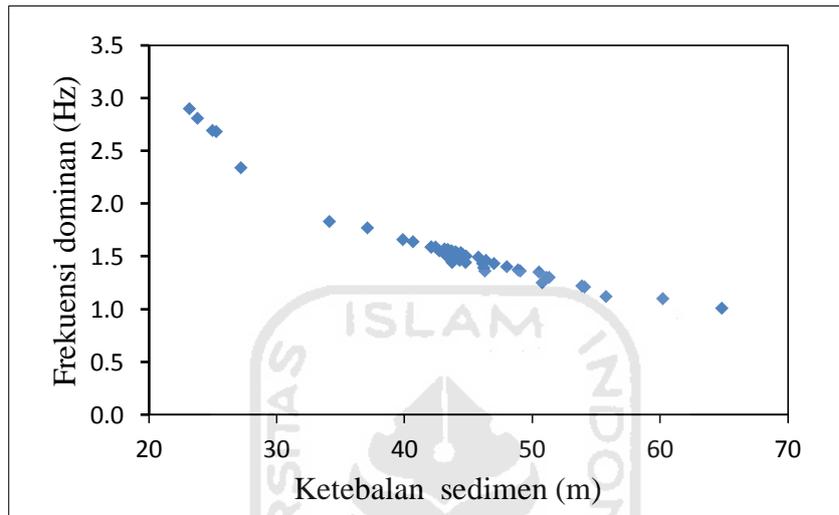
Menurut Bard (2000) dalam Daryono (2010), hubungan antara frekuensi dengan ketebalan sedimen membentuk sebuah hubungan berbanding terbalik. Hubungan antara frekuensi resonansi dengan ketebalan sedimen dinyatakan dalam persamaan  $f_o = v_{rata-rata}/4h$ ;  $f_o$  adalah frekuensi resonansi sedangkan  $h$  adalah tebal sedimen,  $v_{rata-rata}$  adalah rata-rata kecepatan gelombang geser.



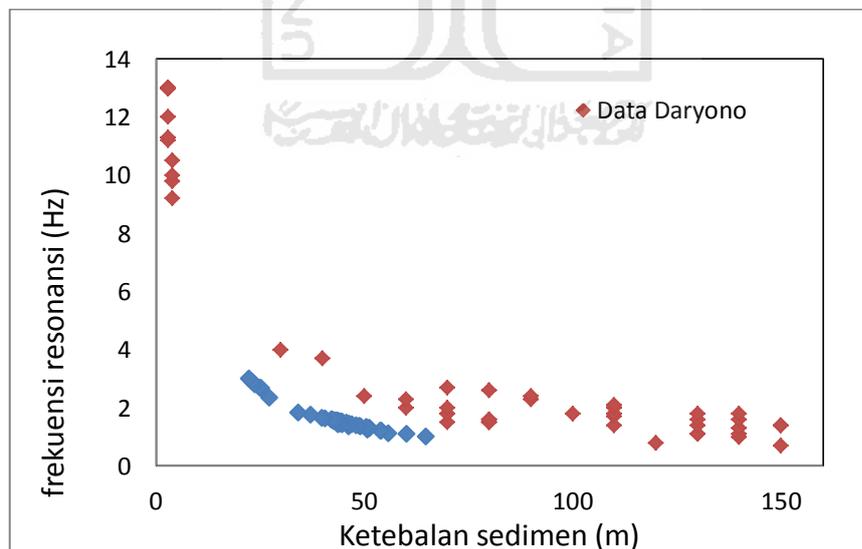
Gambar 5.13 Peta ketebalan sedimen

Sebagai perbandingan hubungan kedalaman sedimen dengan nilai frekuensi terukur di titik penelitian ditunjukkan hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan hasil pengukuran oleh Daryono (Daryono, 2010). Nilai nilai data hubungan frekuensi dengan kedalaman hampir sama tidak menyebar. Hal ini

menunjukkan kedua data relevan. Sebaran data penelitian Daryono lebih banyak dengan variasi nilai frekuensi dominan yang lebih banyak, ditunjukkan oleh Gambar (5.15). Hal ini dikarenakan wilayah penelitian tersebut lebih luas dan kondisi geologi yang lebih bervariasi.



Gambar 5.14. Grafik hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen



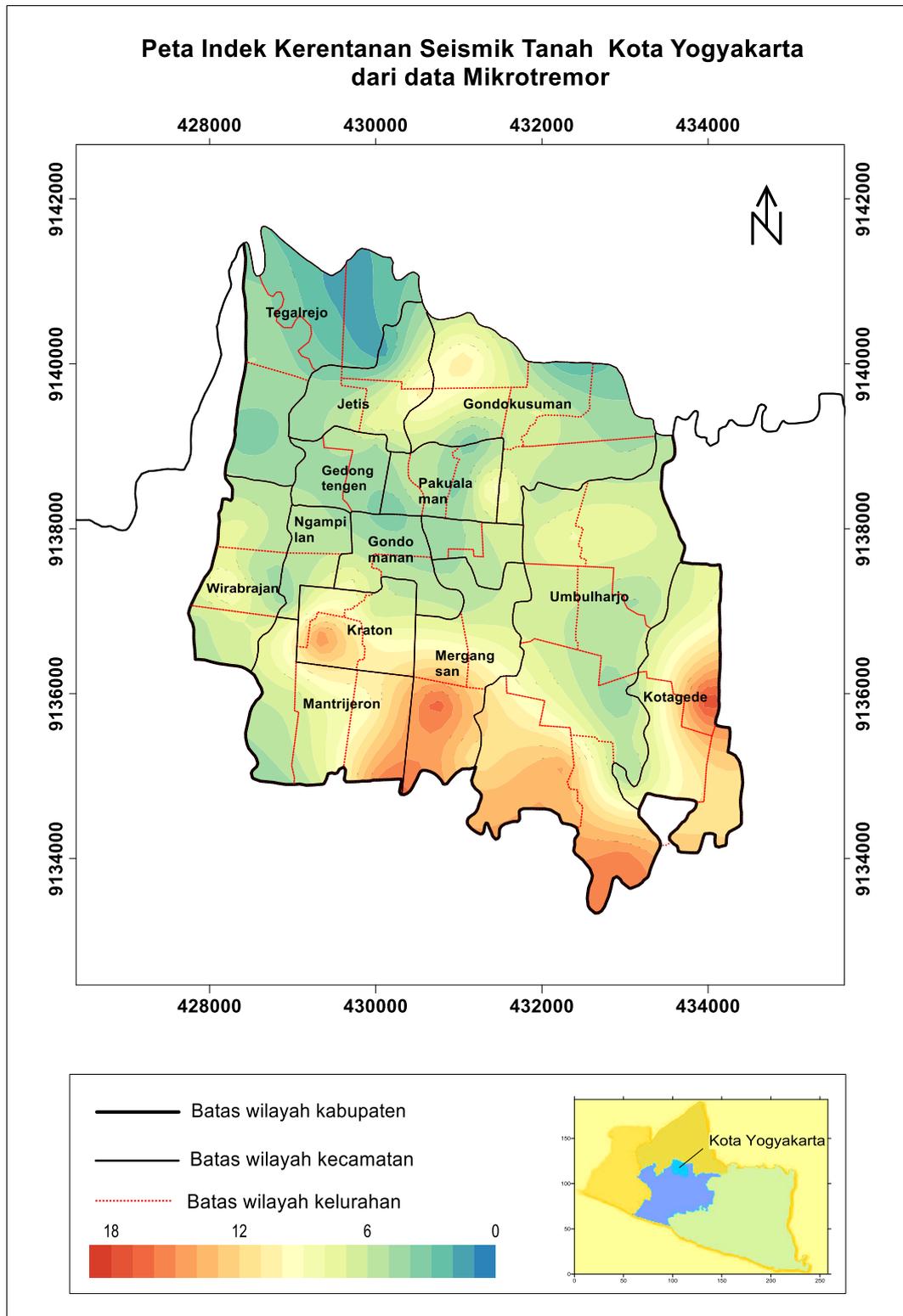
Gambar 5.15. Grafik hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen dari data penelitian Daryono (2011) dan penulis.

### 5.1.6 Peta sebaran nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ )

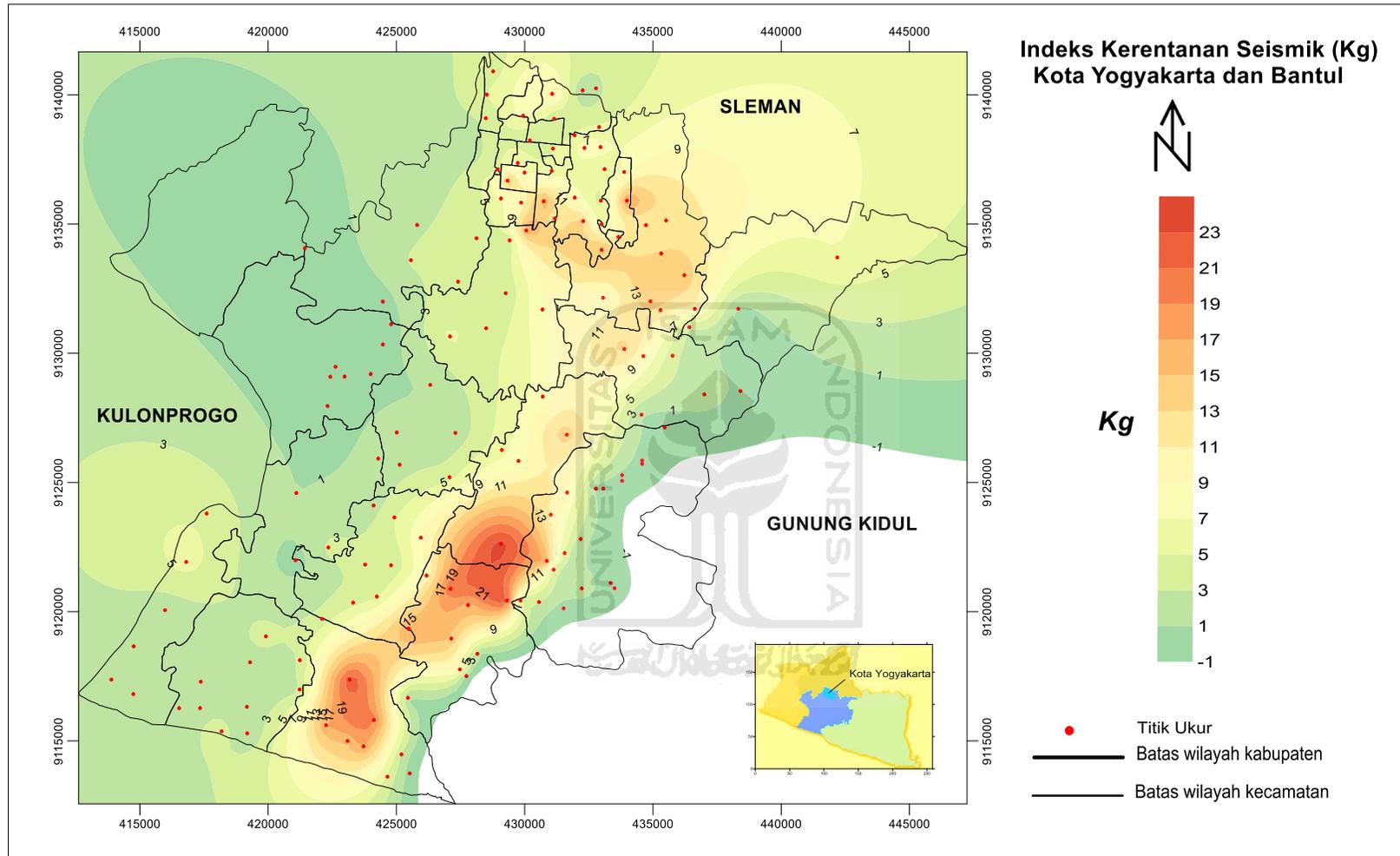
Nilai indeks kerentanan seismik diperoleh dari perhitungan dengan persamaan 3.7. Besarnya nilai indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi tanah dan periode dominan tanah. Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi diperoleh pada daerah dengan nilai amplifikasi tinggi dan nilai  $f_g$  rendah. Nilai amplifikasi tinggi berkaitan dengan daerah dengan kontras impedansi tinggi, nilai  $f_g$  kecil berkaitan dengan daerah dengan ketebalan besar dengan kekompakan tinggi. Nilai indeks kerentanan seismik rendah diperoleh pada daerah dengan nilai amplifikasi rendah dan nilai frekuensi dominannya tinggi. Daerah tersebut mempunyai kontras impedansi rendah dengan ketebalan lapisan sedimennya tipis, daerah ini umumnya berada di daerah perbukitan. Untuk wilayah Kota Yogyakarta yang tidak ada perbukitannya, dimungkinkan rendahnya nilai indeks kerentanan seismiknya karena nilai amplifikasinya yang rendah dan nilai frekuensi dominannya tinggi. Daerah ini mempunyai kontras impedansi rendah dengan batuan atau tanahnya kompak dan relatif tidak tebal.

Kontras impedansi mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap nilai faktor amplifikasi tanah ( $A_g$ ), sehingga memberikan nilai indeks kerentanan yang tinggi di daerah ini. Hal ini berarti nilai beda kecepatan gelombang geser daerah ini besar menyebabkan nilai kontras densitas antara sedimen dan *bedrock* di daerah ini juga besar. Pada daerah ini indeks kerentanan seismik tinggi, yang berarti daerah ini tingkat kerawanan seismiknya lebih tinggi.

Hasil penelitian indeks kerentanan seismik dalam penelitian ini, ditunjukkan oleh Gambar 5.16. Nilai indeks kerentanan seismik tanah berkisar antara 0.65 sampai dengan 18.08. Nilai indeks kerentanan seismik relatif tinggi berada di daerah bagian selatan dari Kota Yogyakarta meliputi daerah Kecamatan Kotagede, bagian selatan Kecamatan Umbulharjo, Kecamatan Mergangsan, Kecamatan Mantriweron dan sebagian wilayah Kecamatan Kraton. Nilai indeks kerentanan seismik relatif rendah meliputi wilayah kota Yogyakarta bagian tengah hingga Utara. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan lampiran 1.



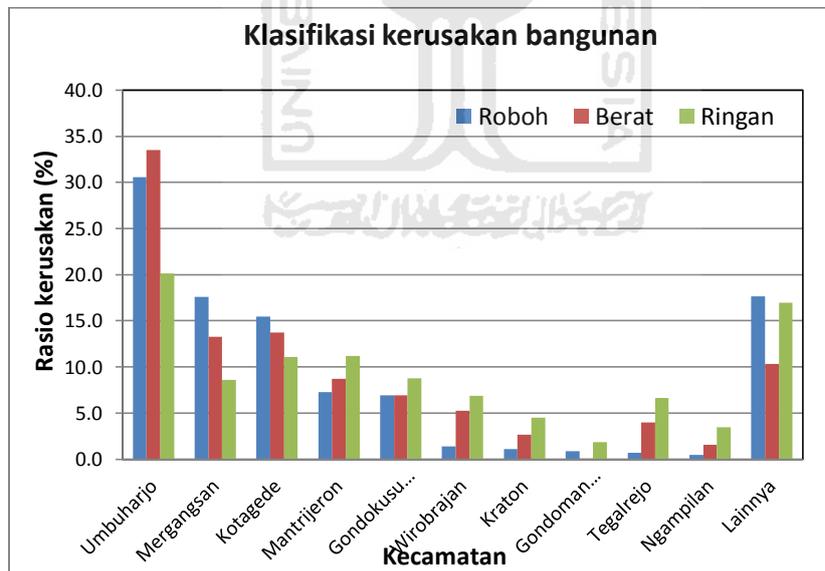
Gambar 5.16 Peta distribusi indeks kerentanan seismik ( $K_g$ )



Gambar 5.17 Peta distribusi indek kerentanan seismik ( $K_g$ )

Daerah penelitian yang dilakukan oleh penulis berbatas langsung dengan wilayah kabupaten Bantul. Penelitian indeks kerentanan seismik di daerah Kabupaten Bantul telah dilakukan pengukuran dan penelitian salah satunya dilakukan oleh Daryono (2010). Untuk melihat distribusi nilai indeks kerentanan seismik tanah secara lebih luas, hasil penelitian indeks kerentanan seismik tanah oleh Daryono di kemudian digabung dengan hasil penelitian penulis. Hasil penggabungan nilai indeks kerentanan seismik ditunjukkan oleh gambar 5.17. Variasi nilai indeks kerentanan seismik pada daerah berdekatan atau berbatasan langsung antara daerah penelitian yang dilakukan oleh Daryono dengan daerah penelitian oleh penulis tidak menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan.

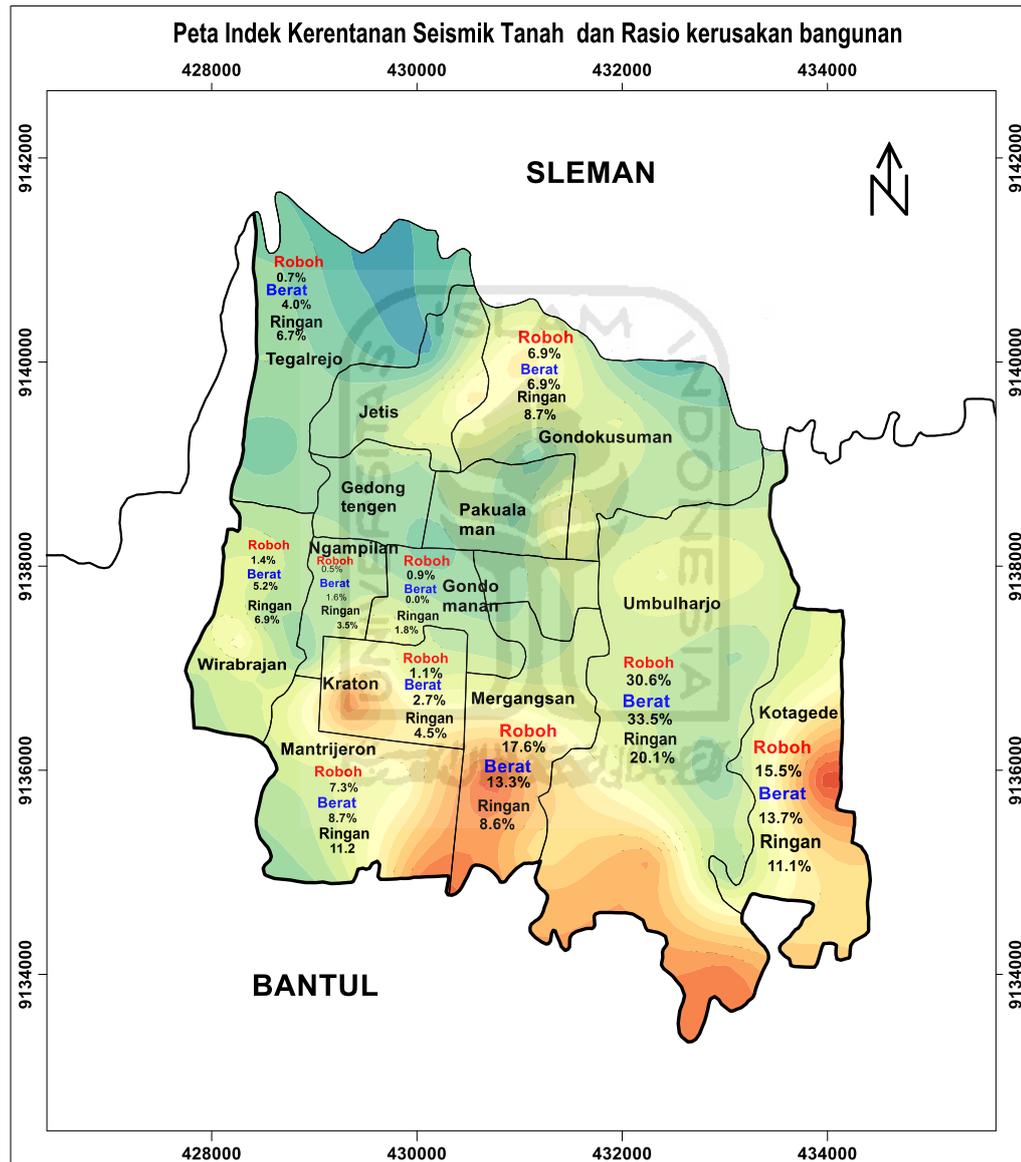
Penelitian hubungan indeks kerentanan dengan rasio kerusakan bangunan akibat gempa Yogyakarta 2006 ditunjukkan oleh grafik gambar 5.18. Kerusakan diklasifikasikan sebagai roboh, rusak berat dan rusak ringan. Peta yang menggambarkan nilai  $K_g$  dengan rasio/prosentase kerusakan bangunan yang ada di wilayah Kota Yogyakarta ditunjukkan oleh Gambar 5.19.



Gambar 5.18 Rasio kerusakan bangunan

Gambar menunjukkan bahwa terlihat prosentase terbesar kerusakan terjadi di Kecamatan Umbulharjo, Mergangsan dan Kotagede. Kecamatan-kecamatan ini berada di wilayah bagian selatan dari Kota Yogyakarta. Hubungan sebaran rasio

kerusakan dengan nilai  $K_g$  terlihat relatif berbanding lurus. Daerah dengan nilai  $K_g$  relatif lebih tinggi kerusakan bangunannya lebih banyak atau lebih parah. Hal ini ditunjukkan kecamatan dengan nilai  $K_g$  relatif lebih besar kerusakan bangunannya juga lebih besar.



Gambar 5.19 Peta  $K_g$  dan rasio kerusakan bangunan

## 5. 2 Analisis Percepatan Puncak Tanah (*Peak Ground Acceleration* )

### 5.2.1 Penentuan PGA berdasarkan SNI 1726-2002

Penentuan PGA di setiap negara mempunyai dasar yang berbeda, tergantung pada peraturan yang berlaku di negara tersebut. Di Indonesia, percepatan puncak tanah/batuan dasar ditentukan berdasarkan SNI-1726-2002 yang dimodifikasi tahun 2010. Pembagian wilayah gempa ini didasarkan pada percepatan puncak batuan dasar akibat pengaruh gempa rencana dengan periode ulang 50 tahun. Penentuan PGA didasarkan pada sejarah kegempaan (*historical earthquake*), gempa maksimum yang mungkin terjadi (*maximum probable earthquake*) dan kondisi tanah setempat.

PGA menurut SNI 1726-2002 dapat diperoleh melalui tiga tahapan :

1. Penentuan zona seismik berdasarkan peta zonasi gempa Indonesia
2. Penentuan tipe tanah berdasarkan salah satu nilai rata-rata hasil uji SPT, *undrained shear strength* atau *shear wave velocity* sesuai dengan Tabel 5.2 tentang klasifikasi tanah.
3. Penentuan PGA dengan menggabungkan nilai zona wilayah pada langkah (1) dan tipe tanah pada langkah (2) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5.3.

Tabel 5.2. Klasifikasi Tanah menurut SNI-1726-2002

| Jenis Tanah  | Kecepatan Rambat Gelombang Geser rata-rata $\bar{V}_s$ (m/s)  | Nilai Standard Penetration Test rata-rata $\bar{N}$ | Kuat geser niralir rata-rata, $\bar{S}_u$ (kPa) |
|--------------|---|---|---|
| Tanah Keras  | $\bar{V}_s \geq 350$  | $\bar{N} \geq 50$                                   | $\bar{S}_u \geq 100$                            |
| Tanah Sedang | $175 \leq \bar{V}_s \leq 350$   | $15 \leq \bar{N} \leq 50$                           | $50 \leq \bar{S}_u \leq 100$                    |
| Tanah Lunak  | $\bar{V}_s < 175$   | $\bar{N} < 15$                                      | $\bar{S}_u < 50$                                |
|              | Atau, setiap profil dengan tanah lunak yang tebal total lebih dari 3m dengan $PI > 20$ , $W_n \geq 40\%$ dan $S_u < 50$ kPa |   |   |
| Tanah Khusus | Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi   |   |   |

Tabel 5.3 Percepatan batuan dasar dan percepatan puncak tanah/batuan dasar untuk setiap zona seismik dan jenis tanah di Indonesia

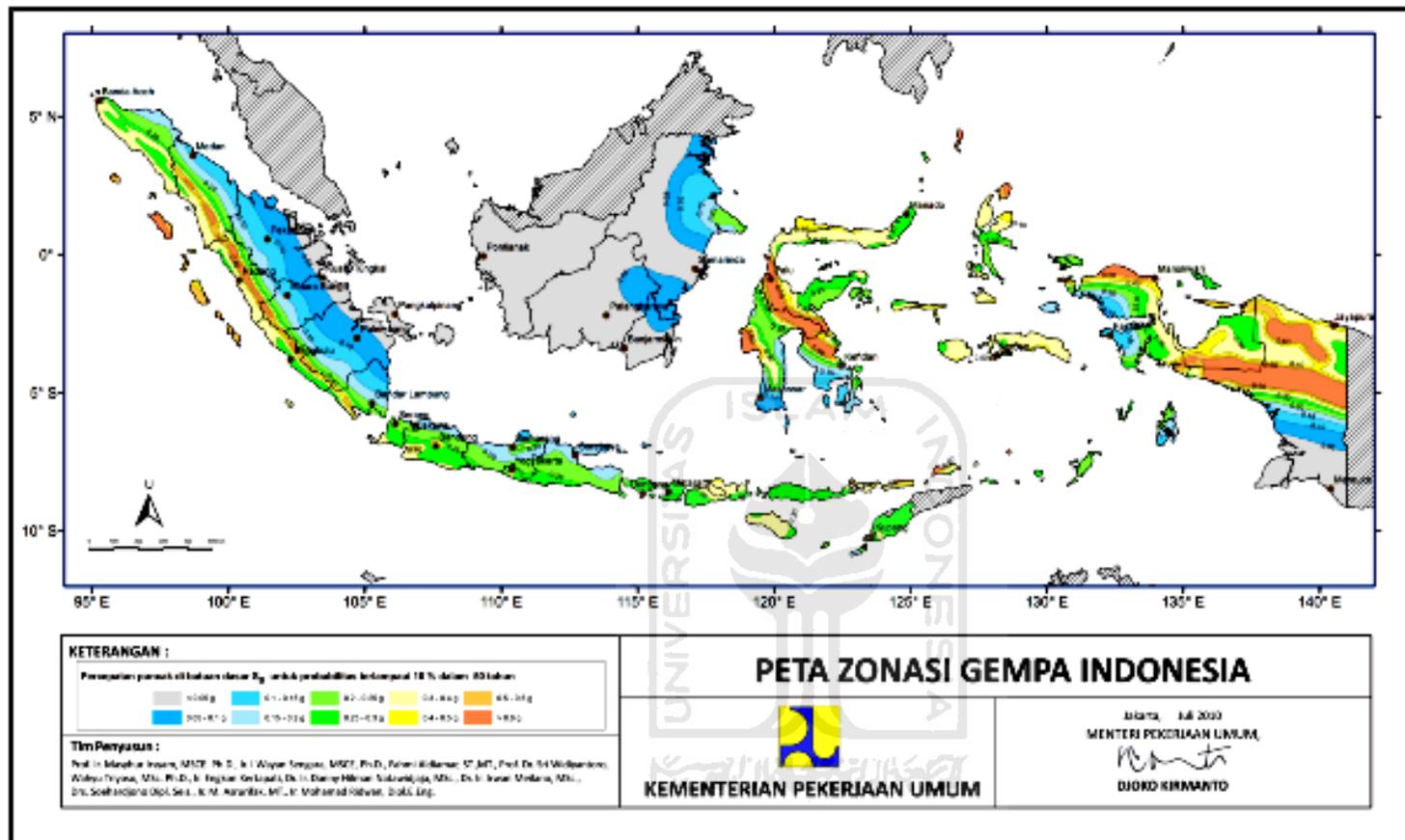
| Wilayah Gempa | Percepatan puncak batuan dasar (g) | Percepatan puncak muka tanah $A_0$ (g) |              |             |   |
|---------------|------------------------------------|--|--------------|-------------|---|
|               |                                    | Tanah Keras                            | Tanah Sedang | Tanah Lunak | Tanah Khusus                                |
| 1             | 0.03                               | 0.04                                   | 0.05         | 0.05        | Diperlukan evaluasi khusus di setiap lokasi |
| 2             | 0.10                               | 0.12                                   | 0.15         | 0.15        |   |
| 3             | 0.15                               | 0.18                                   | 0.23         | 0.23        |   |
| 4             | 0.20                               | 0.24                                   | 0.28         | 0.28        |   |
| 5             | 0.25                               | 0.28                                   | 0.32         | 0.32        |   |
| 6             | 0.30                               | 0.33                                   | 0.36         | 0.36        |   |

Berdasarkan peta Zonasi Gempa Indonesia (Gambar 5.19), wilayah Kota Yogyakarta termasuk zona dengan percepatan puncak batuan dasar 0.20g–0.25g, Dari hasil survei, nilai rata-rata *shear wave velocity* hingga kedalaman 30 meter di daerah Malangan adalah 198,81 m/s dengan nilai rata-rata N-SPT = 30, sedangkan di daerah Sorosutan 240.38 m/s dengan nilai rata-rata N-SPT = 26 (PU-ESDM, 2010).

Dari nilai PGA dan kecepatan gelombang geser tersebut, maka tanah di Kota Yogyakarta termasuk dalam tanah sedang. Kota Yogyakarta mempunyai percepatan puncak batuan dasar 0.25g dan percepatan puncak tanah sedang sebesar 0.32g (Tabel 5.3).

### 5.2.2 PGA Berdasarkan Rumusan Atenuasi Champbel 1989

Dalam penelitian ini rumusan atenuasi di batuan dasar yang digunakan adalah atenuasi Champbell 1989, seperti tertulis pada persamaan 3.8. Perhitungan menggunakan model PGA *point source*, karena perhitungannya lebih sederhana. Hasil perhitungan PGA (*peak ground acceleration*) di batuan dasar yang dihitung menggunakan rumus tersebut menunjukkan bahwa pada saat gempa bumi Bantul 27 Mei 2006 (M 6,3) di wilayah Kota Yogyakarta mengalami PGA di batuan dasar berkisar antara 126 gal sampai dengan 160 gal. Persebaran nilai PGA di batuan dasar ini tampak bahwa nilai PGA nilai terbesar terdapat pada daerah yang lebih dekat dengan sumber gempa, karena atenuasi ini hanya



Gambar 5.20 Peta percepatan puncak gempa (PGA) dibatuan dasar untuk probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun



### 5.2.3 PGA berdasarkan survei mikrotremor (PGA Kanai)

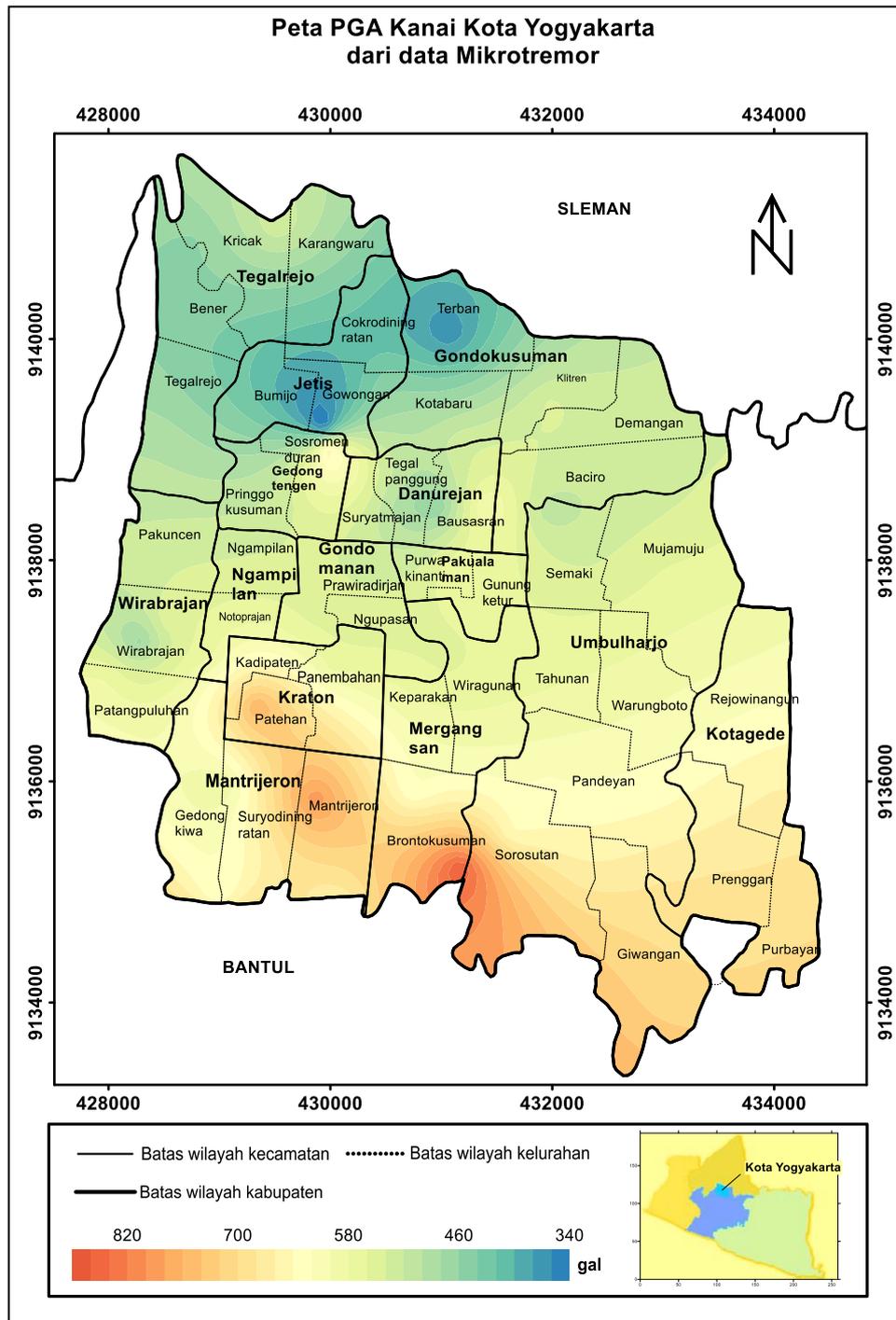
Persamaan atenuasi Kanai (1966) seperti tersebut dalam persamaan 3.12, atenuasi ini menunjukkan nilai percepatan puncak tanah (PGA) berkaitan dengan kondisi tanah setempat, dalam hal ini periode dominan tanah disamping besar magnitudo dan jarak sumber gempa.

Survei mikrotremor menghasilkan nilai frekuensi dominan di titik ukur, dan dari nilai ini dapat diketahui nilai periode dominannya. Nilai PGA Kanai berbanding lurus dengan frekuensi dominan tanah atau berbanding terbalik dengan dengan nilai periode dominan tanahnya. Daerah dengan frekuensi dominan tinggi akan memberikan respon nilai PGA Kanai yang lebih tinggi, demikian sebaliknya daerah dengan periode dominan rendah akan memberikan nilai PGA Kanai Tinggi.

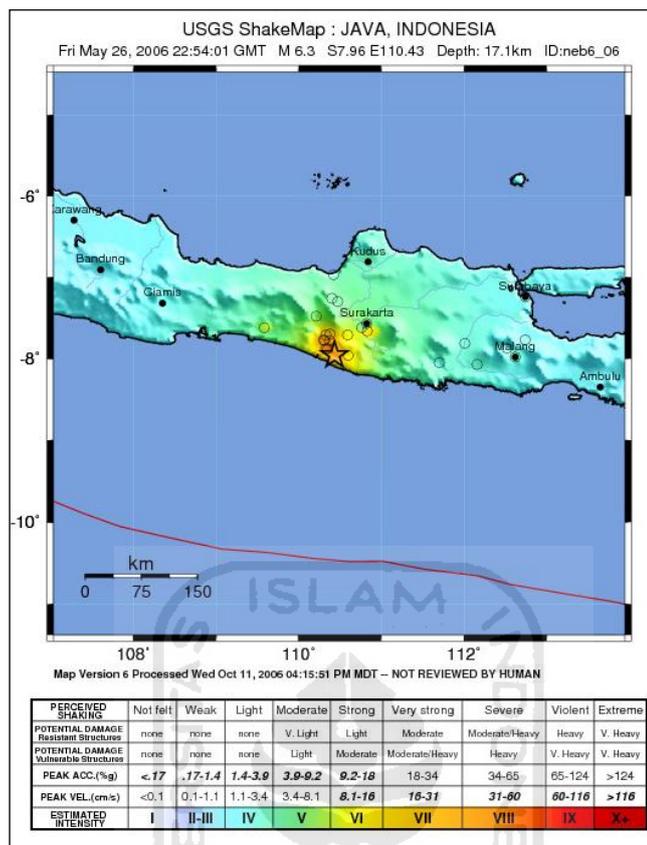
Hasil perhitungan PGA (*peak ground acceleration*) dengan rumusan atenuasi Kanai dengan parameter gempa bumi Bantul 27 Mei 2006 (Mw 6,3), di wilayah Kota Yogyakarta mengalami PGA dipermukaan berkisar antara 338.11 gal sampai dengan 868.74 gal. Nilai PGA terbesar selain ditentukan oleh jarak dan magnitudo gempanya, terkait pula dengan kondisi tanah setempat. Nilai rata-rata PGA Kanai di Kota Yogyakarta 589.12 gal. Daerah dengan nilai PGA relatif lebih besar berada di wilayah Kecamatan Kraton, Kecamatan Mergangsan dan Kecamatan Umbulharjo di wilayah Kelurahan Sorosutan dan Malangan. Nilai PGA Kanai relatif rendah berada di sekitar daerah Kecamatan Terban dan Kecamatan Jetis. Peta persebaran PGA Kanai di tunjukkan pada Gambar 5.22.

Jika dibandingkan dengan sebaran peta *shakemap* yang dihasilkan USGS terdapat perbedaan nilai dari keduanya. Hal ini dikarenakan terdapat perbedaan rumusan dalam menentukan besarnya PGA. PGA Kanai memperhitungkan pengaruh dari kondisi site yang di cerminkan dari nilai periode dominan tanah setempat. Peta *shakemap* USGS pada saat gempa 26 mei 2006 (Gambar 5.23). Estimasi besarnya intensitas gempa sekitar VIII MMI dengan rentang besarnya PGA adalah 34-65% g atau sekitar 340 sampai 650 gal. Nilai PGA Kanai yang lebih besar dari nilai dari USGS kemungkinan karena adanya resonansi saat

terjadinya gempa bumi akibat adanya *local site effect* yang bisa memperbesar efek gempa bumi dan terjadi amplifikasi.



Gambar 5.22 Peta distribusi atenuasi Kanai 1966



Gambar 5.23 Peta distribusi getaran (*shakemap*) USGS gempa Jogja 27 Mei 2006

#### 5.2.4 PGA dan *Ground shear strain* perlapisan

*Software* NERA menghitung besarnya *site respon* gempa yang terjadi pada tanah berlapis. Analisis PGA dan *ground shear strain* dengan menggunakan NERA (*Non Linear Earthquake Site Response Analysis*) pada penelitian ini dilakukan pada titik pengukuran Malangan dan Sorosutan, dimana pada titik tersebut terdapat informasi pengeboran sehingga didapat data yang digunakan sebagai input perhitungan PGA menggunakan *software* NERA. Dua titik ini yang merupakan titik uji bor sekaligus titik uji *seismic downhole* dan merupakan titik pengambilan sampel untuk diuji di laboratorium. Titik-titik ini berada di wilayah Kecamatan Umbulharjo.

Input yang berperan penting untuk menghitung akurasi perhitungan NERA adalah profil pelapisan tanah pada titik yang ditinjau, *shear wave velocity*, dan nilai percepatan puncak tanah maksimal. Perlapisan tanah sangat berperan penting

untuk keakurasian perhitungan dan juga berhubungan dengan nilai *shear wave velocity* pada tiap lapisan. Profil tanah di tiap titik tinjauan ditentukan berdasarkan hasil uji bor yang digabungkan dengan hasil uji laboratorium pada beberapa sampel yang diambil dari titik uji bor tersebut

Data *ground motion* dari gempa terdahulu dapat digunakan sebagai *input motion* dalam perhitungan. Selanjutnya NERA akan menskalakan *source ground motion* berdasarkan nilai percepatan puncak maksimal.

*Input motion* dalam perhitungan PGA di Kota Yogyakarta, menggunakan 3 rekaman gempa, yaitu :

1. El Centro 1967
2. Kobe 1995
3. Parkfield

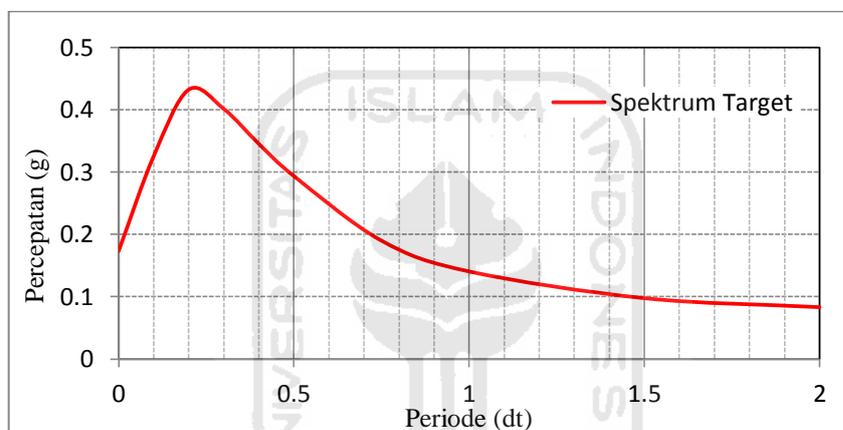
Penggunaan tiga *ground motion* ini untuk mengurangi ketidakpastian perhitungan pada lokasi yang ditinjau. *Input motion* tersebut kemudian diskalakan sebesar 0.25 g yang diambil dari Peta Zonasi Gempa Indonesia (Kementrian PU, 2010) dengan probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun. Hasil penskalaan ini digunakan dalam perhitungan.

Profil lapisan tanah menjadi input data pada NERA, yaitu dengan memasukan jenis tanah, ketebalan lapisan, *total unit weight*, dan *shear wave velocity* (kecepatan gelombang geser,  $v_s$ ). Dalam perhitungan ini, nilai  $v_s$  yang digunakan korelasi nilai SPT dititik Malangan dan Sorosutan .

#### **5.2.4.1 Analisis *Spectral Matching* untuk wilayah Kota Yogyakarta**

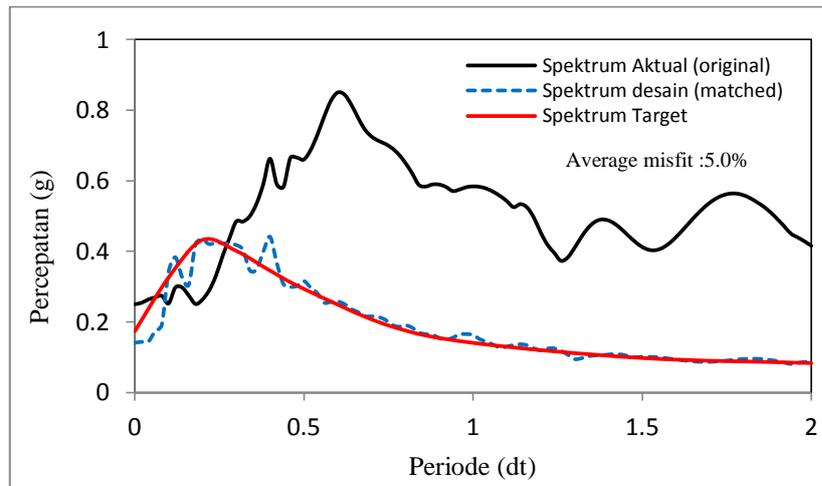
Untuk pengolahan dengan software NERA dibutuhkan data *time history* percepatan. Karena data percepatan gempa Yogyakarta 2006 tidak ada maka digunakan *time history* percepatan desain. *Time history* desain diasumsikan sama seperti gempa Yogyakarta 2006. Untuk mendapatkan data *time history* percepatan tersebut harus melalui tahap *spectral matching*. *Spectral matching* ini menghasikan spektra desain. Spektra desain hasil *spectral matching* ini merupakan spektra yang diasumsikan sama dengan spektra gempa Yogyakarta 2006. Spektra ini diperoleh dengan cara mencocokkan spektra gempa aktual

dengan spektra gempa target. Spektra aktual yang digunakan dalam penelitian ini spektra dari gempa El Centro, Kobe 1995 dan Parkfield. Spektra gempa target Gambar.5.24 diperoleh dengan menggunakan persamaan atenuasi Boore et.al seperti tersebut pada persamaan 3.14. Atenuasi ini merupakan atenuasi yang dirumuskan untuk gempa-gempa *shallow crustal* (terjadi di darat) salah satu contohnya gempa Yogyakarta 2006. Selanjutnya untuk mendapatkan spektra desain maka spektra aktual di *matching* dengan spektra target yang dilakukan dengan bantuan *software* SeismoMatch, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 5.25.

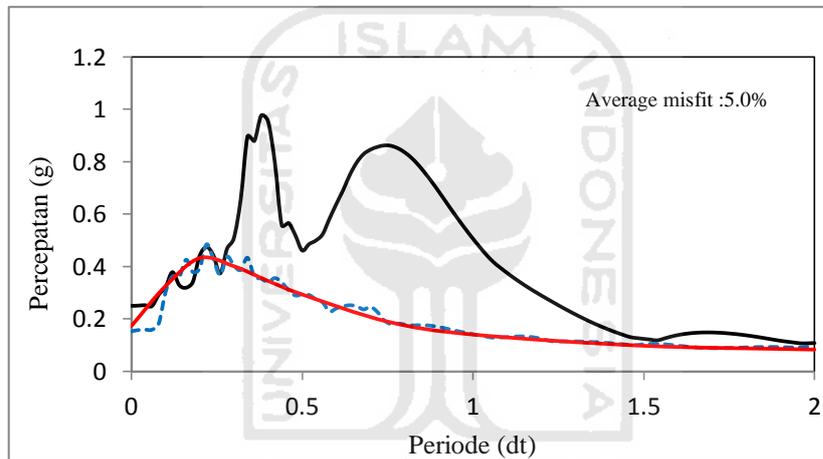


Gambar 5.24 Spektrum Target

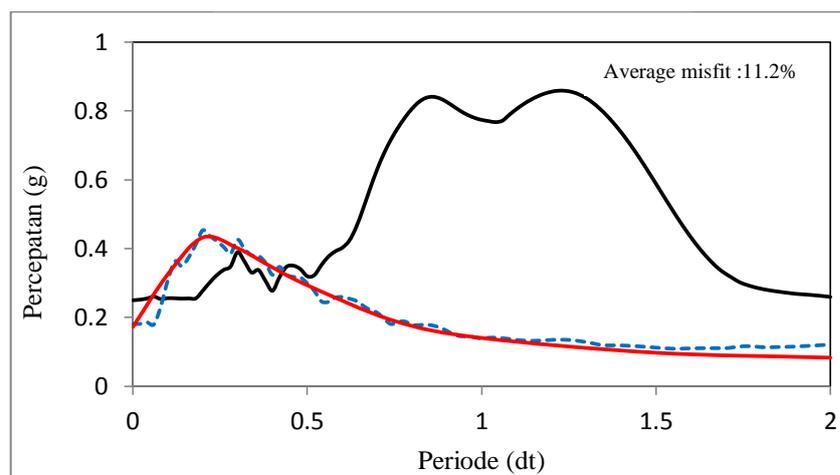
Setelah diperoleh spektra desain maka spektra ini di transformasi fourier menjadi *time history* percepatan yang hasilnya ditunjukkan pada Gambar 5.25. *Time history* inilah yang digunakan sebagai input program NERA untuk menghitung percepatan gerakan tanah maksimum dan regangan geser maksimum per lapisan tanah.



a. El centro

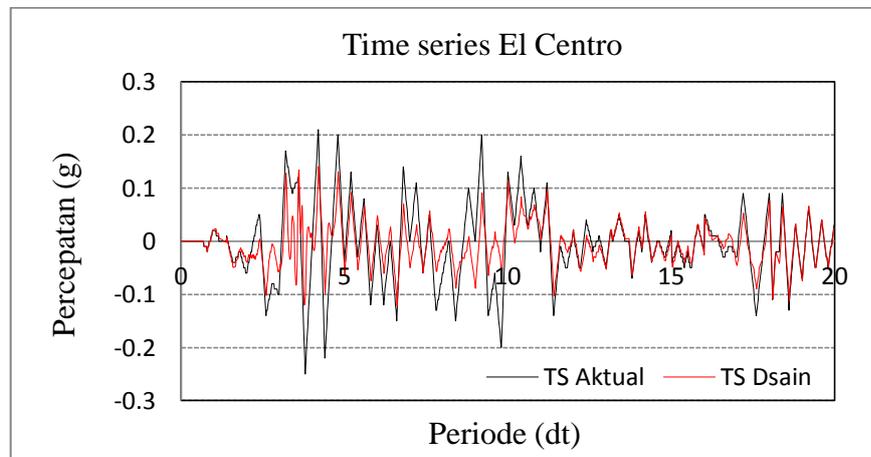


b. Kobe 1995

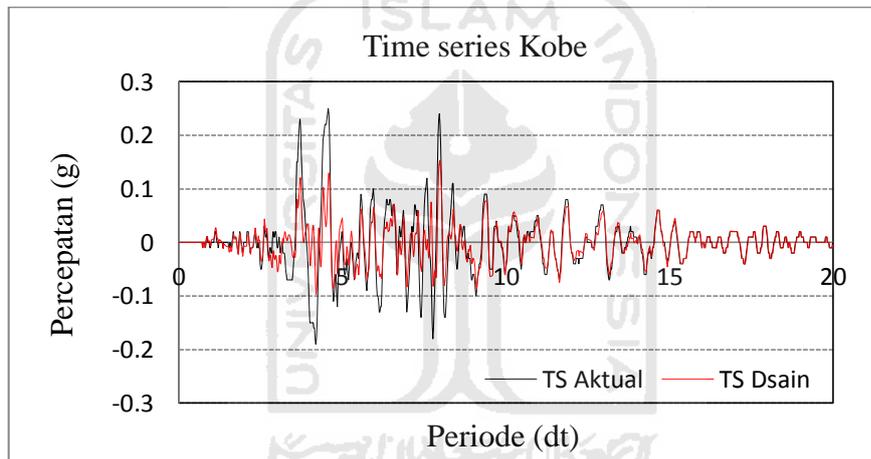


c. Parkfield

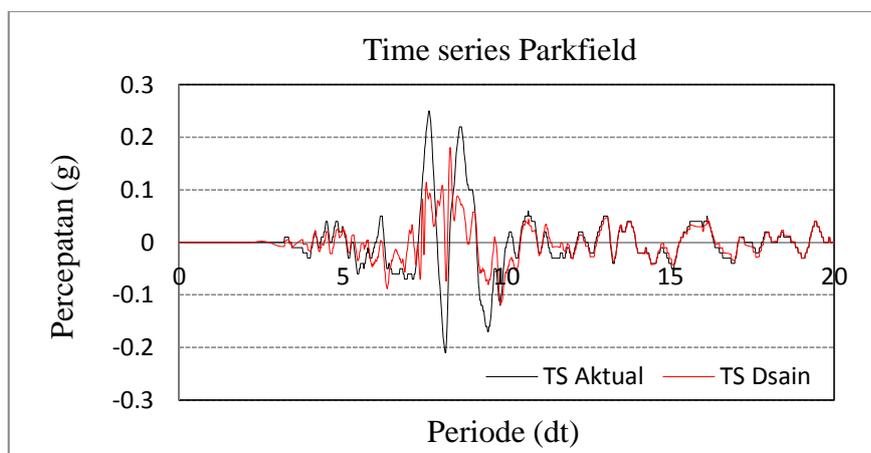
Gambar 5.25. Respon spektra aktual, desain dan target dari tiga gempa



a. El Centro



b. Kobe 1995



c. Parkfield

Gambar 5.26 Time history desain tiga gempa

### 5.2.5 PGA Perlapisan

Perhitungan PGA dengan metode ini memperhitungkan karakter kondisi litologi tiap–tiap lapisan tanah. Pada perhitungan ini data litologi didapat dari data bor dari dinas PU-PESDM DIY.

Input data untuk *soil profile* pada titik uji Malangan ditunjukkan pada tabel 5.4. Sedangkan input data untuk soil profil pada titik uji Sorosutan tabel 5.5. Hasil perhitungan PGA pada kedua titik uji ini dengan menggunakan tiga *ground motion* ditunjukkan dalam tabel 5.6. Sedangkan profil PGA tiap lapisan ditunjukkan Gambar 5.27 untuk titik Malangan dan Gambar 5.28 untuk titik Sorosutan.

Perbandingan *time series* percepatan di permukaan dan di *baserock* ditunjukkan oleh Gambar 5.29 untuk Malangan dan Gambar 5.30 untuk titik Sorosutan.

Tabel 5.4. Input soil profil titik uji Malangan

| Layer Number | Soil Material Type | Thickness of layer (m) | Total unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Shear wave velocity (m/sec) |
|--------------|--------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| 1            | Sand               | 1                      | 16                                     | 113.64                      |
| 2            | Lempung            | 1                      | 16                                     | 192.31                      |
| 3            | Sand               | 1.5                    | 17                                     | 262.06                      |
| 4            | Lempung            | 0.7                    | 16                                     | 275.89                      |
| 5            | Sand               | 0.8                    | 16                                     | 257.58                      |
| 6            | Sand               | 1                      | 17                                     | 248.23                      |
| 7            | Sand               | 3.4                    | 16                                     | 240.32                      |
| 8            | Lempung            | 1.2                    | 16                                     | 261.28                      |
| 9            | Sand               | 1.4                    | 17                                     | 278.13                      |
| 10           | Sand               | 3                      | 17                                     | 281.79                      |
| 11           | Sand               | 2.8                    | 16                                     | 257.35                      |
| 12           | Sand               | 2.2                    | 16                                     | 272.94                      |
| 13           | Sand               | 2                      | 17                                     | 270.6                       |
| 14           | Sand               | 1.6                    | 17                                     | 278.13                      |
| 15           | Sand               | 1.4                    | 17                                     | 284.81                      |
| 16           | Sand               | 1.5                    | 17                                     | 287.7                       |
| 17           | Sand               | 1.8                    | 17                                     | 284.81                      |
| 18           | Sand               | 1.2                    | 17                                     | 302.25                      |
| 19           | Sand               | 2.5                    | 17                                     | 341.03                      |

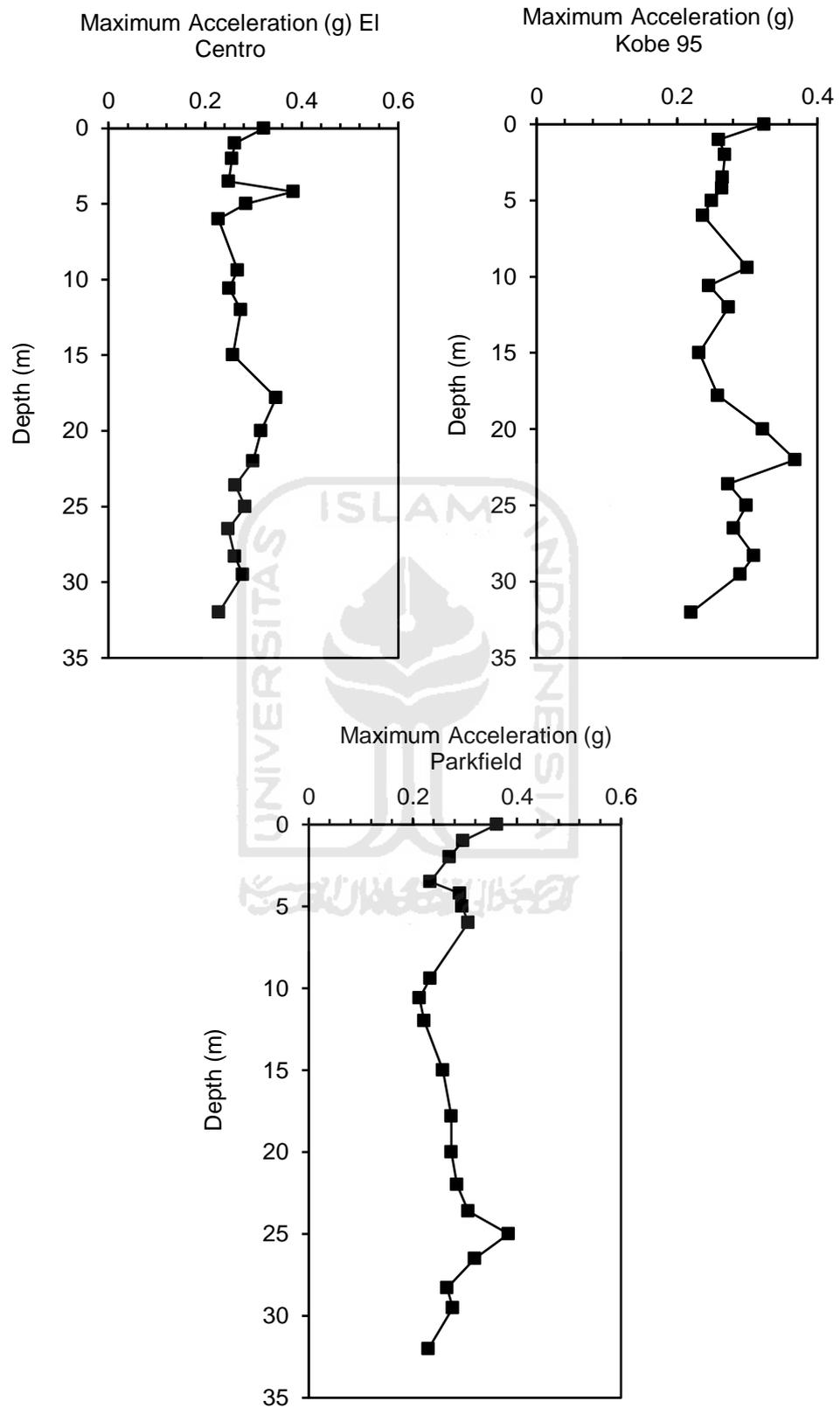
Tabel 5.5. Input soil profil titik uji Sorosutan

| Layer Number | Soil Material Type | Thickness of layer (m) | Total unit weight (kN/m <sup>3</sup> ) | Shear wave velocity (m/sec) |
|--------------|--------------------|------------------------|--|-----------------------------|
| 1            | Sand               | 1                      | 16                                     | 235.88                      |
| 2            | Sand               | 3.5                    | 16                                     | 235.88                      |
| 3            | Sand               | 1.5                    | 16                                     | 248.23                      |
| 4            | Sand               | 2.3                    | 17                                     | 255.77                      |
| 5            | Sand               | 1.7                    | 17                                     | 255.77                      |
| 6            | Sand               | 4                      | 17                                     | 255.77                      |
| 7            | Sand               | 0.9                    | 17                                     | 269.54                      |
| 8            | Sand               | 1.3                    | 17                                     | 266.24                      |
| 9            | Sand               | 2.8                    | 17                                     | 262.85                      |
| 10           | Sand               | 2                      | 17                                     | 255.77                      |
| 11           | Sand               | 1.5                    | 17                                     | 290.49                      |
| 12           | Sand               | 1.5                    | 17                                     | 281.93                      |
| 13           | Sand               | 2                      | 17                                     | 281.93                      |
| 14           | Sand               | 1                      | 17                                     | 303.65                      |
| 15           | Sand               | 0.7                    | 17                                     | 308.58                      |
| 16           | Sand               | 1                      | 17                                     | 320.21                      |
| 17           | Lempung            | 1.5                    | 17                                     | 281.93                      |

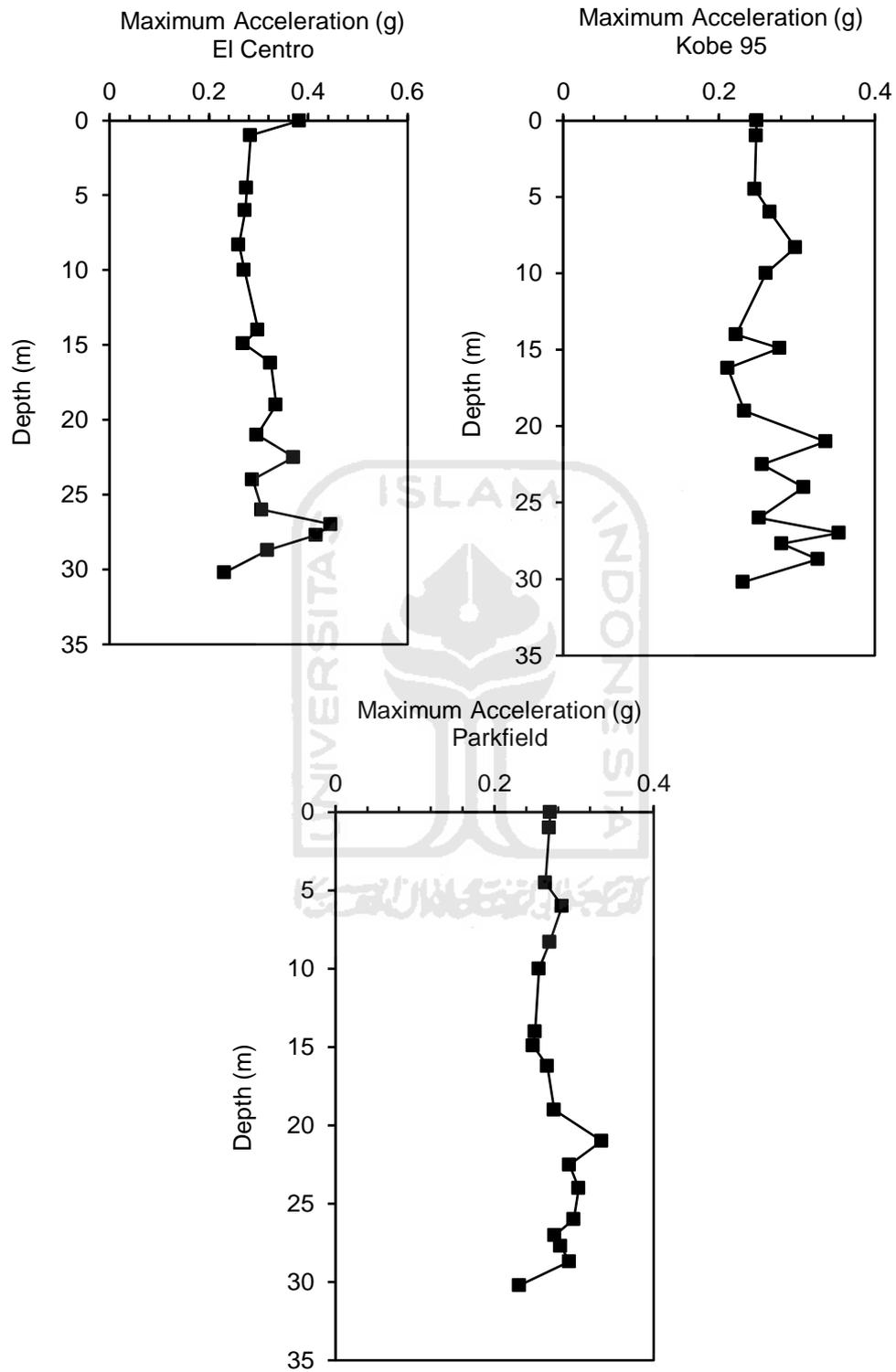
Tabel 5.6 Hasil perhitungan *Peak Ground Acceleration* (PGA) dalam g pada permukaan tanah dari masing-masing titik uji dari masing-masing *input motion*.

| Titik Uji | El Centro | Kobe   | Parkfiled | Kanai | USGS  |
|-----------|-----------|--------|-----------|-------|-------|
| Malangan  | 0.3214    | 0.3244 | 0.3612    | 0.716 | 0.340 |
| Sorosutan | 0.3834    | 0.2488 | 0.2702    | 0.671 | 0.360 |

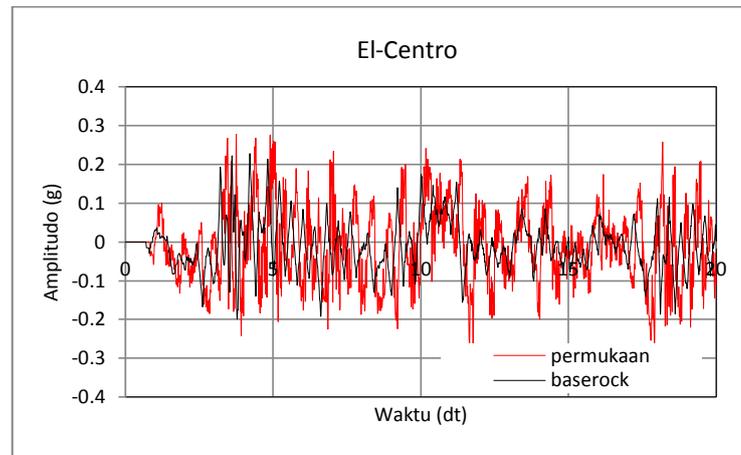
Hasil perhitungan menunjukkan nilai rata-rata PGA dititik Malangan adalah 0.335 dengan tertinggi sebesar 0.361 g dengan sumber gempa Parkfiled. Dan titik uji Sorosutan menghasilkan nilai rata-rata 0.301 dengan PGA tertinggi sebesar 0.383 g dengan sumber gempa El Centro. Dua titik uji ini belum dapat mewakili kondisi kegempaan di Yogyakarta secara keseluruhan. Karena titik uji yang diambil sangat sedikit apabila dibandingkan dengan luasan wilayah yang ditinjau. Sehingga perlu ada penambahan titik uji sehingga dapat merepresentasikan wilayah penelitian.



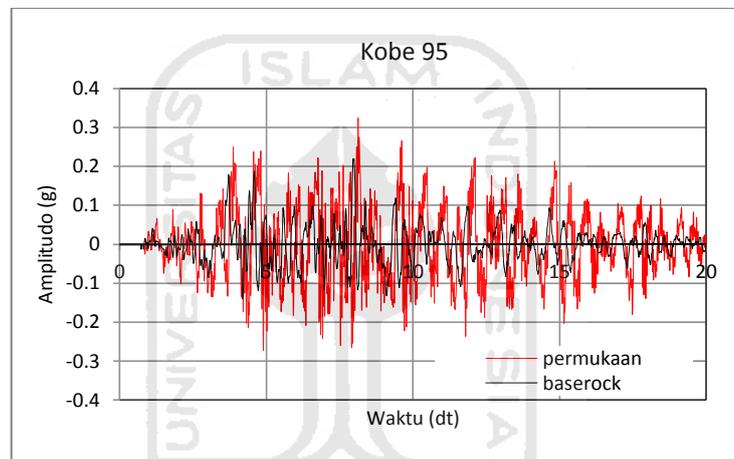
Gambar 5.27 Grafik profil PGA di titik tinjau Malangan



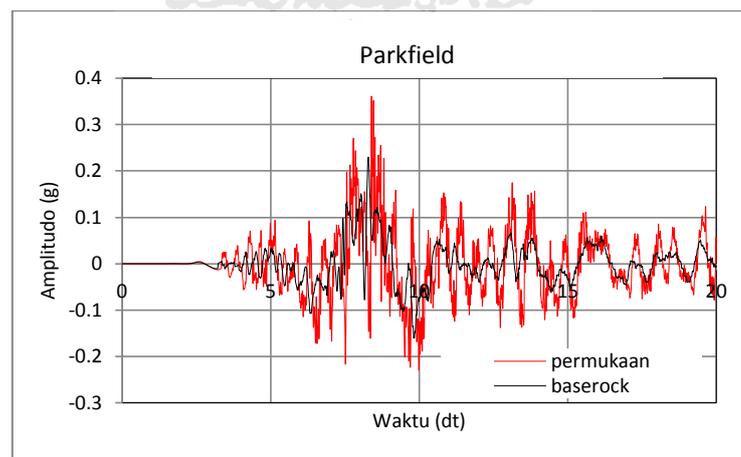
Gambar 5.28 Grafik profil PGA di titik tinjau Sorosutan



a. El Centro

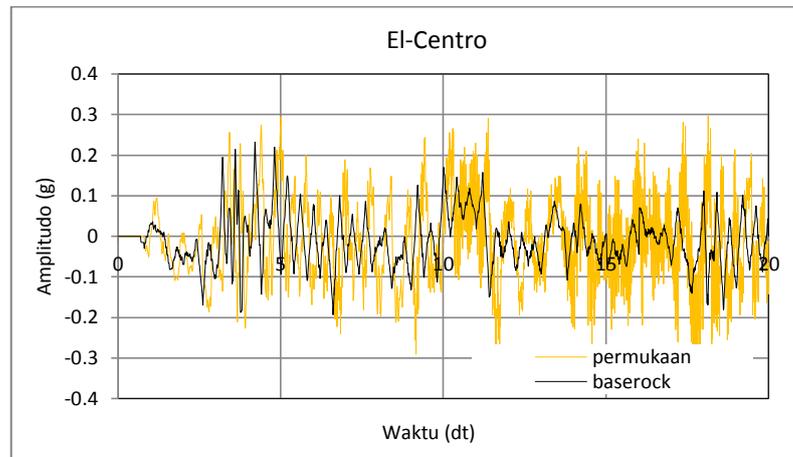


b. Kobe 95

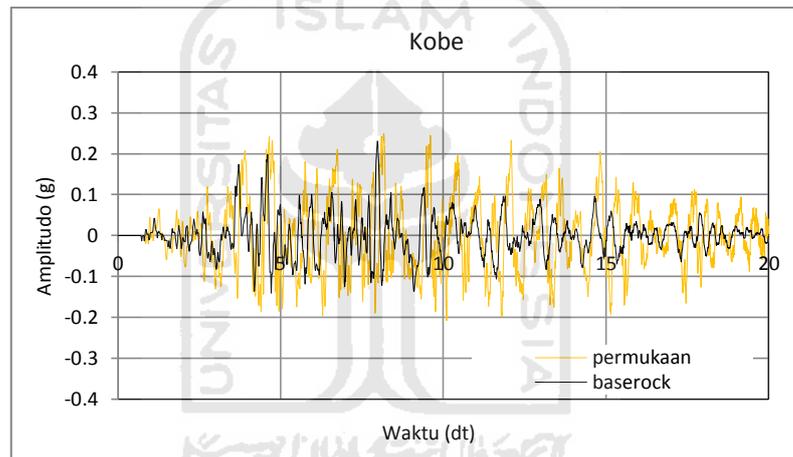


c. Parkfield

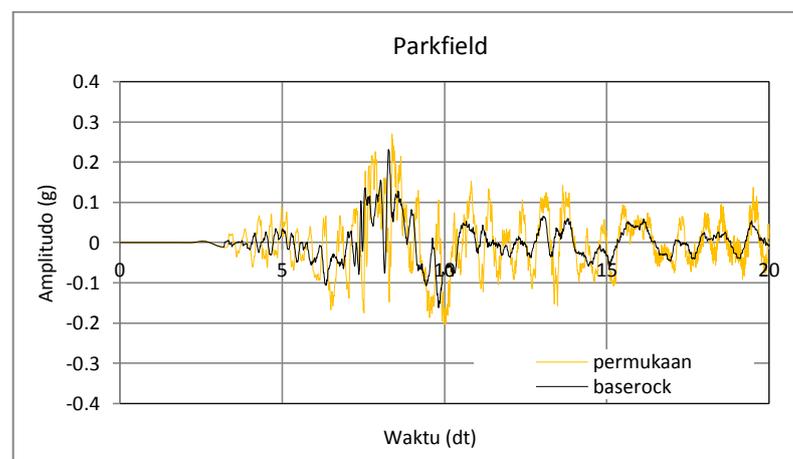
Gambar 5.29 Accelerogram amplifikasi di titik tinjau Malangan



a. El Centro



b. Kobe 95



c. Parkfield

Gambar 5.30 *Accelerogram* amplifikasi di titik tinjau Sorosutan

### 5.3 Penentuan Parameter Dinamik Tanah

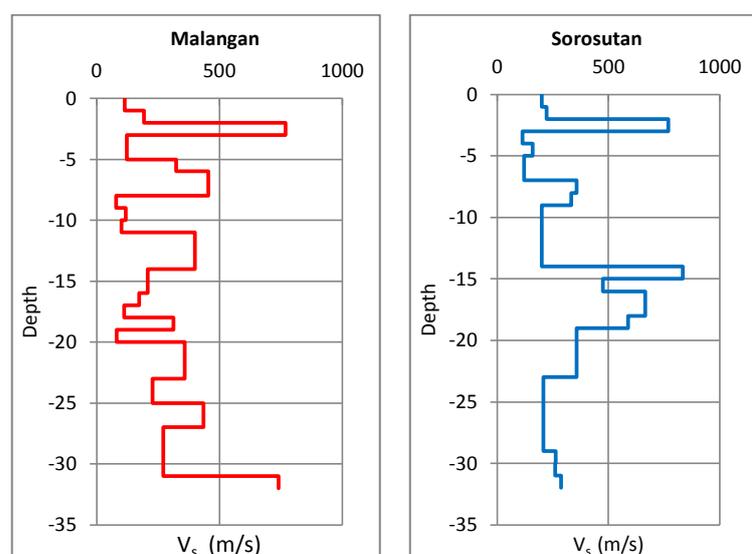
Selain parameter dinamik tanah tersebut di atas beberapa parameter dinamik tanah lainnya yang dilakukan penelitian di daerah Kota Yogyakarta. Parameter dinamik tanah yang dianalisis meliputi kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ), modulus geser tanah ( $G$ ), dan regangan geser tanah ( $\gamma$ ).

#### 5.3.1 Penentuan kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ )

Penentuan geombang geser di daerah penelitian seperti di lakukan dalam metodologi menggunakan beberapa metode, diantaranya metode *seismic down hole*, replikasi nilai  $v_s$  berdasar nilai N-SPT, korelasi nilai  $v_s$  dengan nilai N-SPT (Imai and Tonouchi 1982) dan inversi kurva HVSR.

##### 5.3.1.1 $v_s$ dari *seismic down hole*

Kecepatan gelombang geser didapatkan dari pengukuran dengan metode *seismic down hole*. Data hasil pengukuran ini menunjukkan kecepatan gelombang S pada setiap kedalaman diperlihatkan Gambar 5.31 dan Tabel 5.5 . Berdasarkan tabel nilai ini diketahui kecepatan rata-rata di daerah malangan bernilai 277.70 m/s sedangkan kecepatan rata-rata di daerah Sorosutan bernilai 316.3 m/s . Data ini merupakan data sekunder dimana pengukuran lapangan dilakukan oleh laboratorium Fisika Bumi ITB.



Gambar 5.31 Profil kecepatan gelombang sekunder a.Malangan, b. Sorosutan

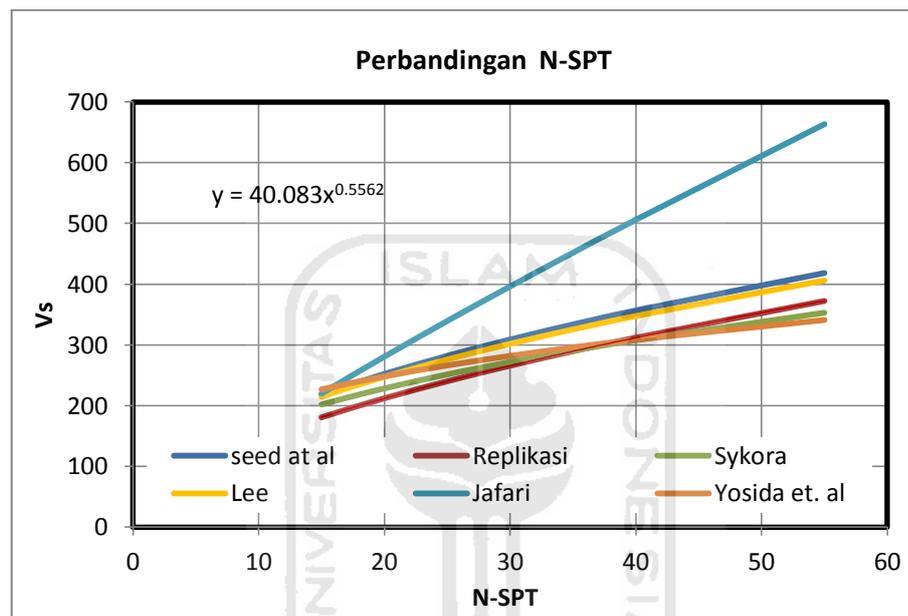
Tabel 5.7 Kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ ) *Seismic Downhole* di Malangan dan Sorosutan (PUP-ESDM DIY, 2010).

| Malangan |        |       |        | Sorosutan |       |       |       |
|----------|--------|-------|--------|-----------|-------|-------|-------|
| Depth    | Vs     | Depth | Vs     | Depth     | Vs    | Depth | Vs    |
| -1       | 113.64 | -17   | 172.41 | -1        | 200.0 | -17   | 666.7 |
| -2       | 192.31 | -18   | 112.36 | -2        | 222.2 | -18   | 666.7 |
| -3       | 769.23 | -19   | 312.5  | -3        | 769.2 | -19   | 588.2 |
| -4       | 121.95 | -20   | 80     | -4        | 114.9 | -20   | 357.2 |
| -5       | 121.95 | -21   | 357.14 | -5        | 158.7 | -21   | 357.1 |
| -6       | 322.58 | -22   | 357.14 | -6        | 122   | -22   | 357.1 |
| -7       | 454.55 | -23   | 357.14 | -7        | 122   | -23   | 357.1 |
| -8       | 454.55 | -24   | 227.27 | -8        | 357.1 | -24   | 208.3 |
| -9       | 78.13  | -25   | 227.27 | -9        | 333.3 | -25   | 208.3 |
| -10      | 117.65 | -26   | 434.78 | -10       | 200   | -26   | 208.3 |
| -11      | 100    | -27   | 434.78 | -11       | 200   | -27   | 208.3 |
| -12      | 400    | -28   | 270.27 | -12       | 200   | -28   | 208.3 |
| -13      | 400    | -29   | 270.27 | -13       | 200   | -29   | 208.3 |
| -14      | 400    | -30   | 270.27 | -14       | 200   | -30   | 263.2 |
| -15      | 208.33 | -31   | 270.27 | -15       | 833.3 | -31   | 261.8 |
| -16      | 208.33 | -32   | 270.27 | -16       | 476.2 | -32   | 286.5 |

### 5.3.1.2 $v_s$ replikasi

Proses replikasi dilakukan karena sebagian data yang di peroleh berkaitan dengan data bor di beberapa titik di daerah penelitian hanya didapatkan data N-SPT nya sehingga data kecepatannya belum bisa diketahui. Untuk mengetahui nilai kecepatan pada titik-titik tersebut kemudian dilakukan dengan melakukan replikasi, yaitu mendapatkan nilai gelombang geser ( $v_s$ ) di suatu titik yang diketahui nilai N-SPT nya menggunakan persamaan antara nilai  $v_s$  dengan N-SPT pada titik uji lain yang sudah diketahui nilai  $v_s$  dan N-SPT nya. Persamaan replikasi pada penelitian ini dibuat dengan persamaan garis yang didapat dari korelasi nilai  $v_s$  dari *seismic down hole* pada titik ukur *seismic down hole* Malangan adalah persamaan (3.16)

Perbandingan persamaan replikasi dengan beberapa persamaan empiris korelasi  $v_s$  dengan N-SPT yang lain, hasilnya di perlihatkan pada gambar 5.32. Berdasarkan perbandingan ini, metode replikasi dapat digunakan untuk perhitungan kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ ) dengan nilai N-SPT didaerah penelitian.

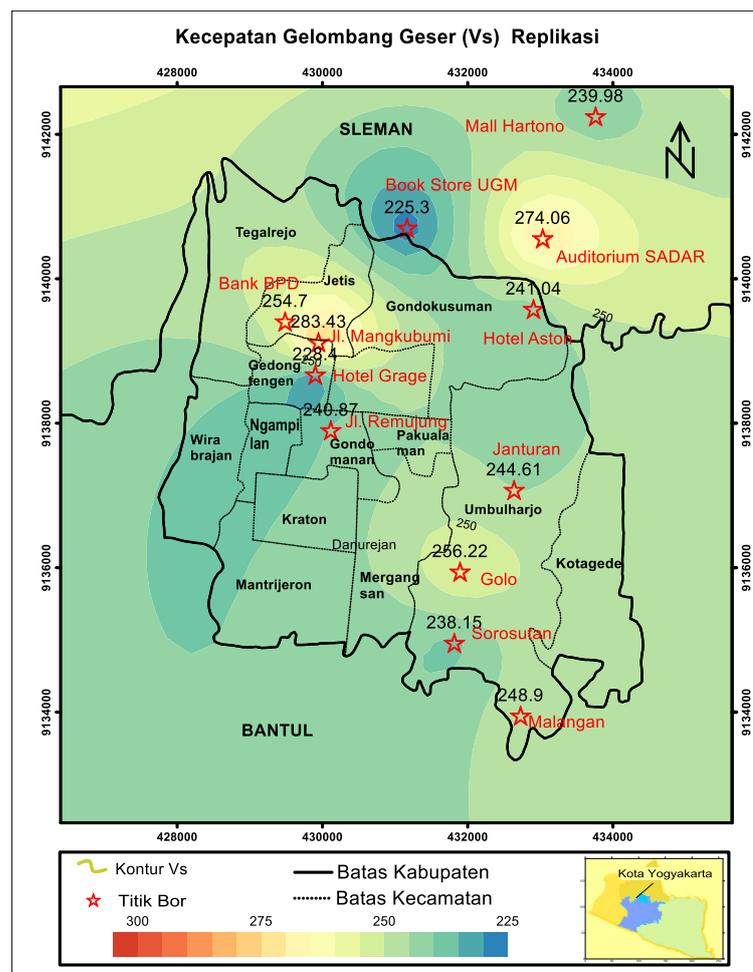


Gambar 5.32 Perbandingan korelasi  $V_s$  dengan N-SPT

Hasil replikasi menggunakan persamaan diatas terhadap nilai N-SPT di beberapa titik bor ditunjukan Tabel 5.8. Peta distribusinya di daerah penelitian setelah diinterpolasikan ditunjukkan oleh Gambar 5.33. Nilai rata-rata kecepatan gelombang geser sebesar 251.69 m/s, tertinggi di titik Palagan B1 dengan nilai 299.03 m/s, dan nilai terendah dititik Hotel Grade dengan nilai 228.40 m/s.

Tabel 5.8 Kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) replikasi

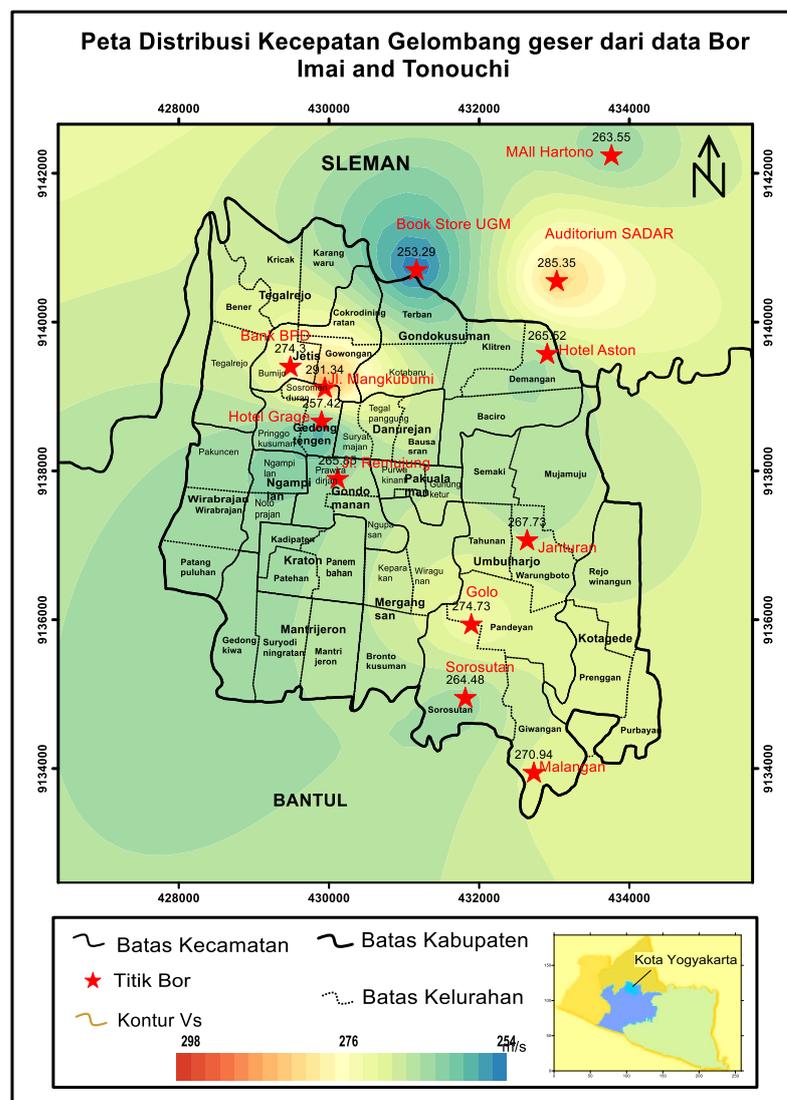
| No | Lintang (utm) | Bujur (utm) | $V_s$ (m/s) | Lokasi           |
|----|---------------|-------------|-------------|------------------|
| 1  | 432728        | 9133941     | 248.9       | Malangan         |
| 2  | 431816        | 9134948     | 238.15      | Sorosutan        |
| 3  | 432639        | 9137066     | 244.61      | Janturan         |
| 4  | 431895        | 9135935     | 256.22      | Golo             |
| 5  | 432248        | 9147401     | 299.03      | Palagan B1       |
| 6  | 429945        | 9139113     | 283.43      | Jl Mangkubumi    |
| 7  | 429901        | 9138662     | 228.4       | Hotel Grage      |
| 8  | 432906        | 9139571     | 241.04      | Hotel Aston      |
| 9  | 431165        | 9140697     | 225.3       | Book Store UGM   |
| 10 | 435764        | 9141779     | 249.02      | Kanwil Pajak     |
| 11 | 433762        | 9142239     | 239.98      | Mall Hartono     |
| 12 | 433033        | 9140550     | 274.06      | Auditorium Sadar |
| 13 | 429486        | 9139399     | 254.7       | Bank BPD DIY     |
| 14 | 430115        | 9137893     | 240.87      | Jl Remujung      |



Gambar 5.33 Distribusi kecepatan gelombang sekunder Replikasi

### 5.3.1.3 $v_s$ dari persamaan korelasi N-SPT (Imai and Tonouchi 1982)

Penentuan kecepatan gelombang geser  $v_s$  menggunakan korelasi nilai N-SPT telah dilakukan beberapa peneliti, salah satunya Imai dan Tonouchi (1982). Penelitian ini menggunakan korelasi Imai and Tonouchi 1982, persamaan ini berlaku untuk semua tipe tanah tidak mempertimbangkan jenis tanahnya. Persamaan tersebut seperti ditunjukkan dalam persamaan 3.14. Hasil perhitungan dengan persamaan ini diperoleh nilai kecepatan di beberapa titik ukur yang berada di wilayah penelitian, seperti ditunjukkan Tabel 5.9. Peta distribusi kecepatan gelombang sekunder ( $v_s$ ) dari korelasi N-SPT di tunjukkan oleh Gambar 5.34.



Gambar 5.34 Distribusi kecepatan gelombang geser Imai and Tonouchi 1982

Nilai rata-rata kecepatan gelombang geser sebesar 264.48 m/s, kecepatan tertinggi di titik Palagan B1 dengan nilai 297.38 m/s, dan kecepatan terendah dititik Hotel Grade dengan nilai 257.42 m/s.

Tabel 5.9 Kecepatan gelombang geser rumusan Imai and Tonouchi 1982

| No | Lintang (UTM) | Bujur (UTM) | $V_s$ ( m/s) | Lokasi           |
|----|---------------|-------------|--------------|------------------|
| 1  | 432728        | 9133941     | 270.94       | Malangan         |
| 2  | 431816        | 9134948     | 264.48       | Sorosutan        |
| 3  | 432639        | 9137066     | 267.73       | Janturan         |
| 4  | 431895        | 9135935     | 274.73       | Golo             |
| 5  | 432248        | 9147401     | 297.38       | Palagan B1       |
| 6  | 429945        | 9139113     | 291.34       | Jl Mangkubumi    |
| 7  | 429901        | 9138662     | 257.42       | Hotel Grage      |
| 8  | 432906        | 9139571     | 265.52       | Hotel Aston      |
| 9  | 431165        | 9140697     | 253.29       | Book store       |
| 10 | 435764        | 9141779     | 270.35       | Kanwil Pajak     |
| 11 | 433762        | 9142239     | 263.55       | Mall Hartono     |
| 12 | 433033        | 9140550     | 285.35       | Auditorium Sadar |
| 13 | 429486        | 9139399     | 274.3        | Bank BPD         |
| 14 | 430115        | 9137893     | 265.85       | Jl Remujung      |

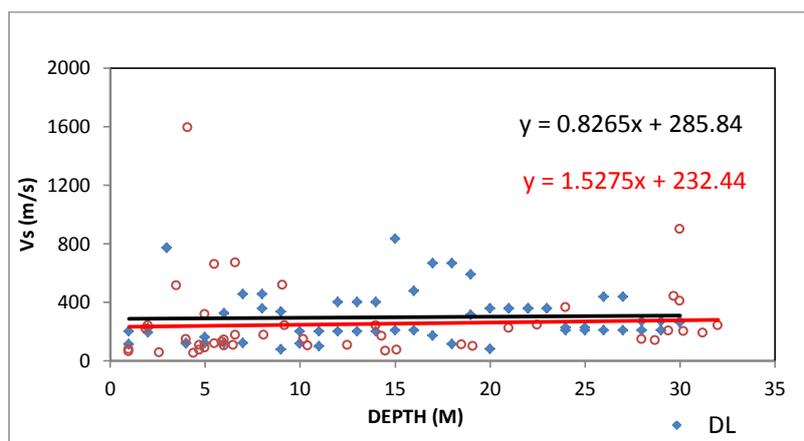
#### 5.3.1.4 $v_s$ dari Inversi Kurva HVSr Mikrotremor

Kecepatan gelombang geser pada umumnya ditentukan dengan melakukan survei lapangan. Beberapa teknik yang digunakan antara lain dengan teknik *borehole*, semisal *crosshole*, *downhole*, dan *suspension logger survey*. Metode-metode tersebut bersifat aktif *invasif* dan biaya mahal. Kemudian berkembang metode estimasi  $v_s$  menggunakan mikrotremor. Metode ini relatif murah dan bersifat pasif dan *uninvasif*.

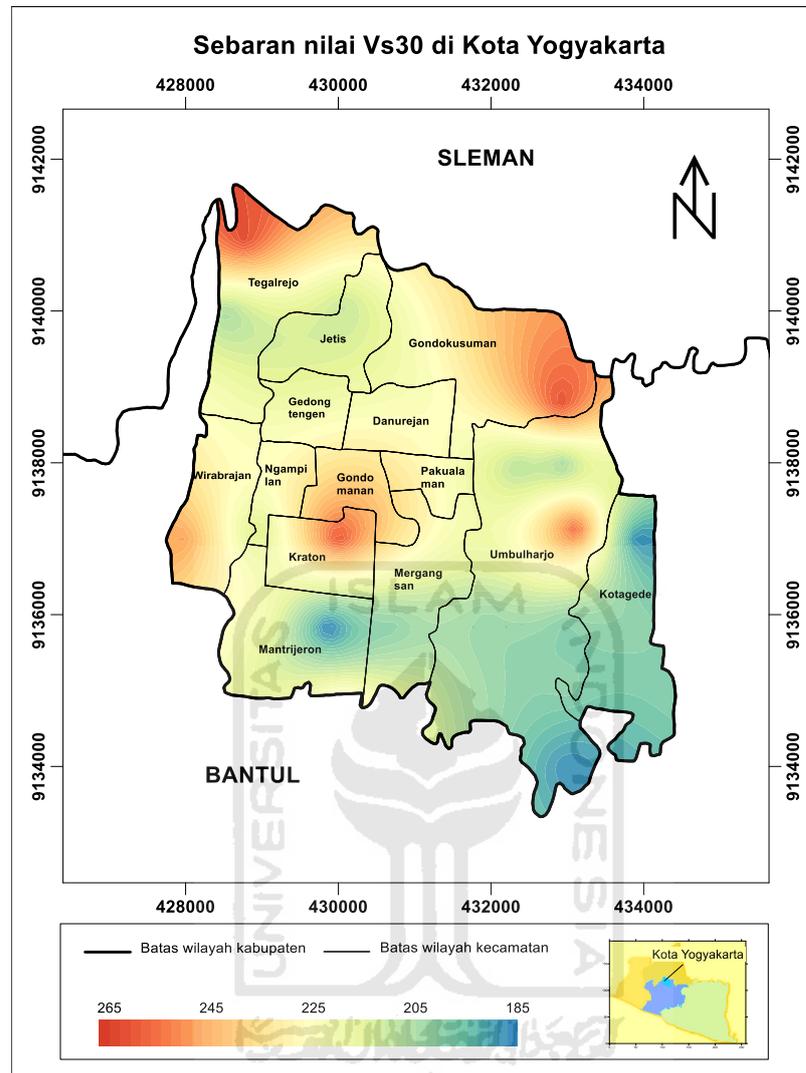
Metode estimasi  $v_s$  menggunakan mikrotremor dilakukan dengan melakukan inversi terhadap kurva HVSr. Salah satu proses inversi dilakukan dengan menggunakan *software ModelHVSr* dari Herak (2001), dari inversi diperoleh  $v_s$  di setiap perlapisan di daerah penelitian. Pada penelitian ini diperoleh 27 titik ukur inversi yang memberikan hasil cukup baik dengan tingkat

ketidaktepatan (*misfit function*) kurva rendah. Untuk memvalidasi reliabilitas hasil inversi dibuat rasio antara kecepatan gelombang geser hasil *seismic down hole* dengan hasil inversi kurva HVSR mikrotremor. Rasio  $v_s$  ini di tunjukkan Gambar 5.35,  $v_s$  hasil inversi kurva HVSR mikrotremor mempunyai perbedaan sekitar 18% terhadap  $v_s$  hasil *seismic down hole*. Perubahan  $v_s$  terhadap kedalaman cukup rendah, ditunjukkan dengan garis *trendline* yang landai.

Variasi kecepatan gelombang geser utamanya tergantung dari keras lunaknya lapisan tanah. Sebaran nilai kecepatan gelombang geser sampai pada kedalaman 30 meter ( $V_{s30}$ ) rata-rata hasil inversi kurva HVSR ditunjukkan pada Gambar 5.36. Nilai  $V_{s30}$  berkisar antara 185 m/s sampai dengan 265 m/s. Daerah dengan kecepatan relatif tinggi berada di bagian utara Kecamatan Tegalrejo, bagian timur Kecamatan Gondomanan dan bagian utara Kecamatan Kraton. Wilayah dengan  $V_{s30}$  bernilai relatif rendah berada di wilayah Kecamatan Kotagede, bagian selatan Kecamatan Mergangsan, bagian timur Kecamatan Mantriweron dan bagian selatan Kecamatan Umbulharjo. Nilai  $V_{s30}$  di Kota Yogyakarta menunjukkan bahwa tanah di Yogyakarta merupakan jenis tanah Sedang. Menurut klasifikasi berdasar *Eurocode* termasuk ke dalam tipe tanah C berupa endapan pasir padat atau setengah padat yang tebal, *Gravel* atau *Clay* padat dengan ketebalan beberapa puluhan meter.



Gambar 5.35 Grafik rasio  $v_s$  *downhole* dan inversi kurva HVSR



Gambar 5.36 Peta distribusi Vs30 dari inveri kurva HVSR

### 5.3.2 Nilai modulus geser ( $G$ )

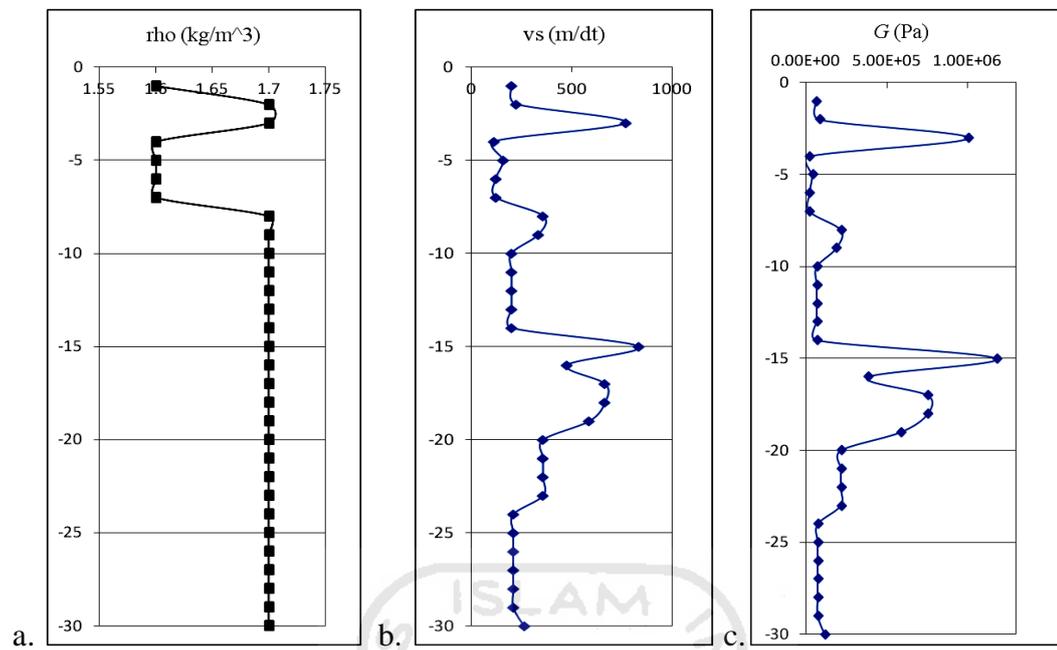
Modulus geser merupakan parameter yang penting dan digunakan dalam analisis respon dinamik tanah. Salah satu contoh aplikasi modulus geser adalah dalam bidang geoteknik adalah dalam perencanaan pondasi dinamik, interaksi antara tanah dan pondasi saat gempa. Parameter ini terutama diperlukan dalam perhitungan frekuensi resonansi dan amplitudo getaran pada pondasi, interaksi tanah-struktur akibat beban dinamik, menentukan kekakuan tanah dibawah pondasi dan analisis perambatan gelombang.

Sperti disebut di atas modulus geser maksimum merupakan parameter dinamik yang penting dalam berbagai masalah dinamik tanah.. Modulus geser tanah dapat dicari dengan tiga metode yaitu : Uji lapangan, Uji laboratorium dan Korelasi empirik. Dalam penelitian ini nilai modulus diperoleh dari Uji lapangan.

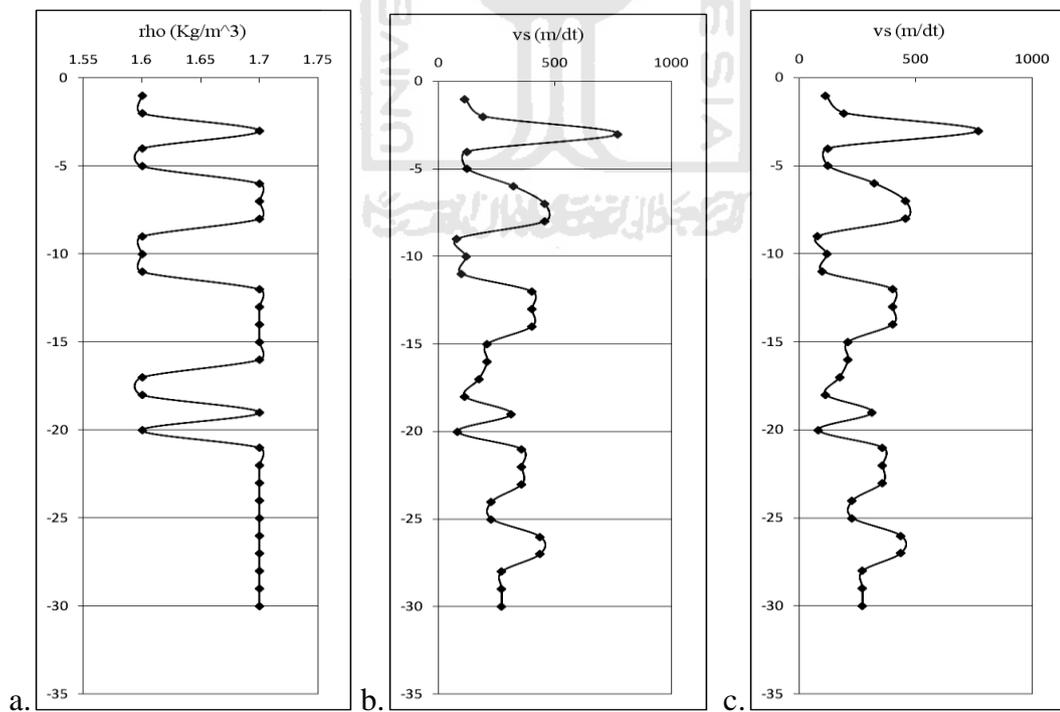
### 5.3.2.1 Nilai Modulus geser $G$ dari Kecepatan Gelombang Geser ( $v_s$ )

Nilai modulus geser ( $G_{maks}$ ) di peroleh dari perhitungan data propertis densitas tanah dan kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) menggunakan persamaan 3.18. Pada penelitian ini data propertis tanah diperoleh dari data bor di titik Malangan dan Sorosutan. Kecepatan gelombang geser yang digunakan untuk menentukan nilai  $G_{maks}$  adalah dari hasil *seismic down hole*. Tabel 5.10 dan 5.11 menunjukkan nilai  $G_{maks}$  pada tiap kedalaman dititik ukur Sorosutan dan Malangan. Profil densitas, profil kecepatan gelombang geser dan profil Modulus geser di titik Sorosutan ditunjukkan Gambar 5.37, di titik Malangan ditunjukkan Gambar 5.38.

Pada titik uji Sorosutan malangan nilai modulus geser sampai kedalaman 32 meter dengan kisaran nilai antara nilai maksimum 1.18 MPa sedangkan nilai minimum 0.021 Mpa, nilai rata-rata 0.23 Mpa. Densitas material tanah pada titik ini rata-rata  $1.7 \text{ kg/cm}^3$  Sedangkan pada titik uji malangan nilai modulus geser sampai kedalaman 32 meter dengan kisaran nilai antara 1.006 M.Pa sampai dengan 0.0098 M.Pa, nilai rata-rata 0.167 M.Pa. Densitas material tanah pada titik ini rata-rata  $1.7 \text{ kg/cm}^3$ .



Gambar 5.37 Parameter penentuan Modulus Geser titik Sorosutan, a. densitas, b. Kecepatan gelombang geser, c. Modulus geser



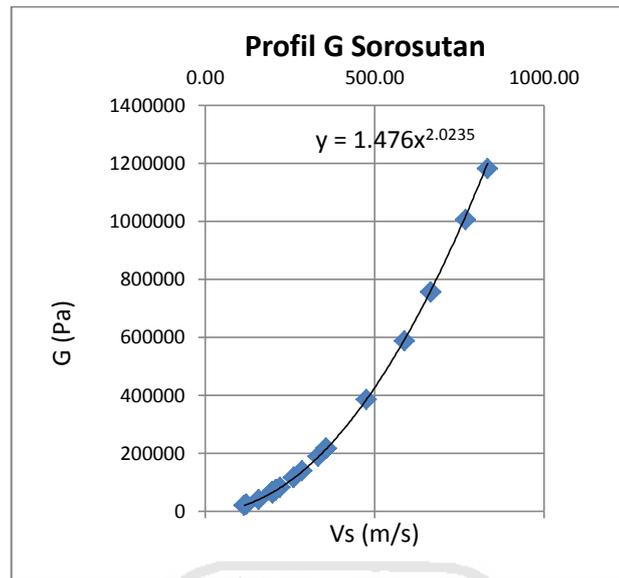
Gambar 5.38 Parameter penentuan Modulus Geser titik Malang, a. densitas, b. Kecepatan gelombang geser, c. Modulus geser

Tabel 5.10 *Gmax* pada tiap kedalaman di Sorosutan dari Vs *downhole logging*

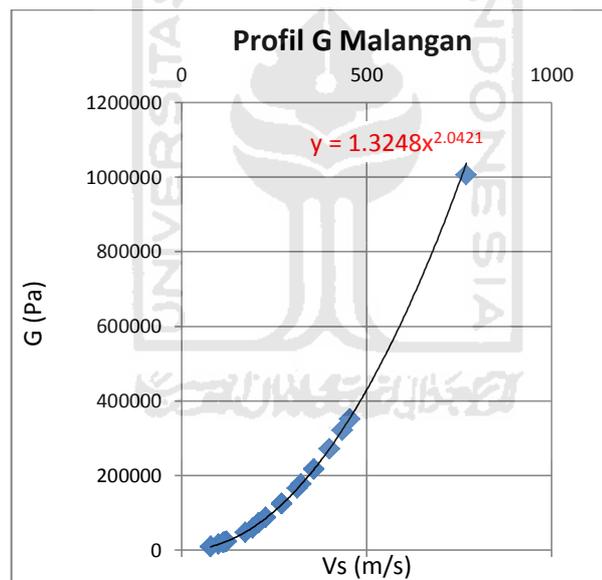
| Depth (m) | $v_s$ (m/s) | Rho ( $\text{kg/m}^3$ ) | G (Pa)  | Depth | $v_s$ (m/s) | Rho ( $\text{kg/m}^3$ ) | G (Pa)  |
|-----------|-------------|-------------------------|---------|-------|-------------|-------------------------|---------|
| -1        | 200         | 1.6                     | 64000   | -17   | 666.67      | 1.7                     | 755563  |
| -2        | 222.22      | 1.7                     | 83948.9 | -18   | 666.67      | 1.7                     | 755563  |
| -3        | 769.23      | 1.7                     | 1005915 | -19   | 588.24      | 1.7                     | 588245  |
| -4        | 114.94      | 1.6                     | 21137.9 | -20   | 357.17      | 1.7                     | 216870  |
| -5        | 158.73      | 1.6                     | 40312.3 | -21   | 357.14      | 1.7                     | 216833  |
| -6        | 121.95      | 1.6                     | 23794.9 | -22   | 357.14      | 1.7                     | 216833  |
| -7        | 121.95      | 1.6                     | 23794.9 | -23   | 357.14      | 1.7                     | 216833  |
| -8        | 357.14      | 1.7                     | 216833  | -24   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -9        | 333.33      | 1.7                     | 188885  | -25   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -10       | 200         | 1.7                     | 68000   | -26   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -11       | 200         | 1.7                     | 68000   | -27   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -12       | 200         | 1.7                     | 68000   | -28   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -13       | 200         | 1.7                     | 68000   | -29   | 208.33      | 1.7                     | 73782.4 |
| -14       | 200         | 1.7                     | 68000   | -30   | 263.16      | 1.7                     | 117730  |
| -15       | 833.33      | 1.7                     | 1180546 | -31   | 261.78      | 1.7                     | 116499  |
| -16       | 476.19      | 1.7                     | 385487  | -32   | 286.53      | 1.7                     | 139569  |

Tabel 5.11 *Gmax* pada tiap kedalaman di Malangan dari Vs *Downhole logging*

| Depth | Vs (m/s) | Rho ( $\text{kg/m}^3$ ) | G (Pa)  | Depth | Vs (m/s) | Rho ( $\text{kg/m}^3$ ) | G (Pa)  |
|-------|----------|-------------------------|---------|-------|----------|-------------------------|---------|
| -1    | 113.64   | 1.6                     | 20662.5 | -17   | 172.41   | 1.6                     | 47560.3 |
| -2    | 192.31   | 1.6                     | 59173   | -18   | 112.36   | 1.6                     | 20199.6 |
| -3    | 769.23   | 1.7                     | 1005915 | -19   | 312.5    | 1.7                     | 166016  |
| -4    | 121.95   | 1.6                     | 23794.9 | -20   | 80       | 1.6                     | 10240   |
| -5    | 121.95   | 1.6                     | 23794.9 | -21   | 357.14   | 1.7                     | 216833  |
| -6    | 322.58   | 1.7                     | 176898  | -22   | 357.14   | 1.7                     | 216833  |
| -7    | 454.55   | 1.7                     | 351247  | -23   | 357.14   | 1.7                     | 216833  |
| -8    | 454.55   | 1.7                     | 351247  | -24   | 227.27   | 1.7                     | 87807.8 |
| -9    | 78.13    | 1.6                     | 9766.9  | -25   | 227.27   | 1.7                     | 87807.8 |
| -10   | 117.65   | 1.6                     | 22146.4 | -26   | 434.78   | 1.7                     | 321357  |
| -11   | 100      | 1.6                     | 16000   | -27   | 434.78   | 1.7                     | 321357  |
| -12   | 400      | 1.7                     | 272000  | -28   | 270.27   | 1.7                     | 124178  |
| -13   | 400      | 1.7                     | 272000  | -29   | 270.27   | 1.7                     | 124178  |
| -14   | 400      | 1.7                     | 272000  | -30   | 270.27   | 1.7                     | 124178  |
| -15   | 208.33   | 1.7                     | 73782.4 | -31   | 270.27   | 1.7                     | 124178  |
| -16   | 208.33   | 1.7                     | 73782.4 | -32   | 740.70   | 1.7                     | 124178  |



a. Titik Sorosutan



b. Titik Malangan

Gambar 5.39 Grafik  $G_{max}$  dari *downhole logging* pada tiap kedalaman

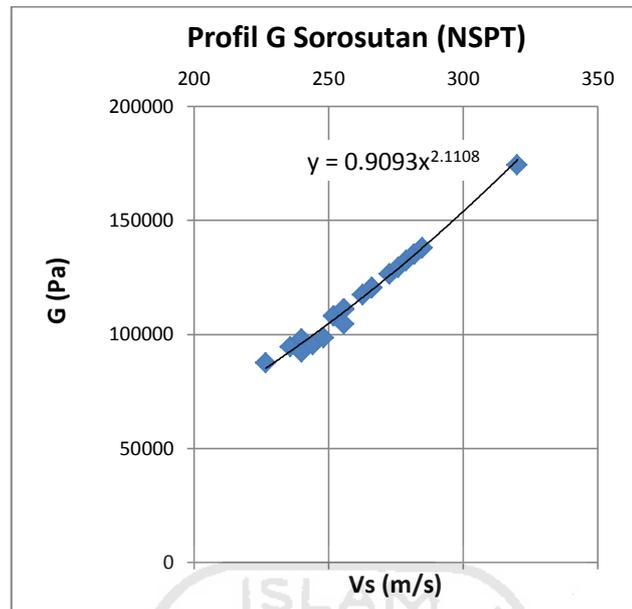
Nilai modulus geser dengan menggunakan kecepatan gelombang sekunder yang diperoleh dari rumusan N-SPT menggunakan hubungan korelasi yang disampaikan Imai and Tonouchi 1982 ditunjukkan oleh Tabel 5.12.

Tabel 5.12  $G_{max}$  pada tiap kedalaman di Sorosutan dengan Vs dari NSPT

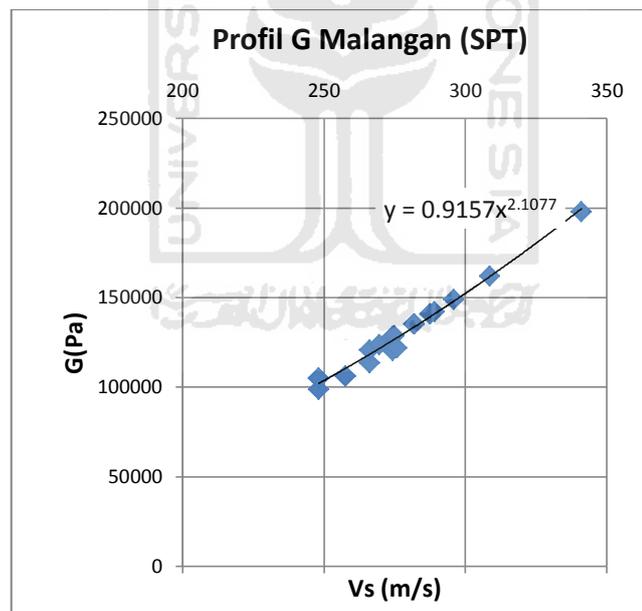
| Depth (m) | Vs (m/s) | Rho (kg/m <sup>3</sup> ) | G (Pa)    | Depth (m) | Vs (m/s) | Rho (kg/m <sup>3</sup> ) | G (Pa)    |
|-----------|----------|--------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|-----------|
| -1        | 0.00     | 1.60                     | 0         | -17       | 266.24   | 1.70                     | 120504.37 |
| -2        | 0.00     | 1.70                     | 0         | -18       | 266.24   | 1.70                     | 120504.37 |
| -3        | 235.88   | 1.70                     | 94584.157 | -19       | 262.85   | 1.70                     | 117454.36 |
| -4        | 240.15   | 1.60                     | 92273.856 | -20       | 255.77   | 1.70                     | 111208.48 |
| -5        | 244.26   | 1.60                     | 95460.74  | -21       | 272.75   | 1.70                     | 126471.57 |
| -6        | 248.23   | 1.60                     | 98585.802 | -22       | 284.85   | 1.70                     | 137934.09 |
| -7        | 255.77   | 1.60                     | 104666.81 | -23       | 284.85   | 1.70                     | 137934.09 |
| -8        | 262.85   | 1.70                     | 117454.36 | -24       | 281.93   | 1.70                     | 135122.8  |
| -9        | 255.77   | 1.70                     | 111208.48 | -25       | 281.93   | 1.70                     | 135122.8  |
| -10       | 252.06   | 1.70                     | 108006.57 | -26       | 278.94   | 1.70                     | 132276.42 |
| -11       | 252.06   | 1.70                     | 108006.57 | -27       | 278.94   | 1.70                     | 132276.42 |
| -12       | 255.77   | 1.70                     | 111208.48 | -28       | 320.21   | 1.70                     | 174306.64 |
| -13       | 272.75   | 1.70                     | 126471.57 | -29       | 281.93   | 1.70                     | 135122.8  |
| -14       | 266.24   | 1.70                     | 120504.37 | -30       | 226.79   | 1.70                     | 87434.29  |
| -15       | 266.24   | 1.70                     | 120504.37 | -31       | 240.15   | 1.70                     | 98040.972 |
| -16       | 266.24   | 1.70                     | 120504.37 | -32       | 275.89   | 1.70                     | 129393.28 |

Tabel 5.13  $G_{max}$  pada tiap kedalaman di Malangan dengan Vs dari NSPT

| Depth (m) | Vs (m/s) | Rho (kg/m <sup>3</sup> ) | G (Pa)    | Depth (m) | Vs (m/s) | Rho (kg/m <sup>3</sup> ) | G (Pa)    |
|-----------|----------|--------------------------|-----------|-----------|----------|--------------------------|-----------|
| -1        | 0.00     | 1.6                      | 0.00      | -17       | 257.58   | 1.6                      | 106154.44 |
| -2        | 0.00     | 1.6                      | 0.00      | -18       | 266.24   | 1.6                      | 113415.88 |
| -3        | 248.23   | 1.7                      | 104747.41 | -19       | 269.54   | 1.7                      | 123509.32 |
| -4        | 275.89   | 1.6                      | 121781.91 | -20       | 274.33   | 1.6                      | 120411.64 |
| -5        | 257.58   | 1.6                      | 106154.44 | -21       | 274.96   | 1.7                      | 128520.90 |
| -6        | 248.23   | 1.7                      | 104747.41 | -22       | 266.24   | 1.7                      | 120504.37 |
| -7        | 248.23   | 1.7                      | 104747.41 | -23       | 274.33   | 1.7                      | 127937.37 |
| -8        | 248.23   | 1.7                      | 104747.41 | -24       | 281.93   | 1.7                      | 135122.80 |
| -9        | 238.03   | 1.6                      | 90655.77  | -25       | 281.93   | 1.7                      | 135122.80 |
| -10       | 226.79   | 1.6                      | 82291.10  | -26       | 287.70   | 1.7                      | 140711.85 |
| -11       | 248.23   | 1.6                      | 98585.80  | -27       | 287.70   | 1.7                      | 140711.85 |
| -12       | 274.33   | 1.7                      | 127937.37 | -28       | 281.93   | 1.7                      | 135122.80 |
| -13       | 281.93   | 1.7                      | 135122.80 | -29       | 295.91   | 1.7                      | 148857.67 |
| -14       | 289.10   | 1.7                      | 142088.60 | -30       | 308.58   | 1.7                      | 161878.86 |
| -15       | 274.33   | 1.7                      | 127937.37 | -31       | 341.03   | 1.7                      | 197717.11 |
| -16       | 248.23   | 1.7                      | 104747.41 | -32       |          |                          | 0.00      |



a. Sorosutan



b. Malangan

Gambar 5.40 Grafik  $G_{max}$  dari N-SPT tiap kedalaman

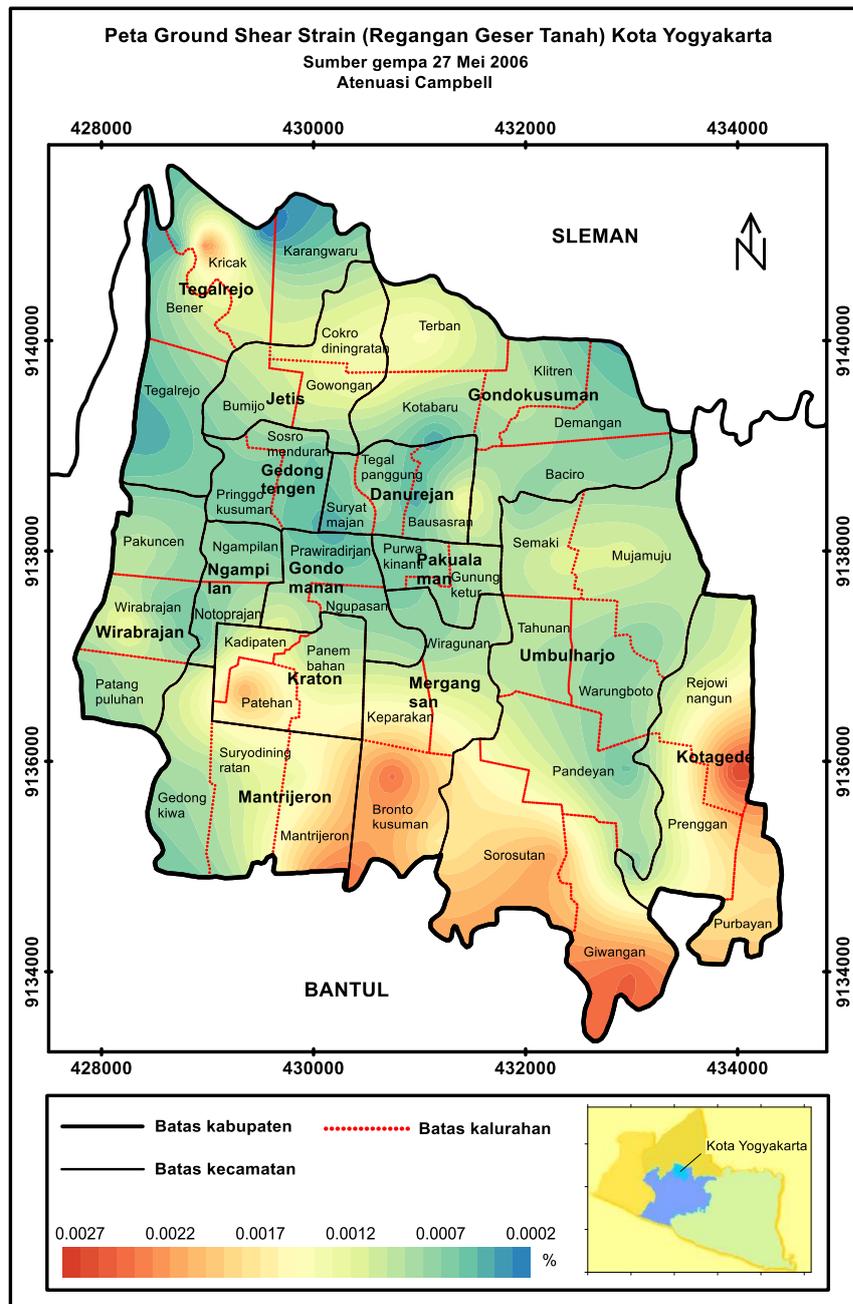
Nilai *shear modulus maximum* ( $G_{max}$ ) juga mempengaruhi nilai *shear strain* selain perbedaan dari PGA dibatuan dasar. Namun untuk *shear strain*

dengan konsep Nakamura tidak dipengaruhi nilai *shear modulus*, hanya dipengaruhi nilai indeks kerentanan seismik dan PGA di batuan dasar.

### 5.3.3 Regangan Geser ( $\gamma$ )

Nilai regangan geser yang terukur di wilayah penelitian menunjukkan besarnya tingkat regangan pada material penyusun saat terjadi gempa bumi. Nakamura *et.al* (2000) menghitung besarnya regangan geser di suatu tempat dengan cara melakukan perkalian antara indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) berdasarkan mikrotremor dengan besarnya PGA di batuan dasar. Beberapa penelitian mengenai regangan geser tanah (*ground shear strain*) yang tinggi berkorelasi dengan kerusakan akibat gempa bumi. Salah satu contohnya, Nakamura melakukan penelitian di Kobe terkait dengan gempa bumi Kobe 1995 (M 6.9). Hasil penelitiannya menunjukkan nilai *ground shear strain* di zona dengan kerusakan parah mencapai  $1\sim 2 \times 10^{-3}$ . Daryono dalam penelitiannya di daerah Bantul menunjukkan nilai *ground shear strain* akibat gempa bantul 27 Mei 2006 mencapai nilai  $9.634 \times 10^{-6}$  di daerah yang mengalami kerusakan parah. Nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) dan nilai PGA memberikan sumbangan terbesar terhadap nilai regangan tanah di suatu tempat. Namun dalam kajian mikrozonasi di daerah penelitian ini nilai PGA tidak signifikan karena wilayahnya yang sempit, maka nilai indeks kerentanan seismik mempunyai pengaruh yang lebih besar. Hal ini juga terlihat di daerah penelitian bagian selatan Kota Yogyakarta mempunyai nilai indeks kerentanan seismik yang lebih tinggi dan menunjukkan nilai regangan geser yang lebih tinggi.

Pada penelitian ini menggunakan atenuasi Champbel 1989 untuk menentukan PGA di batuan dasar. Nilai regangan geser yang diperoleh dalam penelitian ini di sajikan peta distribusi regangan geser tanah (Gambar 5.41). Nilai regangan geser tanah permukaan akibat gempa 27 Mei 2006 di wilayah Kota Yogyakarta bernilai sekitar 0.00275% sampai dengan 0.00019%. Wilayah bernilai tinggi berada di wilayah selatan meliputi Kecamatan Kotagede, bagian selatan Kecamatan Umbul harjo, Kecamatan Mantriheron dan Kecamatan Kraton.



Gambar 5.41 Peta distribusi regangan geser tanah

Hubungan antara regangan geser dengan fenomena akibat yang terjadi akibat gempa bumi, salah satunya ditunjukkan tabel yang dibuat Ishihara (Tabel 5.12), semakin besar regangan geser menyebabkan lapisan tanah mengalami longsor, rekahan dan likuifaksi. Pada *strain*  $10^{-6}$  kondisi tanah hanya mengalami getaran, tetapi pada *strain*  $10^{-2}$  lapisan tanah mengalami longsor dan

likuifaksi. Kajian *ground shear strain* dapat digunakan untuk menilai bahaya gempa bumi karena dapat diketahui tingkat kerentanan suatu wilayah.

Tabel 5.12 Nilai *strain* dan dinamika tanah (Ishihara,1982)

| <i>Size of Strain</i>     | $10^{-6}$              | $10^{-5}$                      | $10^{-4}$                | $10^{-3}$             | $10^{-2}$                        | $10^{-1}$ |
|---------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------|
| <i>Phenomena</i>          | <i>Wave, vibration</i> | <i>Crack, Diff, Settlement</i> |                          |                       | <i>Lanslide, Soil Compaction</i> |           |
| <i>Dynamic Properties</i> | <i>Elasticity</i>      |                                | <i>Elasto-Plasticity</i> | <i>Repead -Effect</i> | <i>Speed- Effect of Loading</i>  |           |

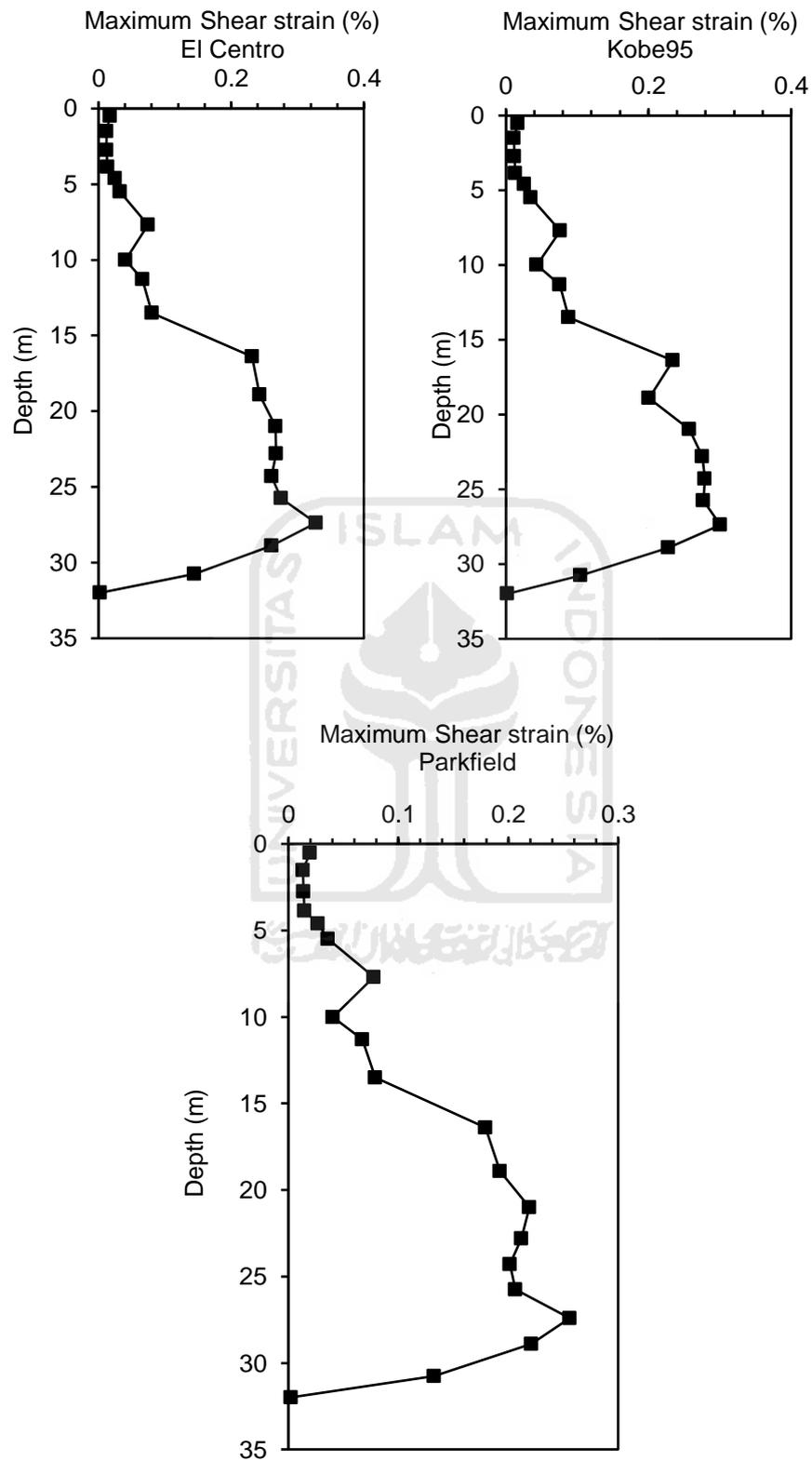
Hasil perhitungan regangan geser dengan menggunakan NERA pada kedua titik uji ini menggunakan tiga jenis *ground motion* ditunjukkan oleh Tabel 5.13 dan Gambar 5.42 untuk titik Malangan dan Gambar 5.43 untuk titik Sorosutan

Tabel 5.13 Hasil perhitungan *shear strain* dalam % pada permukaan tanah dari masing-masing titik uji dari masing-masing *input motion*.

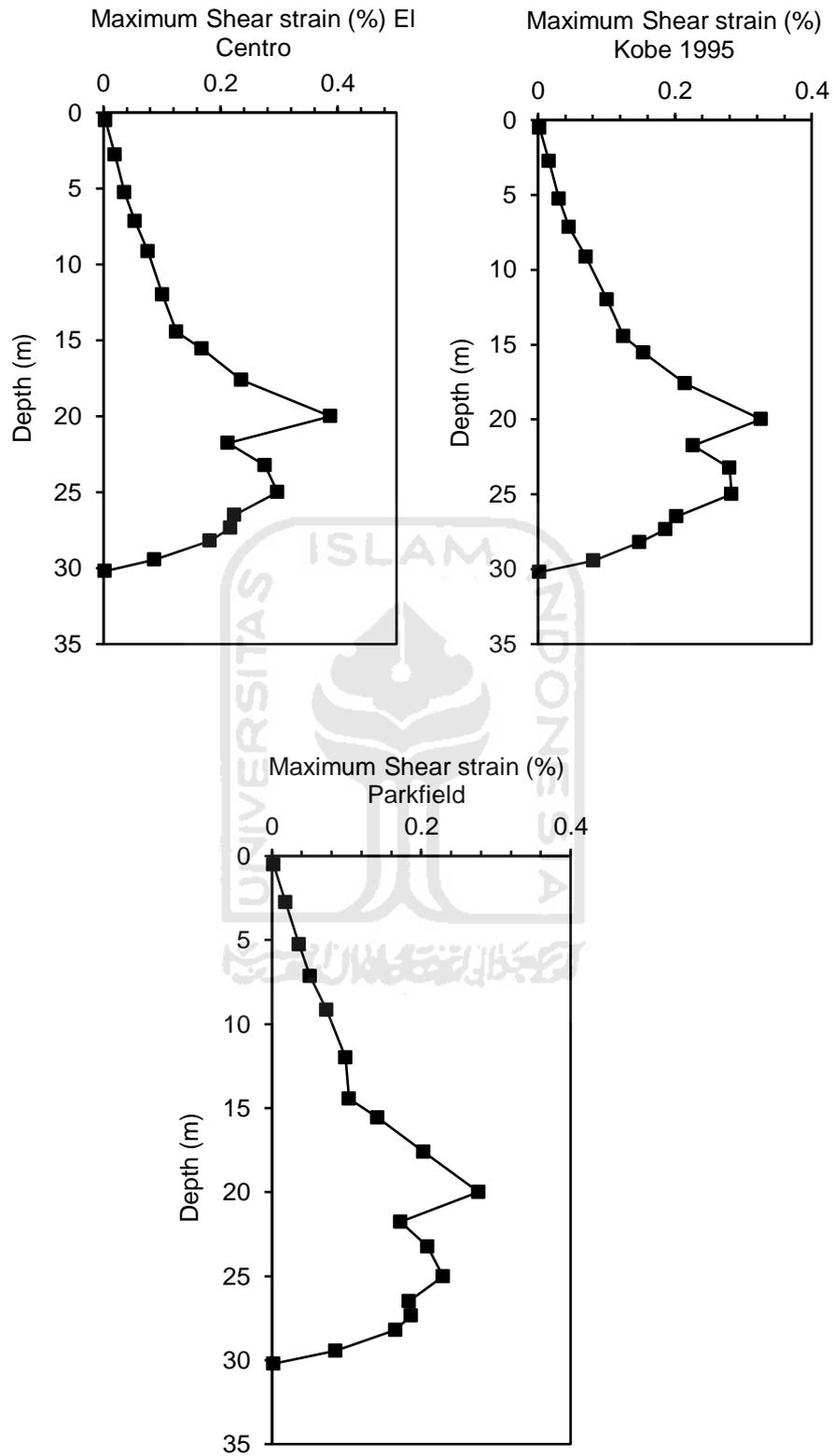
| Titik Uji | El centro | Kobe    | Parkfield | Nakamura |
|-----------|-----------|---------|-----------|----------|
| Malangan  | 0.01692   | 0.01729 | 0.01975   | 0.0027   |
| Sorosutan | 0.00362   | 0.00227 | 0.00247   | 0.0021   |

Titik uji Malangan menghasilkan nilai *ground shear strain* tertinggi sebesar 0.01975% dengan *source ground motion* Parkfield. Titik uji Sorosutan menghasilkan nilai *ground shear strain* tertinggi sebesar 0.00362% didapat dari perhitungan dengan *source ground motion* El centro. Perhitungan dengan metode Nakamura terdapat perbedaan namun tidak terlalu besar. Hal ini di mungkinkan karena penggunaan PGA pada perhitungan Nakamura yang menyebabkan hasil yang berbeda.

Dua titik uji ini belum dapat mewakili kondisi kegempaan di Yogyakarta secara keseluruhan. Karena titik uji yang diambil sangat sedikit apabila dibandingkan dengan luasan wilayah yang ditinjau. Sehingga perlu ada penambahan titik uji sehingga dapat merepresentasikan wilayah penelitian.



Gambar 5.42 Grafik *maximum shear strain* di titik tinjau Malangan



Gambar 5.43 Grafik *maximum shear strain* di titik tinjau Sorosutan

#### 5.3.4 Hubungan indeks kerentana seismik ( $K_g$ ), regangan geser ( $\gamma$ ) dan percepatan tanah ( $\alpha$ )

Indeks kerentanan seismik, regangan geser dan percepatan tanah menurut Nakamura seperti dirumuskan dalam persamaan 3.19, terlihat bahwa besarnya regangan geser tanah dipengaruhi oleh besarnya nilai indeks kerentanan seismik dan besarnya PGA di batuan dasar dititik tertentu. Regangan geser berbanding lurus dengan nilai indeks kerentanan seismik dan nilai PGA di batuan dasar. Semakin besar nilai  $K_g$  makasemakin besar nilai regangan geser. Demikian pulam semakin besar PGA di batuan dasar semakin besar nilai regangan geser tanahnya.

Berdasarkan hasil pengukuran besarnya regangan geser relatif besar berada di bagian selatan dari daerah penelitian yaitu meliputi Kecamatan Kotagede, bagian Selatan Kecamatan Umbulharjo, Kecamatan Mantrijeron dan Kecamatan Mergangsan. Hal ini berkaitan dengan nilai indeks kerentanan seismik yang relatif lebih besar dibanding daerah lainnya. Menunjukkan wilayah bagian selatan Kota Yogyakarta mempunyai material penyusun relatif lebih tidak kompak dari bagian yang lain, ditunjukkan nilai regangan gesernya yg lebih besar sehingga relatif lebih rawan. Pengaruh PGA tidak terlalu signifikan karena luas area penelitian yang tidak luas, sehingga variasi PGA tidak terlalu besar. Hal ini karena PGA yang digunakan (atenuasi Campbell 1997) hanya menggunakan parameter jarak dan magnitudo dalam perhitungannya.

#### 5.3.5 Tingkat Kerentanan Seismik di Wilayah Kota Yogyakarta

Tingkat kerentanan dalam penelitian ini secara sederhana ditentukan dari pengklasifikasian parameter-parameter yang diperoleh dari pengukuran di daerah penelitian yaitu nilai  $K_g$ , PGA Kanai, regangan geser tanah dan  $V_{s30}$ . Hasil pengukuran tersebut diklasifikasi dengan cara membagi menjadi tiga klasifikasi level nilai hasil ukur yaitu level tertinggi, menengah dan terendah, level ini hanya untuk daerah penelitian, tidak berlaku secara umum. Dari empat nilai ukur maka diperoleh empat klasifikasi level di daerah penelitian seperti ditunjukkan Tabel 5.14, 5.15, 5.16 dan 5.17 yaitu :

Tabel 5.14 klasifikasi level  $K_g$ 

| No | Rentang       | Klasifikasi level | Skor |
|----|---------------|-------------------|------|
| 1  | 1.54 – 7.06   | level rendah      | 1    |
| 2  | 7.06 – 12.57  | level menengah    | 2    |
| 3  | 12.57 – 18.09 | tinggi            | 3    |

Tabel 5.15 klasifikasi level PGA Kanai

| No | Rentang         | Klasifikasi level | Skor |
|----|-----------------|-------------------|------|
| 1  | 338.42 – 515.18 | level rendah      | 1    |
| 2  | 515.18 – 691.93 | level menengah    | 2    |
| 3  | 691.93 – 868.68 | level tinggi      | 3    |

Tabel 5.16 klasifikasi level regangan geser Champbel

| No | Rentang             | Klasifikasi level | Skor |
|----|---------------------|-------------------|------|
| 1  | 0 – 0.000001        | level rendah      | 1    |
| 2  | 0.000001 – 0.000002 | level menengah    | 2    |
| 3  | 0.000002 – 0.000004 | level tinggi      | 3    |

Tabel 5.17 klasifikasi level  $V_{s30}$ 

| No | Rentang         | Klasifikasi level | Skor |
|----|-----------------|-------------------|------|
| 1  | 183.44 – 209.77 | level rendah      | 3    |
| 2  | 209.77 – 226.10 | level menengah    | 2    |
| 3  | 226.10 – 262.43 | level tinggi      | 1    |

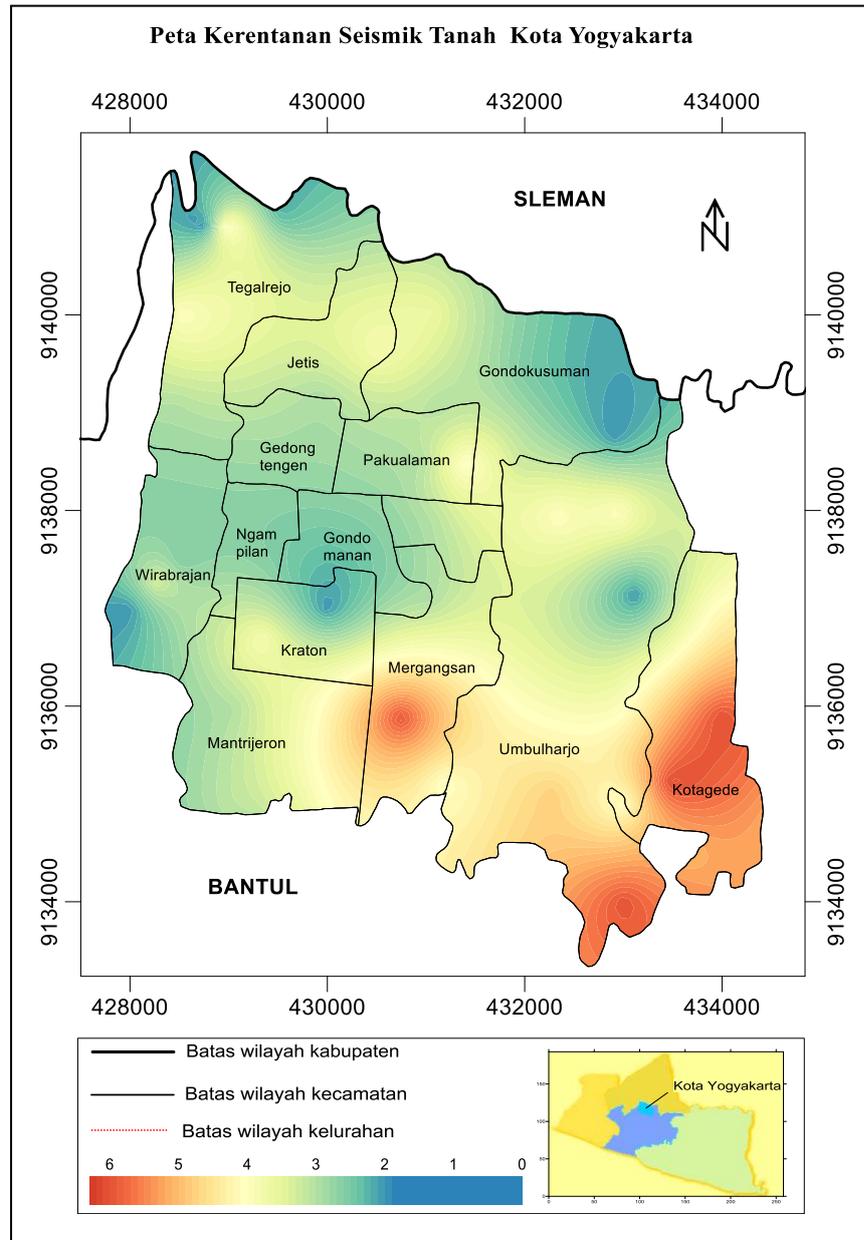
Skor setiap parameter tersebut kemudian dijumlahkan sehingga diperoleh peta yang menunjukkan nilai kerentanan seismik berdasar semua nilai ukur. Penggabungan dilakukan dengan melakukan penjumlahan skor yang diperoleh masing-masing pada setiap titik *grid* seluas daerah penelitian. Nilai gabungan dari keempat peta tersebut selanjutnya digunakan untuk membuat peta kerentanan seismik. Peta kerentanan seismik yang diperoleh di daerah penelitian

ditunjukkan oleh gambar 5.44. Berdasarkan peta tersebut terlihat wilayah Kota Yogyakarta bagian Selatan relatif lebih rentan terhadap guncangan gempa bumi.

Peta kerentanan juga menunjukkan wilayah Kota Yogyakarta bagian selatan mempunyai nilai amplifikasi, indek kerentanan seismik, PGA dan regangan geser bernilai relatif lebih tinggi dari bagian wilayah Kota Yogyakarta, sedangkan nilai kecepatan gelombang gesernya lebih rendah. Nilai-nilai ini yang mengindikasikan bagian selatan wilayah ini relatif lebih lunak atau relatif tidak kompak sehingga lebih rentan terhadap guncangan gempa bumi atau tingkat kerentanan seismiknya tinggi

Daerah-daerah dengan kerentanan seismik tinggi meliputi Kecamatan Kotagede, Kecamatan Umbulharjo bagian selatan, Kecamatan Mergangsan. Ketiga kecamatan ini jumlah kerusakan bangunannya cukup besar. Kerusakan akibat gempa terbesar berada di wilayah Kecamatan Umbulharjo, Mergangsan, Kotagede dan Mantrijeron. Kerusakan di kecamatan-kecamatan ini jumlahnya jauh lebih banyak dibanding kecamatan-kecamatan yang lain di Kotamadya Yogyakarta. Tabel 5.14 menunjukkan kerusakan bangunan di wilayah Kota Yogyakarta (FTG UGM-Badan Geologi ESDM, 2008). Dari tabel terlihat untuk Kecamatan Umbulharjo jumlah kerusakan bangunan dengan kategori berat sekitar 2.522 bangunan, kecamatan Mergangsan mencapai sekitar 1.466 bangunan rusak berat, sedangkan kecamatan Kotagede sekitar 1.290 bangunan rusak berat.

Persebaran tingkat kerusakan akibat gempa bumi 27 mei 2006 wilayah bagian selatan Kota Yogyakarta ini berkorelasi dengan tingkat kerentanan seismik hasil penelitian, dimana bagian selatan relatif lebih rentan berkesusaian dengan kerusakan bangunannya lebih parah.



Gambar 5.44 Peta Kerentanan seismik Kota Yogyakarta

### 5.3 Kondisi bawah permukaan daerah Kota Yogyakarta

Usaha untuk mengetahui kondisi bawah permukaan salah satunya dilakukan dengan melakukan pengeboran. Data pengeboran dalam penelitian ini berupa data sekunder yang diperoleh diantaranya data bor di Malangan dan Sorosutan (Dinas PU-ESDM, 2010), data bor pembangunan Mall Hartono (Hatmoko dan Lulie, 2008) dan sumber lainnya.

Hasil pemboran pada titik Malangan menunjukkan kondisi bawah permukaan berupa tanah berukuran pasir, kepadatan relatif sedang-padat, tingkat konsistensi (kelunakan) sedang, nilai permeabilitas (cm/dt) berkisar dari  $1.3 \times 10^{-3} - 7.2 \times 10^{-3}$ , dengan nilai N-SPT dominan berkisar 15-30, seperti terlihat dalam lampiran 12. Hasil pemboran di daerah Sorosutan menunjukkan kondisi bawah permukaan berupa tanah berukuran pasir, kepadatan relatif sedang, tingkat konsistensi relatif sedang, nilai permeabilitas (cm/dt) berkisar dari  $1.2 \times 10^{-3} - 5.4 \times 10^{-3}$ , dengan nilai N-SPT dominan berkisar 12-47, seperti terlihat dalam lampiran 12.

Hasil uji laboratorium mekanika tanah pada dua lokasi didapatkan hasil pengujian secara umum pada lokasi pemboran Malangan (Giwangan), didapatkan kandungan air berkisar 8.95% - 37.82% dengan rata-rata menjadi 20.7%. Untuk nilai berat jenis didapatkan nilai hasil pengujian berkisar 2.61 - 22.79 dengan rata-rata menjadi 2.7. Ukuran butir sedimen dominan pasir, dengan rasio pori rata-rata 0.7 dan porositas 42.31%. Nilai derajat kejenuhan air rata-rata 70.2%, dengan densitas total rata-rata dan densitas kering rata-rata sebesar  $1.8 \text{ gr/cm}^3$  dan  $1.6 \text{ gr/cm}^3$ . Untuk nilai sudut geser dalam dan kohesi rata-rata diperoleh nilai sebesar  $37.7^\circ$  dan  $0.11 \text{ kg/cm}^2$ , seperti tertera pada lampiran 12. Hasil pada lokasi pemboran Sorosutan juga menunjukkan nilai yang tidak berbeda jauh dengan Malangan, yaitu nilai kandungan air berkisar dari 6.54 - 27.40% dengan rata-rata 16.75%. Untuk nilai berat jenis didapatkan nilai pengujian berkisar 2.44 - 2.91 dengan rata-rata menjadi 2.6. Ukuran butir sedimen dominan pasir, dengan rasio pori rata-rata sebesar 0.69 dan porositas rata-rata sebesar 38.9%. Nilai derajat kejenuhan air rata-rata yaitu 77.6% dengan densitas total rata-rata dan densitas kering rata-rata  $1.9 \text{ gr/cm}^3$  dan  $1.65 \text{ gr/cm}^3$ . Untuk nilai sudut geser dalam dan kohesi rata-rata diperoleh nilai sebesar  $35.26^\circ$  dan  $0.07 \text{ kg/cm}^2$ .

Data pemboran juga diperlihatkan oleh hasil pemboran dari titik pemboran di Janturan dan Golo kecamatan Umbulharjo (UGM-British Council 2007) seperti terlihat di lampiran 13. Data log bor tersebut menunjukkan kondisi bawah tanah dominan berupa tanah berukuran pasir, kepadatan relatif sedang - padat, konsistensi relatif sedang, nilai permeabilitas (cm/dt) berkisar antara  $2.4 \times 10^{-4} - 7.2 \times 10^{-2}$ , dengan nilai N-SPT dominan berkisar 11 - 46. Dari data

bor-bor ini terlihat bahwa kekompakan tanah mempunyai nilai yang relatif sama sekitar 11- 47.

Dari penelitian yang berkaitan dengan potensi air tanah di cekungan Yogyakarta juga didapatkan data log bor dari hasil pemboran air tanah di Kantor Bapindo, Hotel Garuda, sumur bor irigasi YK 08 yang dilakukan oleh P2AT, seperti terlihat di lampiran 13. Dari data-data bor tersebut terlihat bahwa sebagian besar endapan sedimen di kota Yogyakarta didominasi oleh pasir yang terdistribusi merata diseluruh daerah di penelitian dengan ketebalan yang tidak besar.

Selain data diatas dari data pengujian bor dalam, hasil pengujian *standart penetration test*, pengujian sifat-sifat fisik tanah dan sifat-sifat mekanikanya yang dilakukan dilaboratorium oleh Hatmoko dan Suryadarma (Hatmoko dan Suryadarma, 2013) untuk kajian potensi pencairan tanah. Titik-titik pengujian bor diantaranya berada di Auditorium Universitas Sanata Dharma di Jl. Affandi 2 buah titik bor (BH-1 dan BH2) masing-masin pada kedalaman 20 meter. Tititik lokasi pembangunan Hotel Hartono Life Style di ring road Utara ( 5 buah titik bor masing-masing sampai pada kedalamana 30 meter). Dari lokasi Auditorium Sanata Dharma menurut hasil pengujian bor dalam pada kedalaman 8.00 meter tanah berupa pasir kelanauan, dan pada kedalaman 15.00 meter tanah berupa pasir kasar. Sampel tanah diambil pada kedalaman 3.00 meter, 8.00 meter dan 15.00 meter. Pengujian laboratorium yang dilakukan pada sampel tanah tersebut adalah : analisis saringan, berat jenis, berat volum dan kuat geser tanah (dengan pengujian geser langsung). Berikut adalah hasil hasil pengujian laboratorium tersebut. Hasil analisi saringan menunjukkan bahwa keseragaman ( $C_u=2$ ) dan koefisien gradasi ( $C_c=2$ ) sehingga tanah ini, menurut USCS, adalah tanah bergradasi buruk (SW). Tanah ini jika dalam keadaan jenuh berpotensi mengalami likuifaksi.

Tabel 5.19. Hasil uji bor di Auditorium Sanata Dharma Yogyakarta

| Kedalaman<br>(m) | B1-2               |              |               |                 | B1-1               |               |              |                 |
|------------------|--------------------|--------------|---------------|-----------------|--------------------|---------------|--------------|-----------------|
|                  | Jenis Tanah        | G            | N-SPT         | $\gamma(t/m^3)$ | Jenis Tanah        | G             | N-SPT        | $\gamma(t/m^3)$ |
| 1,00 – 2,50      | Pasir sedang       | 2,62         | 9             | 1,82            | Pasir sedang       | 2,62          | 10           | 1,82            |
| 2,50 – 4,50      | Pasir kasar        | 2,62         | 15            | 1,82            | Pasir kasar        | 2,62          | 20           | 1,82            |
| 4,50 – 6,50      | Pasir halus        | 2,62         | 18            | 1,82            | Pasir halus        | 2,62          | 20           | 1,82            |
| 6,50 – 8,50      | Pasir<br>kelanauan | 2,62         | 18            | 1,82            | Pasir<br>kelanauan | 2,62          | 17           | 1,82            |
| 8,50 – 10,50     | Pasir kasar        | 2,62         | 22            | 1,82            | Pasir kasar        | 2,62          | 21           | 1,82            |
| 10,50 – 12,50    | Pasir sedang       | 2,62         | 21            | 1,82            | Pasir sedang       | 2,62          | 34           | 1,82            |
| 12,50 – 14,50    | Pasir halus        | 2,60         | 26            | 2,15            | Pasir halus        | 2,60          | 25           | 2,15            |
| 14,50 – 16,50    | Pasir kasar        | 2,60         | 35            | 2,15            | Pasir kasar        | 2,60          | 41           | 2,15            |
| 16,50 – 18,50    | Batu pasir         | 2,60         | 50            | 2,15            | Batu pasir         | 2,60          | 50           | 2,15            |
| 18,50 – 20,00    | Batu pasir         | 2,60         | 50            | 2,15            | Batu pasir         | 2,60          | 50           | 2,15            |
| <b>M. A. T</b>   | <b>-12,50</b>      |              |               |                 |                    |               |              |                 |
| <b>Sampel</b>    | <b>-3,00</b>       | <b>-8,00</b> | <b>-15,00</b> | <b>-3,00</b>    | <b>-8,00</b>       | <b>-15,00</b> | <b>-3,00</b> | <b>-15,00</b>   |

Hasil pengujian bor dalam dan SPT menunjukkan bahwa di permukaan (kedalaman -1.00 sampai dengan -8.00) memiliki nilai N rendah antara 9 sampai dengan 20. Hal tersebut kemungkinan disebabkan oleh dua hal. Pertama, jenis tanahnya sendiri, kedua oleh pengaruh tekanan efektif yang rendah pada daerah permukaan.

Hasil pengujian pada lokasi Hotel Hartono dengan kedalaman bor 20 meter pada umumnya tanah berupa pasir halus sampai kasar untuk semua kedalaman (Hatmoko dan Lulie, 2008). Nilai N-SPT rata-rata tinggi diatas 20, hanya terdapat beberapa kedalaman yang mempunyai nilai lebih kecil dari 20. Untuk masing-masing pmboran, sampel tanah diambil pada kedalaman 5.00 dan 10.00 meter untuk uji laboratorium. Hasil analisis saringan menunjukkan fraksi pasir dan kerikil sebesar 76.4% (kerikil 11.2%, pasir 65.2%) sedangkan fraksi halus (<0.075 mm) sebesar 23.6% (lanau 10%, lempung 13.6%). Koefisien keseragaman ( $C_u=2.1$ ), koefisien kelengkungan ( $C_c=3$ ).

Dari pengujian pmboran dan SPT tersebut dapat disimpulkan bahwa hasil pmboran menunjukkan tanah berupa pasir halus, pasir kasar, pasir kerikil bergradasi buruk yang ditunjukkan oleh nilai koefisien keseragaman lebih kecil atau sama dengan 3, dengan kelengkungan lebih kecil dari 4. Dari hasil saringan juga konsisten dengan profil tanah hasil pengujian bor dimana sebagian besar berupa pasir yang ditunjukkan oleh fraksi kasaryang lebih 50%, koefisien

keseragaman antara 2 dan 3, koefisien kelengkungan antara 2 dan 4. Namun dilokasi tertentu yang lain juga ditemukan pasir kelanauan. Dari data-data log bor tersebut diatas terlihat sebagian besar endapan sedimen di Kota Yogyakarta didominasi oleh pasir yang terdistribusi merata diseluruh daerah penelitian dengan perselingan lempung, breksi dan silt dibeberapa tempat.

Tabel 5.20. Hasil Uji bor di titik Hotel Hartono Mall

| ELEVASI<br>(M) | B4-4            |               |       | B4-5            |               |       |
|----------------|-----------------|---------------|-------|-----------------|---------------|-------|
|                | $\gamma(t/m^3)$ | w(%)          | N-SPT | $\gamma(t/m^3)$ | w(%)          | N-SPT |
| 1,00 – 2,50    | 2.29            | 17.87         | 30    | 2.18            | 20.28         | 28    |
| 2,50 – 4,50    | 2.29            | 17.87         | 25    | 2.18            | 20.28         | 25    |
| 4,50 – 6,50    | 2.29            | 17.87         | 28    | 2.18            | 20.28         | 20    |
| 6,50 – 8,50    | 2.29            | 17.87         | 20    | 2.18            | 20.28         | 16    |
| 8,50 – 10,50   | 2.29            | 17.87         | 21    | 2.18            | 20.28         | 17    |
| 10,50 – 12,50  | 2.30            | 21.26         | 32    | 2.18            | 20.28         | 32    |
| 12,50 – 14,50  | 2.30            | 21.26         | 54    | 2.18            | 20.28         | 25    |
| 14,50 – 16,50  | 2.30            | 21.26         | 22    | 2.18            | 20.28         | 35    |
| 16,50 – 18,50  | 2.30            | 21.26         | 28    | 2.18            | 20.28         | 46    |
| 18,50 – 20,50  | 2.30            | 21.26         | 60    | 2.18            | 20.28         | 60    |
| 20,50 – 22,50  | 2.12            | 26.53         | 60    | 2.20            | 18.66         | 60    |
| 22,50 – 24,50  | 2.12            | 26.53         | 20    | 2.20            | 18.66         | 24    |
| 24,50 – 26,50  | 2.12            | 26.53         | 28    | 2.20            | 18.66         | 29    |
| 26,50 – 28,50  | 2.12            | 26.53         | 30    | 2.20            | 18.66         | 31    |
| 28,50 – 30,00  | 2.12            | 26.53         | 33    | 2.20            | 18.66         | 32    |
| <b>M.A.T</b>   | <b>-7,00</b>    |               |       | <b>-7,00</b>    |               |       |
| <b>Sampel</b>  | <b>-10,50</b>   | <b>-20,50</b> |       | <b>-2,00</b>    | <b>-10,00</b> |       |

## BAB VI

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 6.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian kerentanan seismik dan karakteristik dinamika tanah di Kota Yogyakarta, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Pemetaan tingkat kerentanan seismik dan karakteristik dinamika tanah di Kota Yogyakarta sebagai bahan pertimbangan dalam mitigasi bencana dan perencanaan pembangunan suatu daerah dapat ditentukan melalui pemetaan parameter hasil pengukuran dan pengolahan data mikrotremor serta data pengukuran lainnya. Variasi nilai yang diperoleh dipengaruhi oleh kondisi geologi daerah tersebut.
2. Distribusi nilai faktor amplifikasi berkisar antara 1.69-6.48. Distribusi nilai frekuensi dominan dengan nilai 0.62-3.4 Hz. Distribusi nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0.65-18.43 dengan nilai relatif lebih tinggi di bagian selatan wilayah Kota Yogyakarta.
3. Karakteristik dinamik tanah ditunjukkan oleh nilai kecepatan gelombang geser  $v_s$ , yang terukur di titik malangan dan Sorosutan.  $v_s$  replikasi rata-rata 251.69 m/s,  $v_s$  Imai and Tonouchi rata-rata 264.48 m/s dan  $v_s$  inversi 275.36 m/s.  $v_s$  bernilai rendah berada di bagian selatan Kota Yogyakarta
4. Karakteristik dinamik tanah ditunjukkan nilai regangan geser dengan metode Nakamura berkisar antara 0.0002 sampai 0.0028.  
Regangan geser menggunakan *software* NERA dititik Malangan didapatkan 0.01692, 0.01729 dan 0.01975 dan Sorosutan 0.00362, 0.00227 dan 0.00247 untuk *input motion* gempa El Centro, Kobe dan Parkfiled. Nilai regangan geser relatif tinggi di bagian selatan Kota Yogyakarta
5. Nilai Modulus geser rata-rata di Malangan dan Sorosutan terukur 0.230 M.Pa dan 0.167 M.Pa.
6. Nilai PGA berdasar perhitungan dengan metode Kanai berkisar antara 0.338 g sampai 0.868 g. Perhitungan dengan *software* NERA di titik

Malangan 0.321 g, 0.324 g, 0.361 g dan Sorosutan 0.383 g, 0.249 g, 0.270 g masing-masing untuk sumber gempa El Centro, Kobe dan Parkfield.

7. Regangan geser tanah menurut rumusan Nakamura dipengaruhi oleh besarnya nilai indek kerentanan seismik dan besarnya PGA di batuan dasar dititik tertentu dan berbanding lurus dengan nilai indek kerentanan seismik dan nilai PGA.
8. Daerah bagian selatan wilayah Kota Yogyakarta mempunyai tingkat kerentanan yang relatif lebih tinggi sesuai dengan kondisi kerusakan bangunan akibat gempa, meliputi kecamatan Kotagede, Umbulharjo, Mergangsan dan Mantrijeron.

## 6.2 Saran

1. Titik data ukur dan data bor perlu ditambah kerapatannya sehingga data yang diperoleh semakin banyak sehingga informasi dan kondisi sifat tanah yang diperoleh semakin akurat.
2. Penentuan PGA dengan New Generation Atenuation sehingga sehingga diperoleh PGA dengan metode terbaru.
3. Penggunaan atenuasi (dibatuan atau di tanah) yang digunakan untuk *spectral mathcing* disesuaikan dengan rekaman gempa (*time history*) yang digunakan sehingga diperoleh spektrum yang lebih sesuai.

## DAFTAR PUSTAKA

- Aswad, S., Amiruddin, Hartini, S., Suriamiharja, Ahmad, D., Maria, Suhendratman, Permana, A., 2013, *Mapping Seismic Vulnerability Index on Hasanuddin Area Using Spectral Ratio for Disaster Prevention* <http://repository.unhas.ac.id/handle/123456789/2173> Februari 2013
- Bardet, J.P., Ichii, K., and Lin, C.H., 2000, EERA : A Computer program for Equivalent-linear Earthquake site Response Analysis of Layered Soil Deposit, Departmen of Civil Engineering, University of South California.
- Bardet, J.P., Tobita, T., 2001, NERA: A Computer program for Nonlinear Earthquake site Response Analyses of Layred soil deposits, Department of Civil Engineering, University of Southern California.
- Bemmelen, R.W. Van, 1949, *The Geology of Indonesia*. Government Printing Office, The Hague, p.732.
- Bullen, K.E. and B. Bolt, 1985. "An Introduction to the Theory of Seismology". Cambridge University Press, 4th Editi on, 509 pp
- Cahyaningtyas, 2012, *Studi Kerawanan Seismik Kecamatan Temon, Wates dan Panjatan Kabupaten Kulonprogo*, Tesis Program Studi Ilmu Lingkungan Minat Studi Geo-Informasi untuk Manajemen Bencana
- Daryono, Sutikno, Junun S., Kirbani S.B., and Dulbahri, 2009, *Local Site effect of Graben Bantul Using Microtremor Measurement, Proceedings of International Conference Earth Science and Technology*, Department of Geological Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta.
- Edwiza, 2008, *Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Panjang Menggunakan Metode Kanai*, Jurnal Teknik No.29 Vol. 2 Thn XV April 2008
- Gallipoli, M.R, Gaudio, V.D., Coccial, S., Wasowski, J., and Mucciarelli, M. 2008, *Natural Hazards and earth Syatem Sciences Detection of directivity in seismic site respon from Microtremor spetral analysis*. Natural Hazard Earth Syst. Sci., 751-762

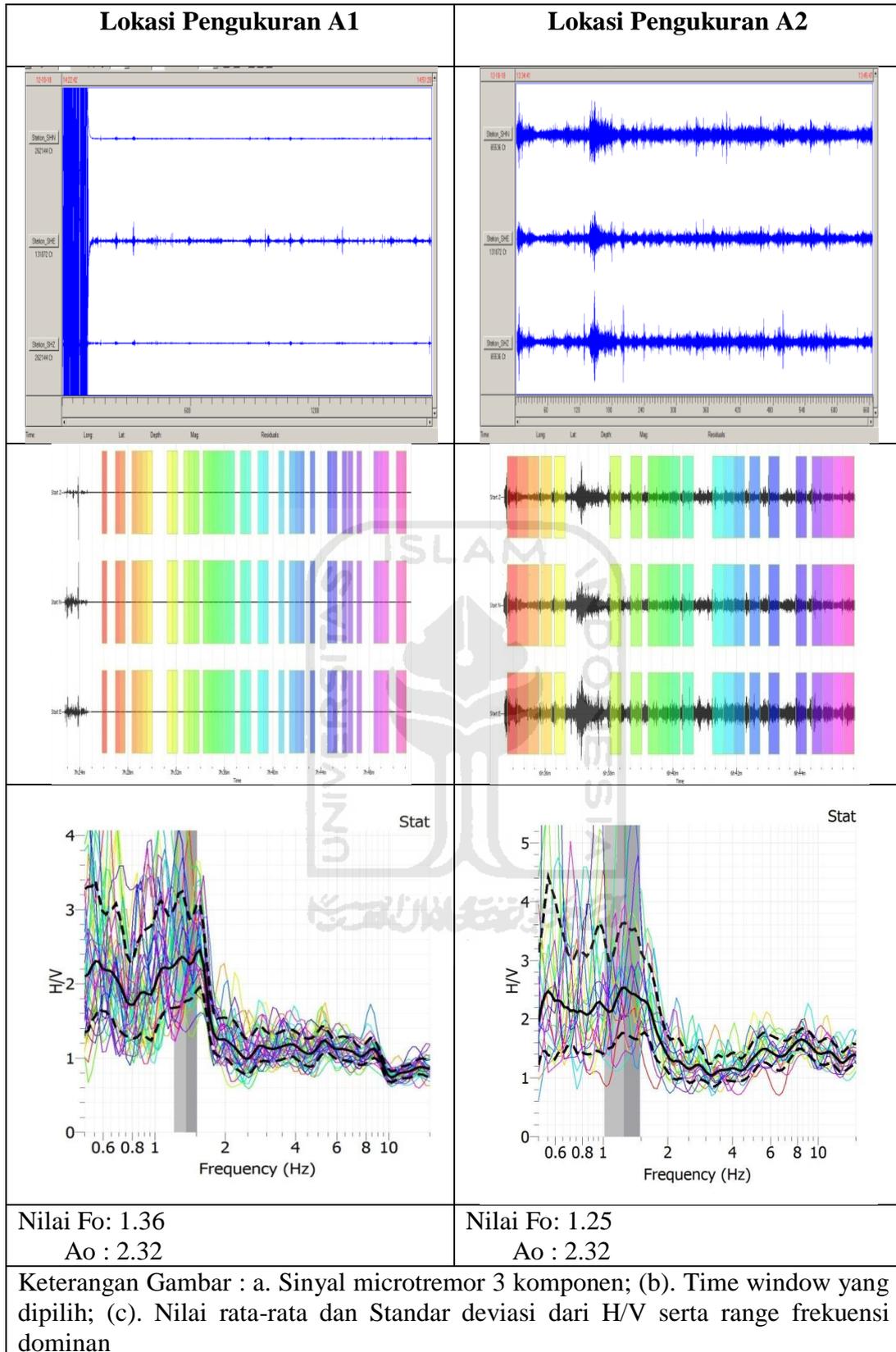
- Hatmoko, J.T., Suryadharma, H, 2013, Prediksi Pencairan Tanah Akibat Gempa di Daerah Istimewa Yogyakarta, Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS 7) Universitas Sebelas Maret (UNS) – Surakarta, 24-26 Oktober 2013
- Hatmoko, J.T., Lulie, Y, 2008, Evaluasi Potensi Pencairan Tanah (*liquefaction*) akibat gempa, Studi Kasus : di bagian Timur Kota Yogyakarta, Konferensi teknik Sipil -2 (KoNTekS-2) Universitas Atmajaya Yogyakarta
- Herak, M., 2008, *Model HVSR-A Matlab tool to Model Horizontal to Vertical Spectral Ratio of Ambient Noise*, *Computer&Geoscience* 34 (2008) 1514-1526
- Huang, H. and Tseng, Y. 2002 . *Characteristics of Soil Liquefaction Using H/V of Microtremors in Yuan-Lin Area, Taiwan*, TAO, Vol. 13, No. 3, 325-338, September 2002
- 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
- Irjan dan Bukhori, A., 2010, Pemetaan Wilayah Rawan Bencana Berdasarkan Data Mikroseismik Menggunakan TDS (*Time Digital Sesimograf*) Type 303 Study Kasus : Kampus I UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. *Jurnal Neutrino* Vol.3 No2, April 2011
- Iwan, W.D. 1967, *On a class of models for the yielding behaviour of continuous and composite systems*, ASME, *Journal of Applied Mechanics*, 34, pp.612-617
- James W. Cooley and John W. Tukey, 1965, *An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series*, *Math. Comp.* 19 (1965), 297-301
- Kanai, K., 1951, *Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions I*, *Bull. Earthquake Research Institute, Tokyo University.* 30, 31–37
- Kertapati, E., Marjiyono, 2007, *Correlation of Site Condition-Building Damages-and Ground Rupture of the 27 May 2006 Yogyakarta Earthquake- Centre Java and Microzonation of The Area Damage*, Seminar dan Pameran

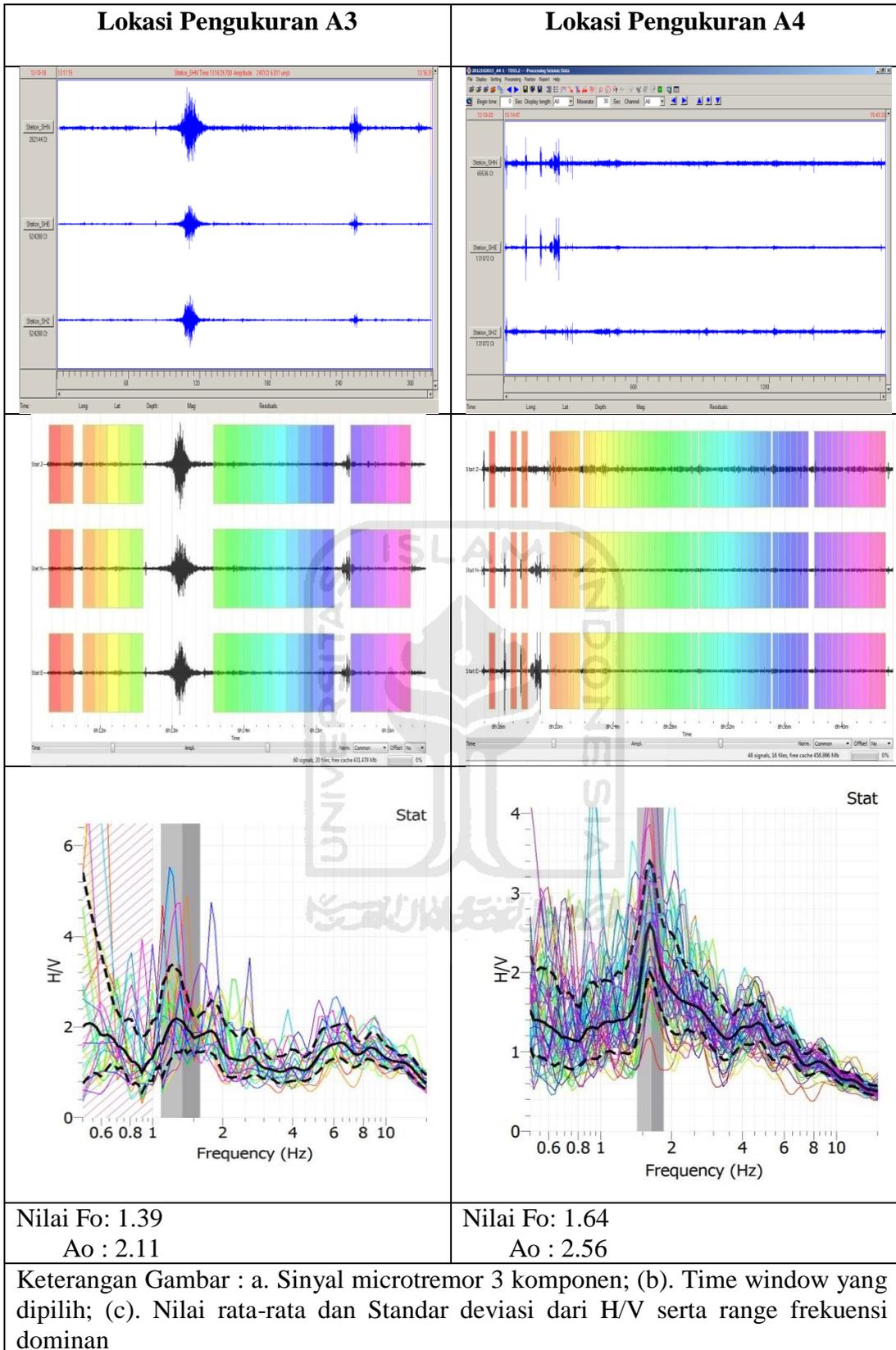
HAKI 2007 - "KONSTRUKSI TAHAN GEMPA DI INDONESIA" using microtremor

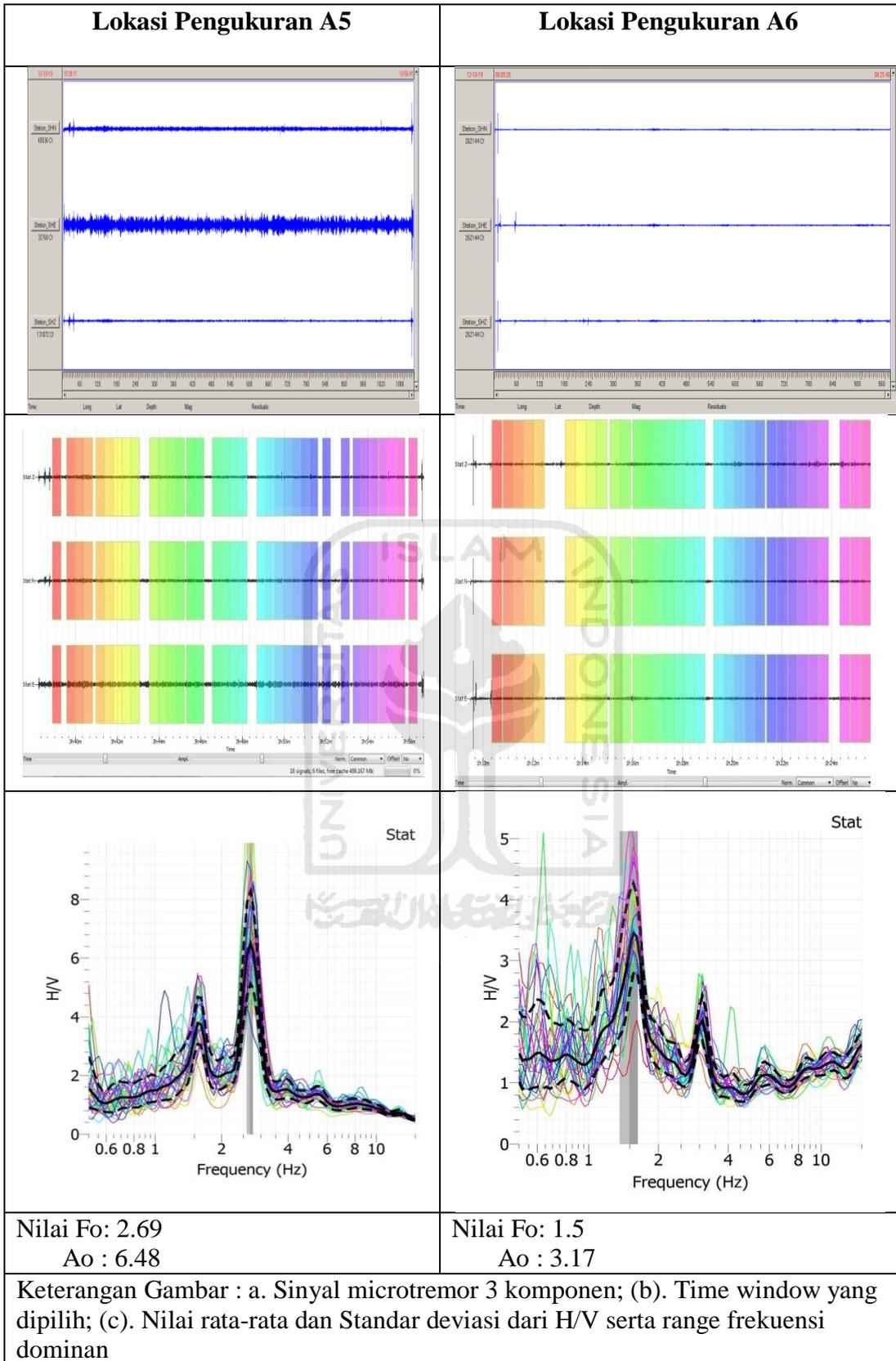
- Kyaw, Z L., Pramumijoyo, S., Husein, S., Fathani, TF., Kiyono J, 2013, *Ground Motion In Yogyakarta City, Yogyakarta Special Province, Indonesia, On Densely Microtremor Observations and Shear Wave Velocity* J.SE Asian Appl. Geol., Jan-Jun 2013, Vol 5(1) pp. 10-20
- Litbang BMKG, 2010, *Kajian Kerawanan Bahaya Gempabumi di Kabupaten Bantul DIY*, Laporan Hasil Penelitian, Litbang BMKG 2010
- Lysmer J., Schnabel P.B., Seed H.B. 1972, *SHAKE-A Computer program for equation respon analysis of horizontal layered sites*, Rep. No. EERC 72-12, University of California, Berkeley
- Mahajan, A.K., Mundepi, A.K., Neetu Chauhan, A.S., Jasrotia, Nitesh Rai and Tapas Kumar Gachhayat, 2012, *Active seismic and passive microtremor HVSR for assessing site effects in Jammu City, NW Himalaya India-A Case Study*, Journal of Applied Geophysics, 77, 51-62
- Mroz Z. 1967, *On the description of anisotropic work hardening*, Journal of Mechanics and Physics of Solids, 15, pp. 163-175
- Nakamura, Y, 1989, *A method for dynamic characteristic estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, Q.R of R.T.I 30-1 p.25-33
- Nakamura, Y, 2007, *Development of Vulnerability assessment for ground and structures using microtremor*, System and Data Research Co., Ltd.
- Nakamura, 2008, *On The H/V Spectrum*, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China
- Okada H. 2003, *The Microseismic Survey Method: Society of Exploration Geophysicists of Japan*, Translated by Koya Suto, Geophysical Monograph Series No. 12, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa
- Parwatiningsih, D., 2008, *Perbandingan Karakteristik Lapisan Bawah Permukaan Berdasarkan Analisis Gelombang Mikrotremor dan data Bor*, Jurnal Ilmiah Faktor Exacta Vol.1 No.3 Januari 2008

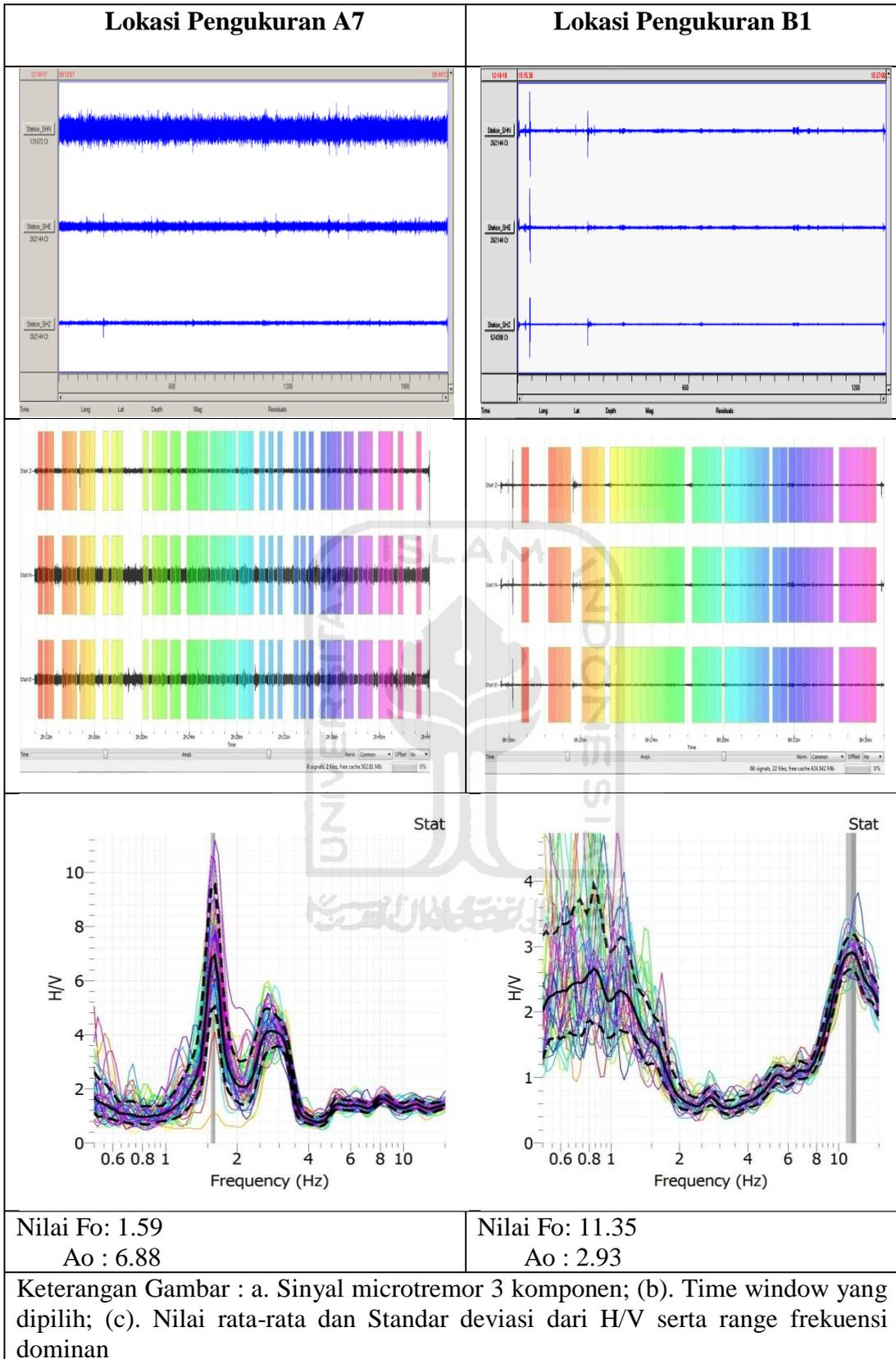
- Parajuli, H.R., Kiyono, J., Tatsumi, M., Suzuki, Y., Umemura, H., Taniguchi, H., Toky, K., Furukawa, A., Maskey, P.N, 2011, *Dynamic Characteristic Investigation of a Historical Masonry Building and Surrounding Ground in Kathmandu*, Journal of Disaster Research Vol.6 No.1
- Saita, J., Bautista, M.L.P. and Nakamura, Y. 2004, *On Relationship Between The Estimated Strong Motion Characteristic of Surface Layer and The earthquake damage - Case Study At Intramous, Metro Manila*, 13 World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004 Paper No. 905
- Sato, T., Nakamura, Y., and Saita, J. 2004. Evaluation of The Amplification Characteristics of Subsurface Using Microtremor and Strong Motion : The Studies at Mexico City, 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 862, Vancouver, B.C., Canada
- Scanabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B., 1972, SHAKE-A Computer program for equation response analysis of horiontally layered sites, rep. No.EERC 73-12, Univsity of California, Berkeley
- Setiyawan, JB., 2009. Mikrozonasi seismisitas daerah Yogyakarta dan sekitarnya 2009, Tesis program magister Geodesi dan Geomatika ITB
- Triwulan, W., Utama, D., Warnana, D., and Sungkono, 2010, *Vulnerability index estimation for building and ground using microtremor*, The second International Seminar on applied Technology, Science and Arts
- Tuladhar, R., Yamazaki, F., Warnitchai, P., Saita, J., 2004, *Seismic Microzonation of The Greater Bangkok Area Using Microtremor Observations*, Earthquake Engng Struct. Dyn. 2004; 33:211–225 (DOI: 10.1002/eqe.345)
- Widodo, 2012, Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan, Pustaka Pelajar Yogyakarta
- Zaharia, B., Radulian, M., Popa, M., Grecu, B., Bala, A. and Tataru, D.2008, *Estimation of the local response using the Nakamura methode for the Bucharest area*, Romanian Report in Physics, Vol. 60, No.I, P. 131-144 .

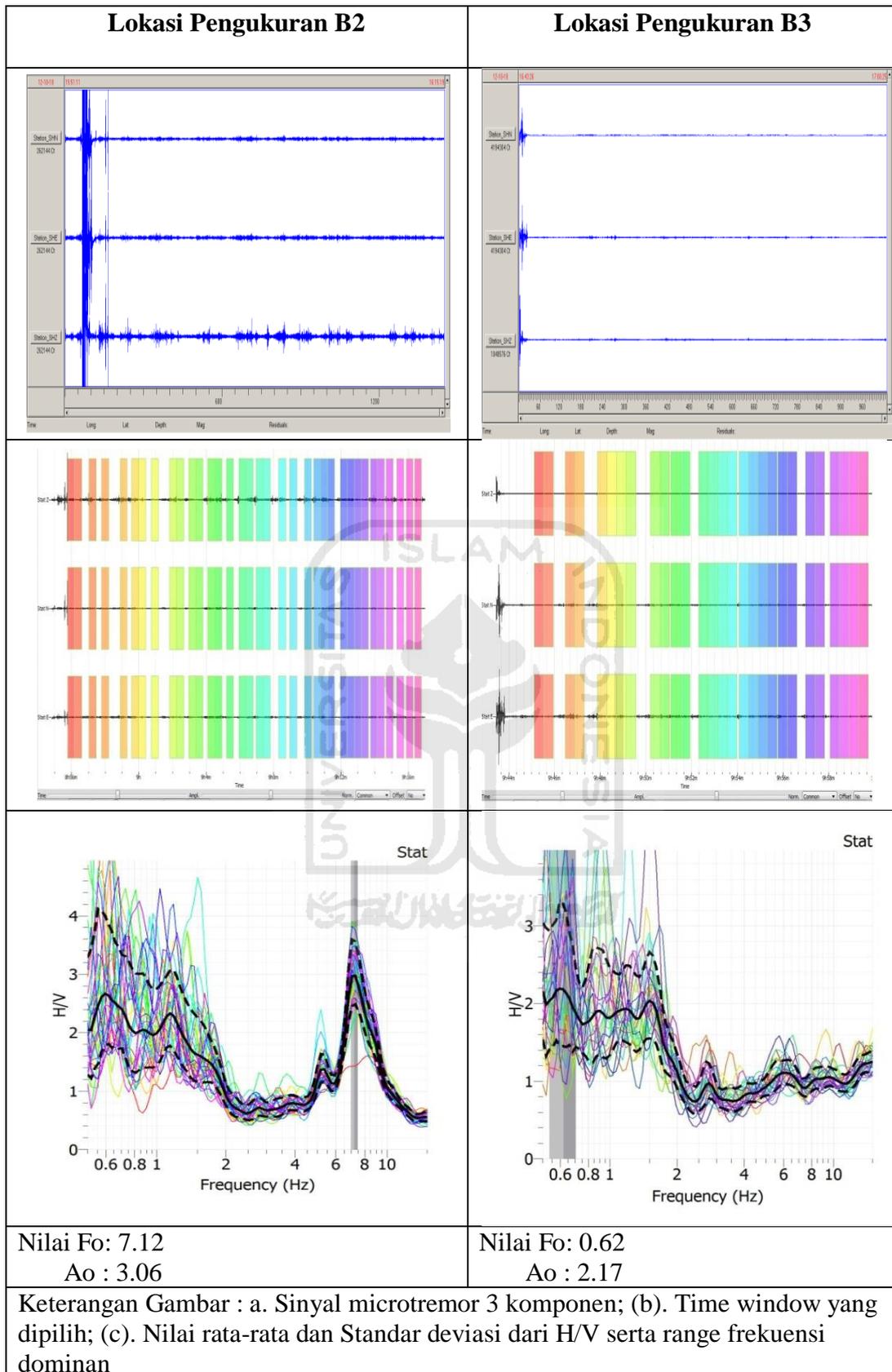
## Lampiran 1. DATA PENGUKURAN LAPANGAN

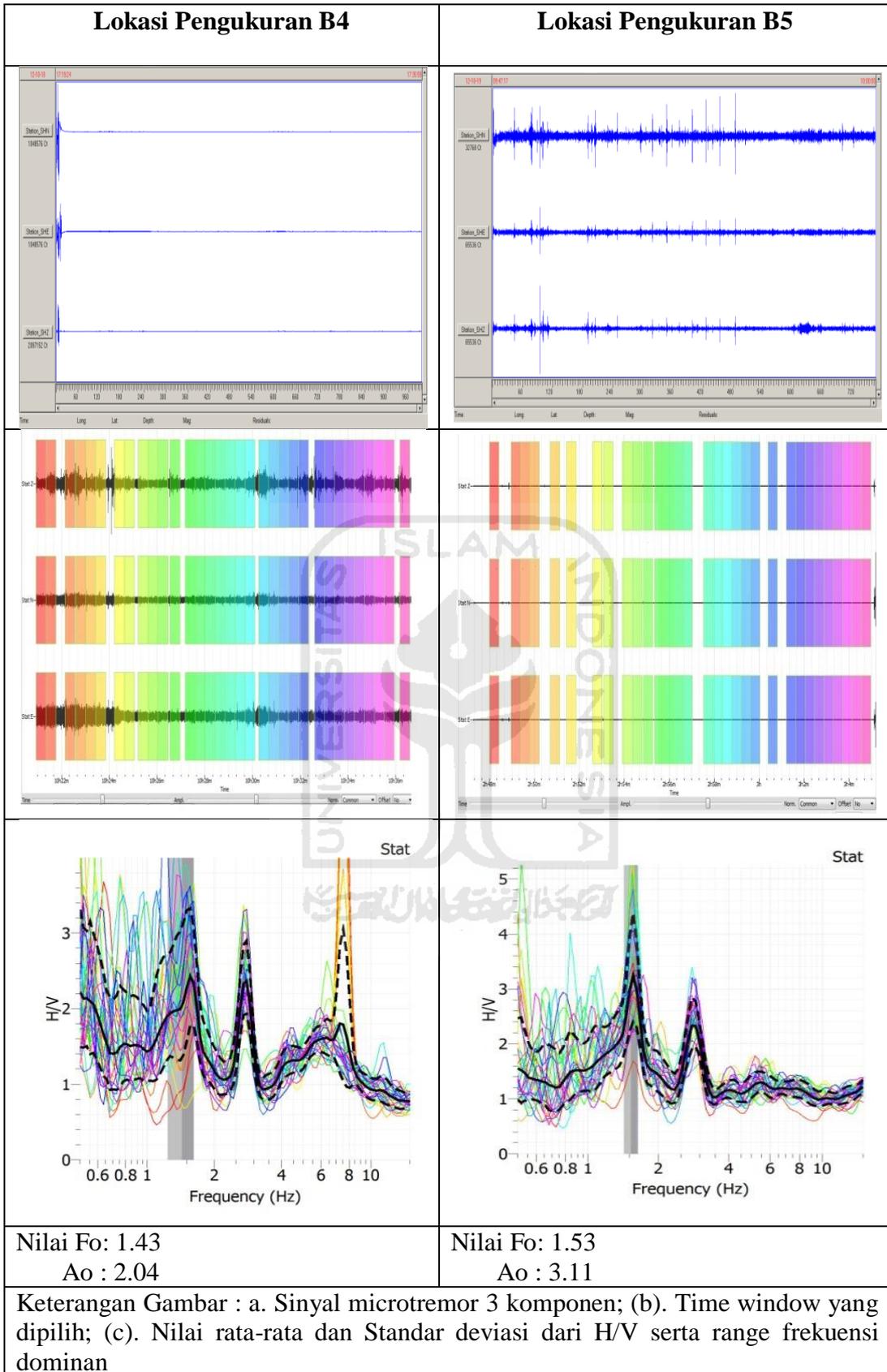


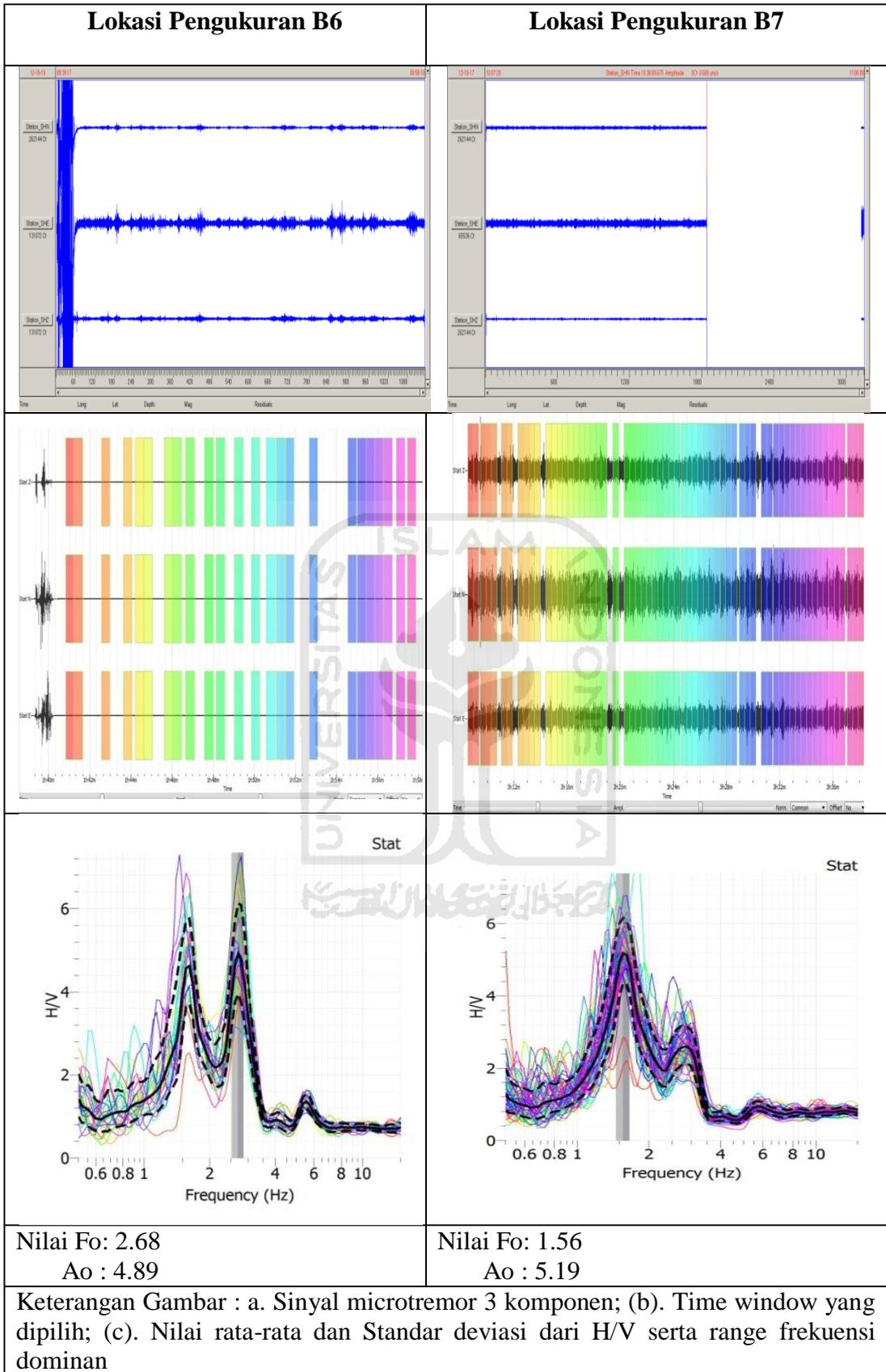


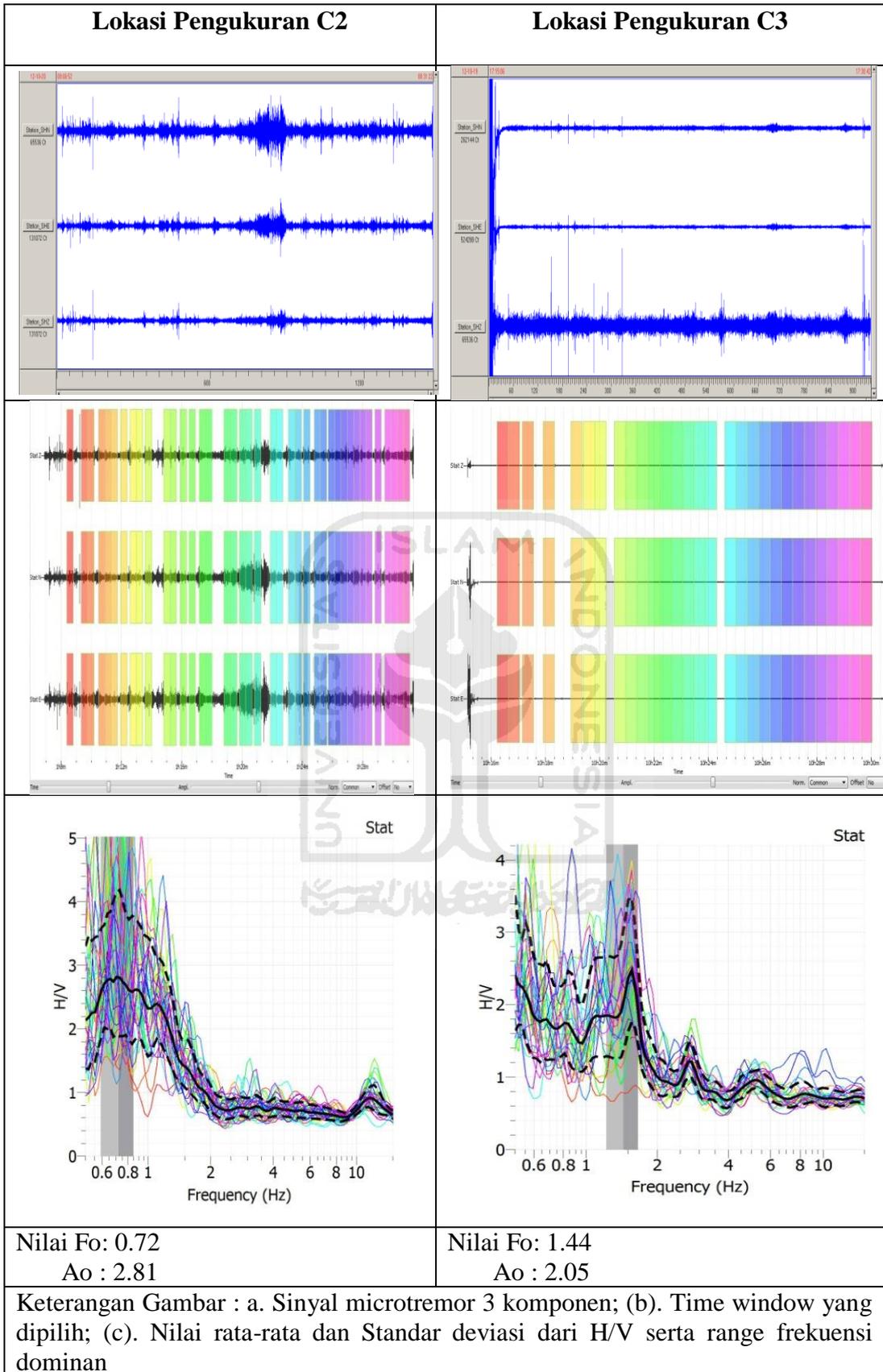


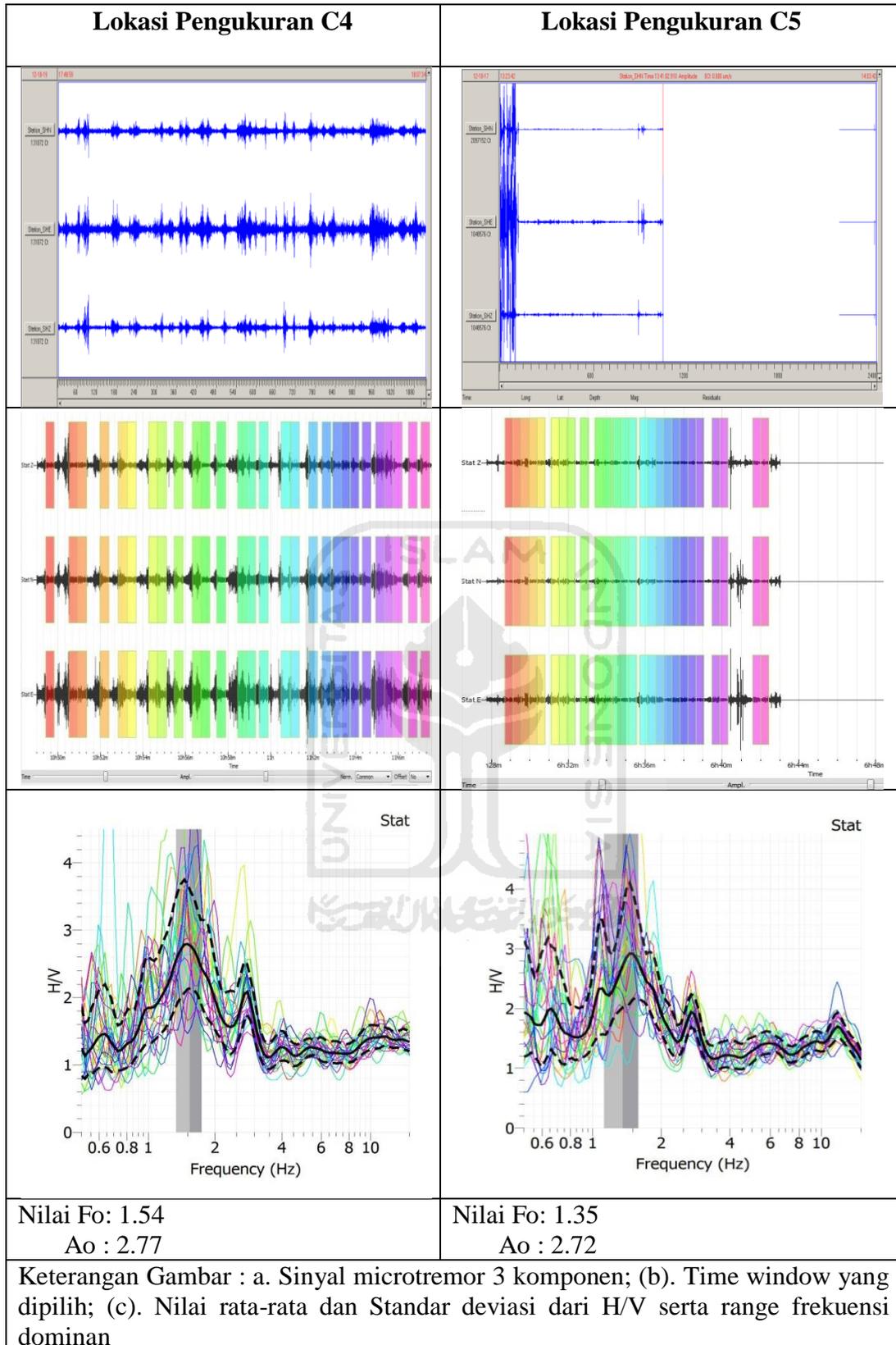


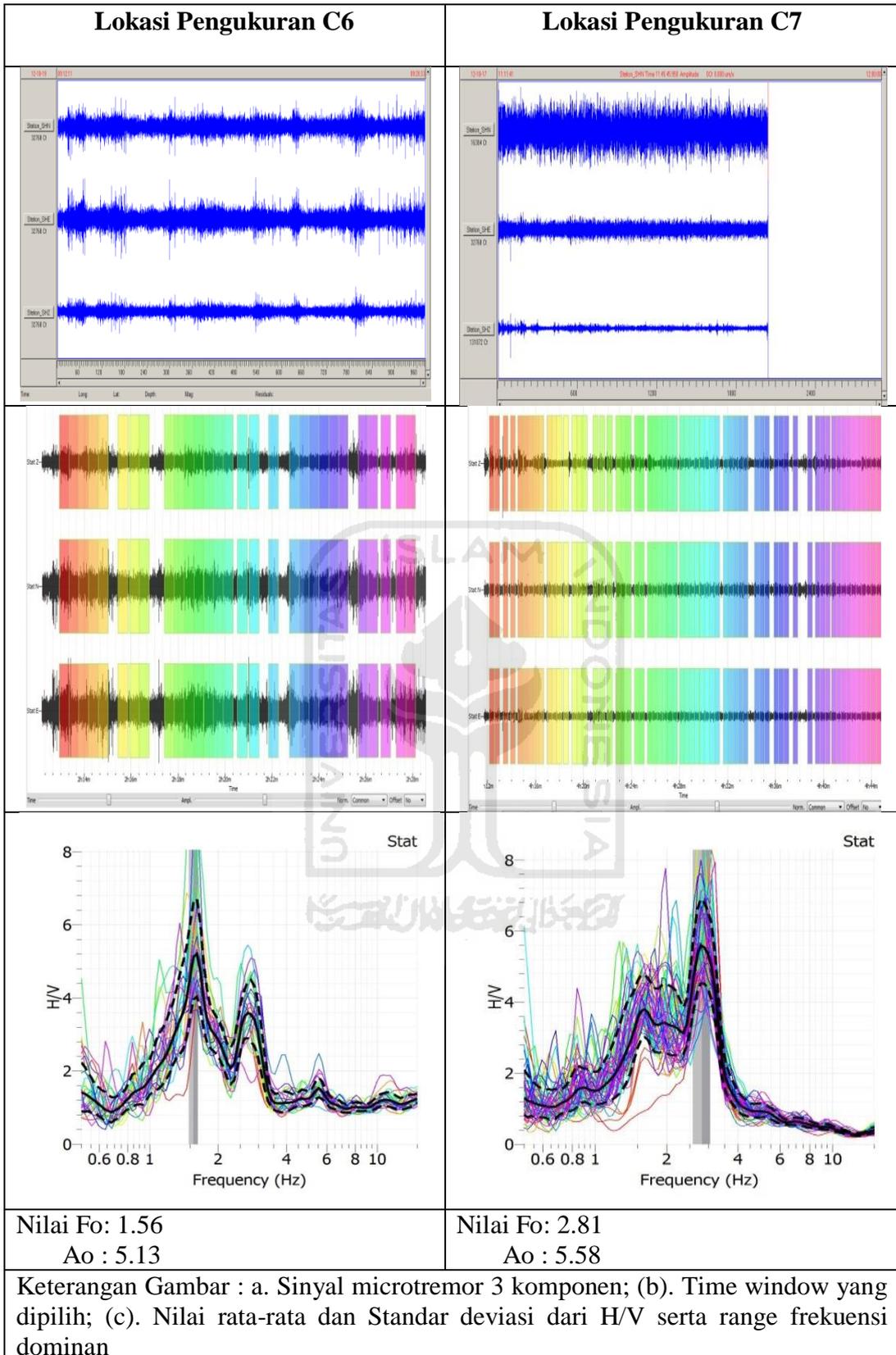


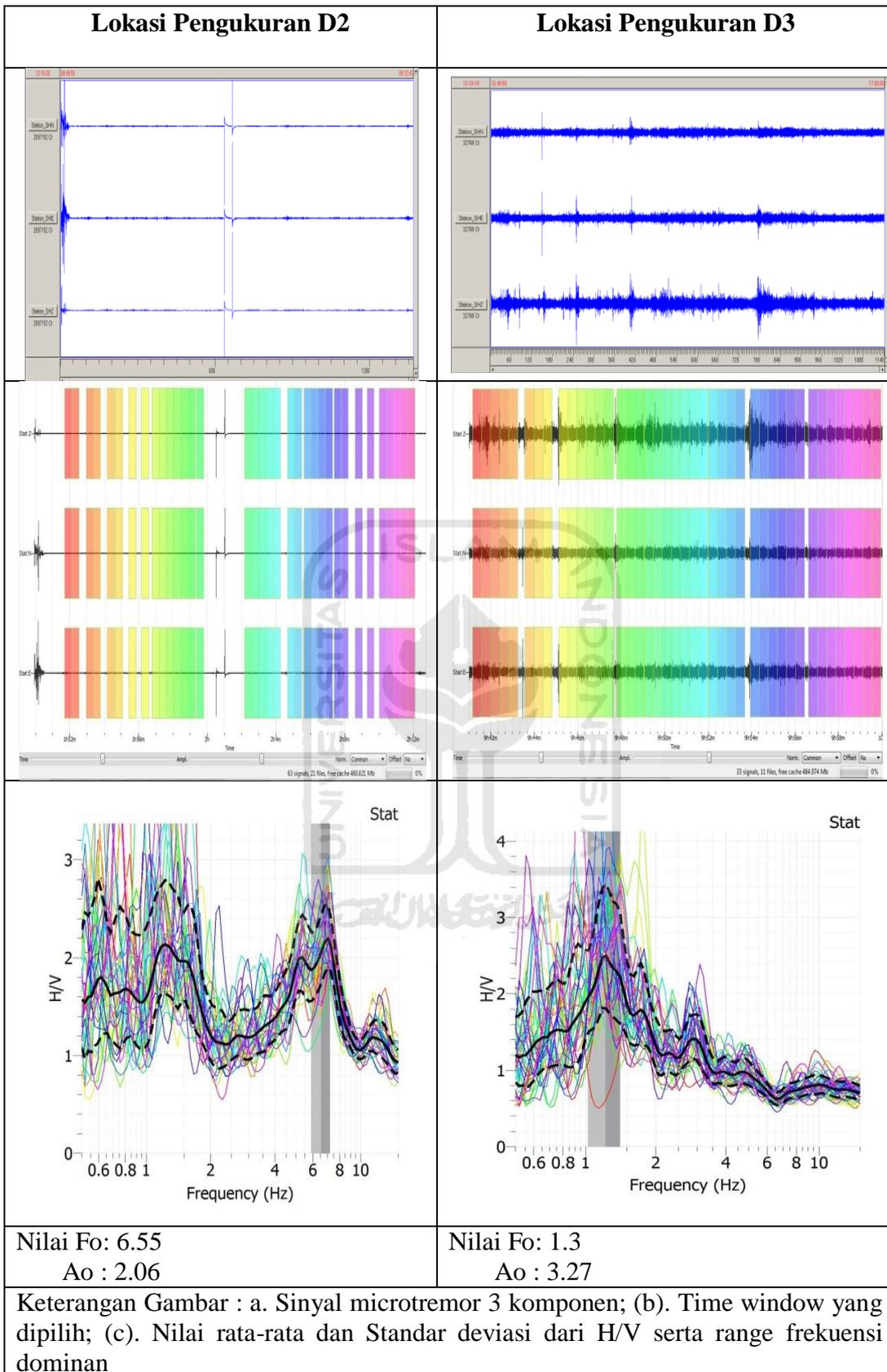


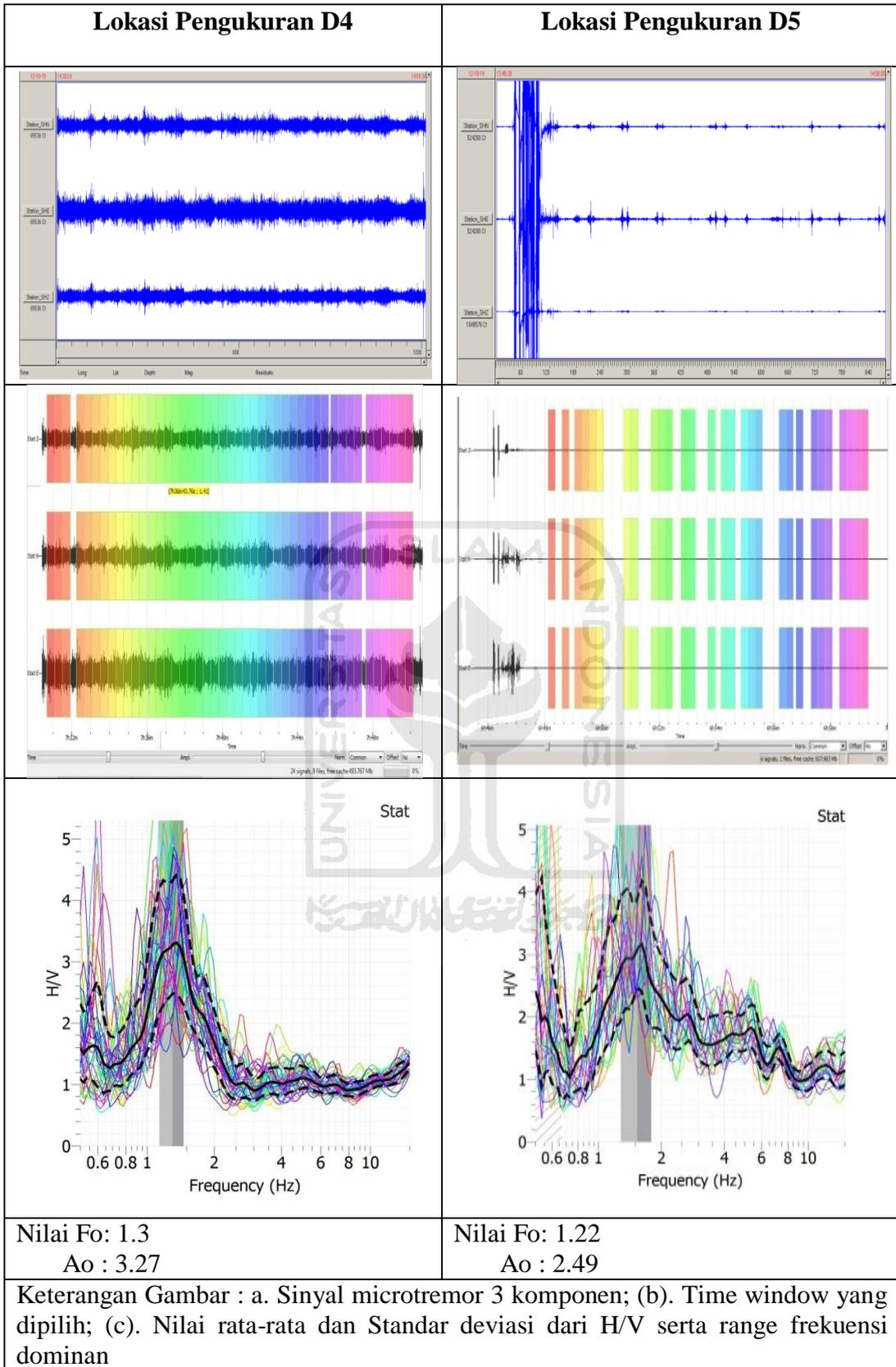


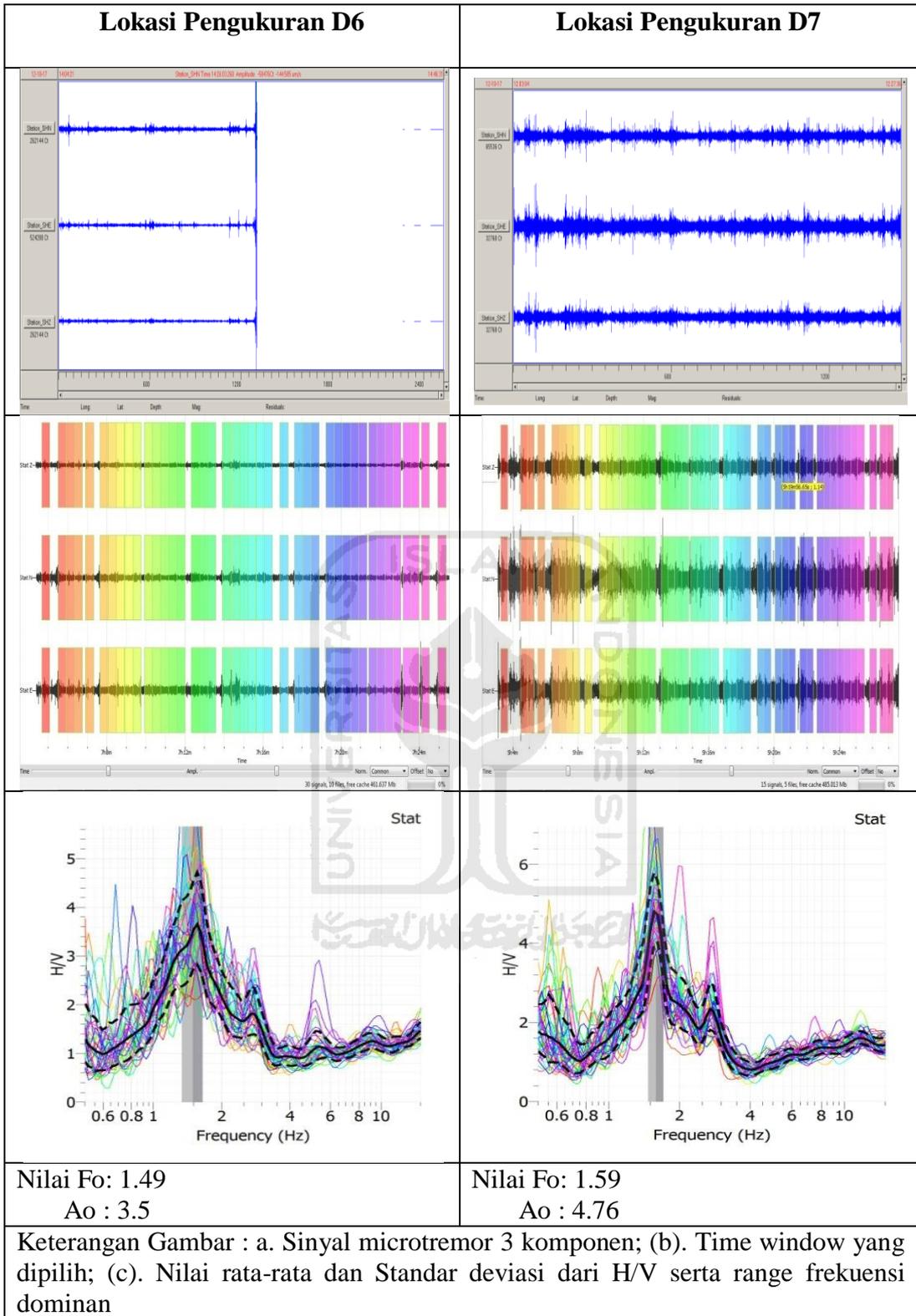


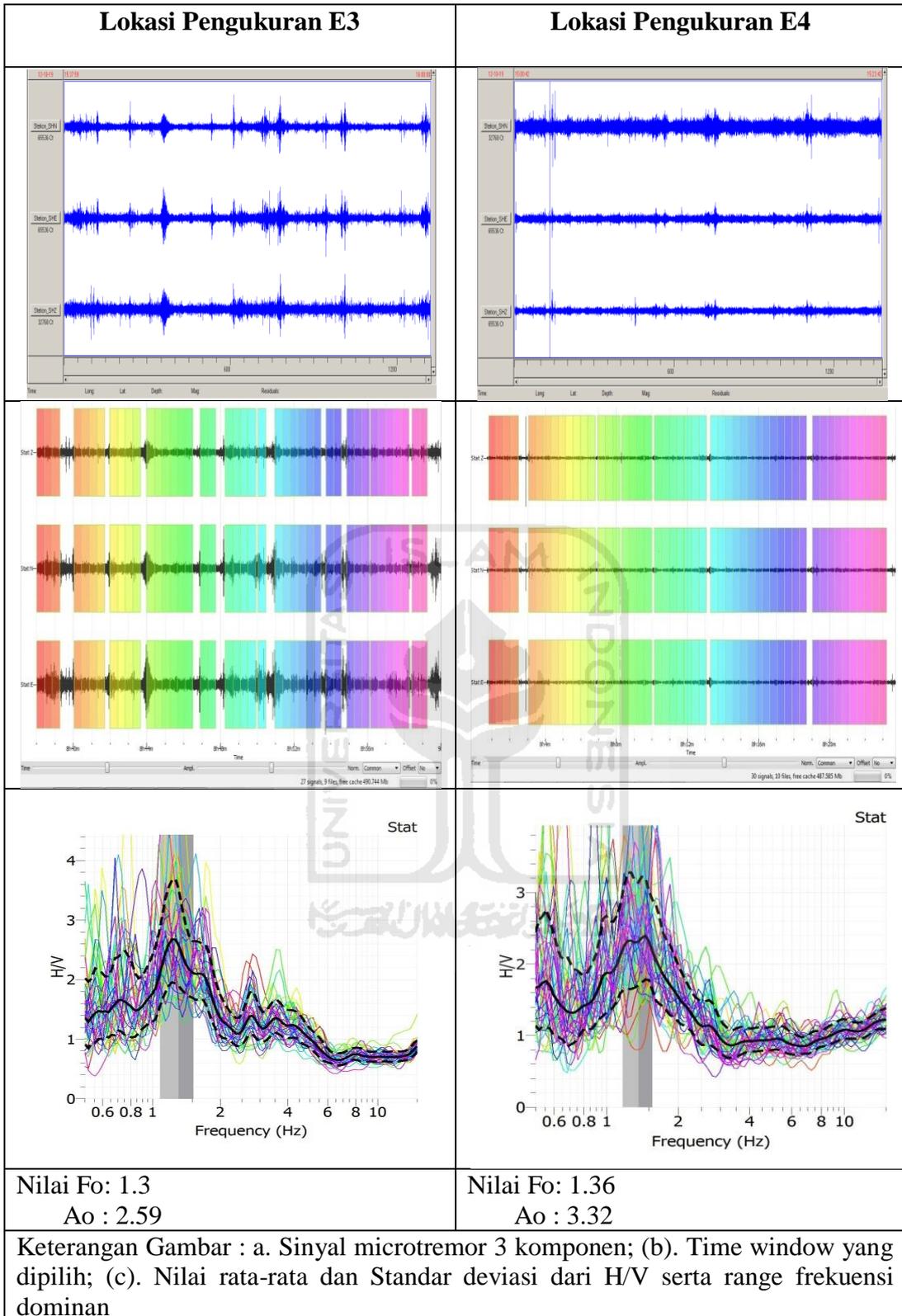


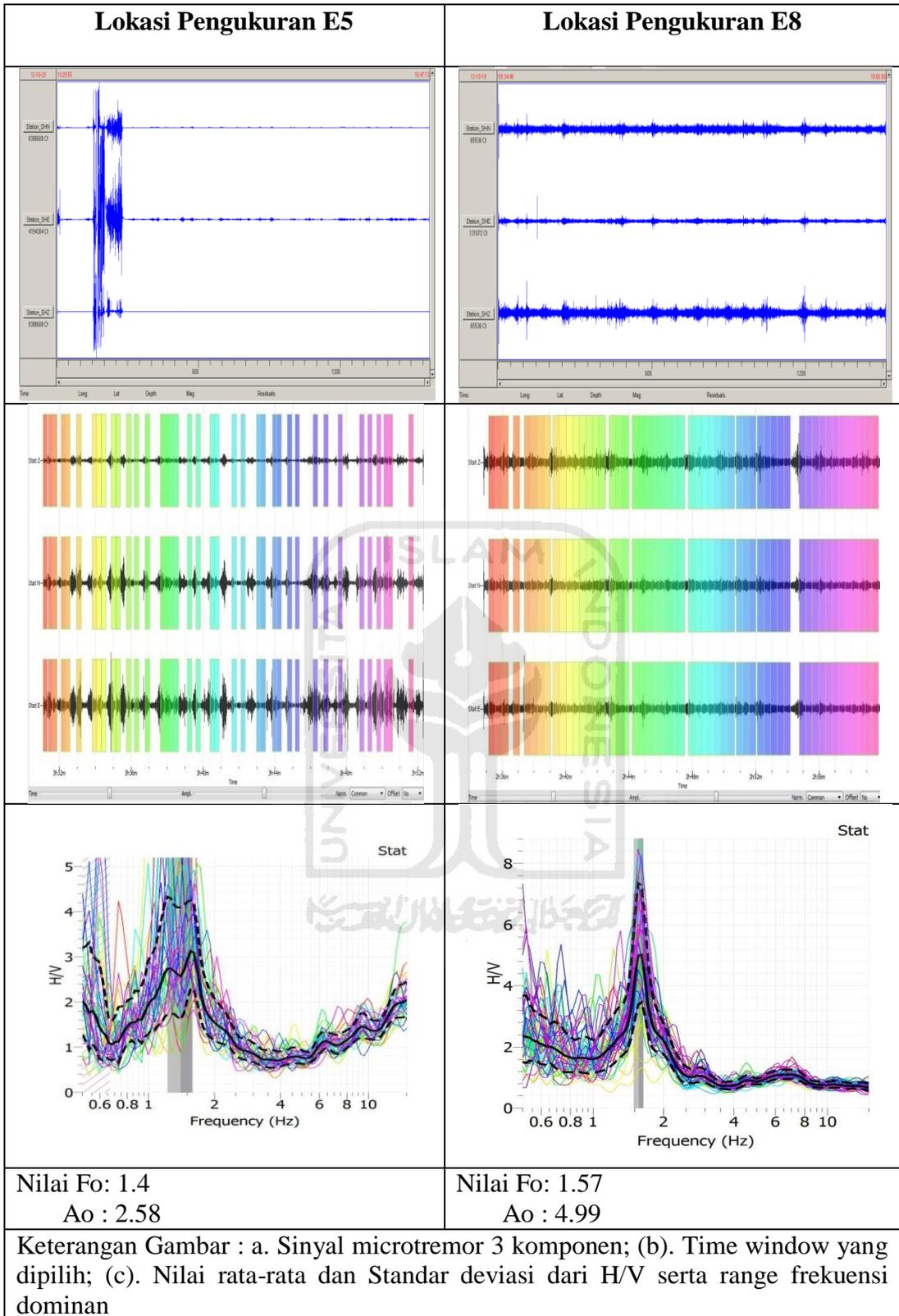


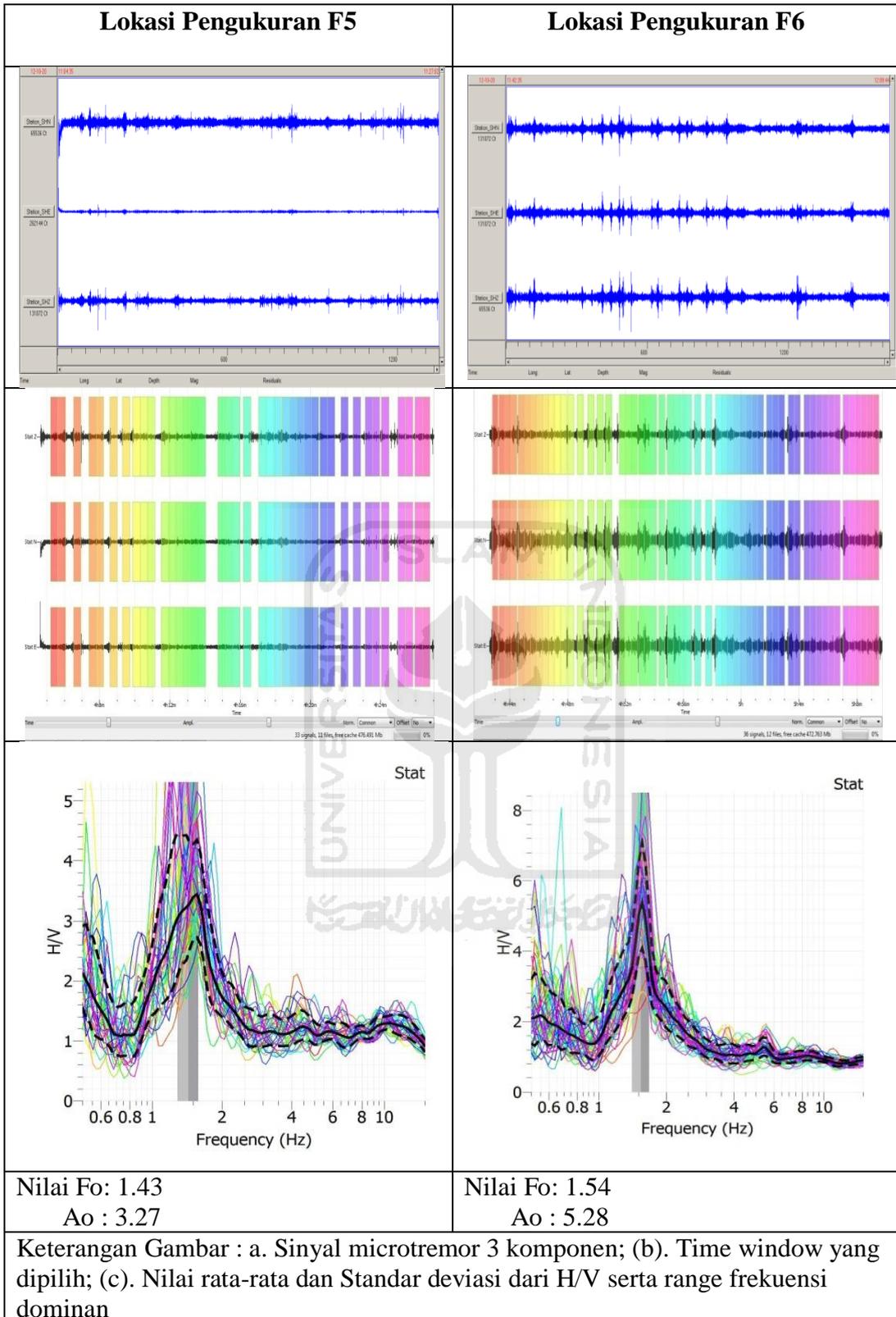


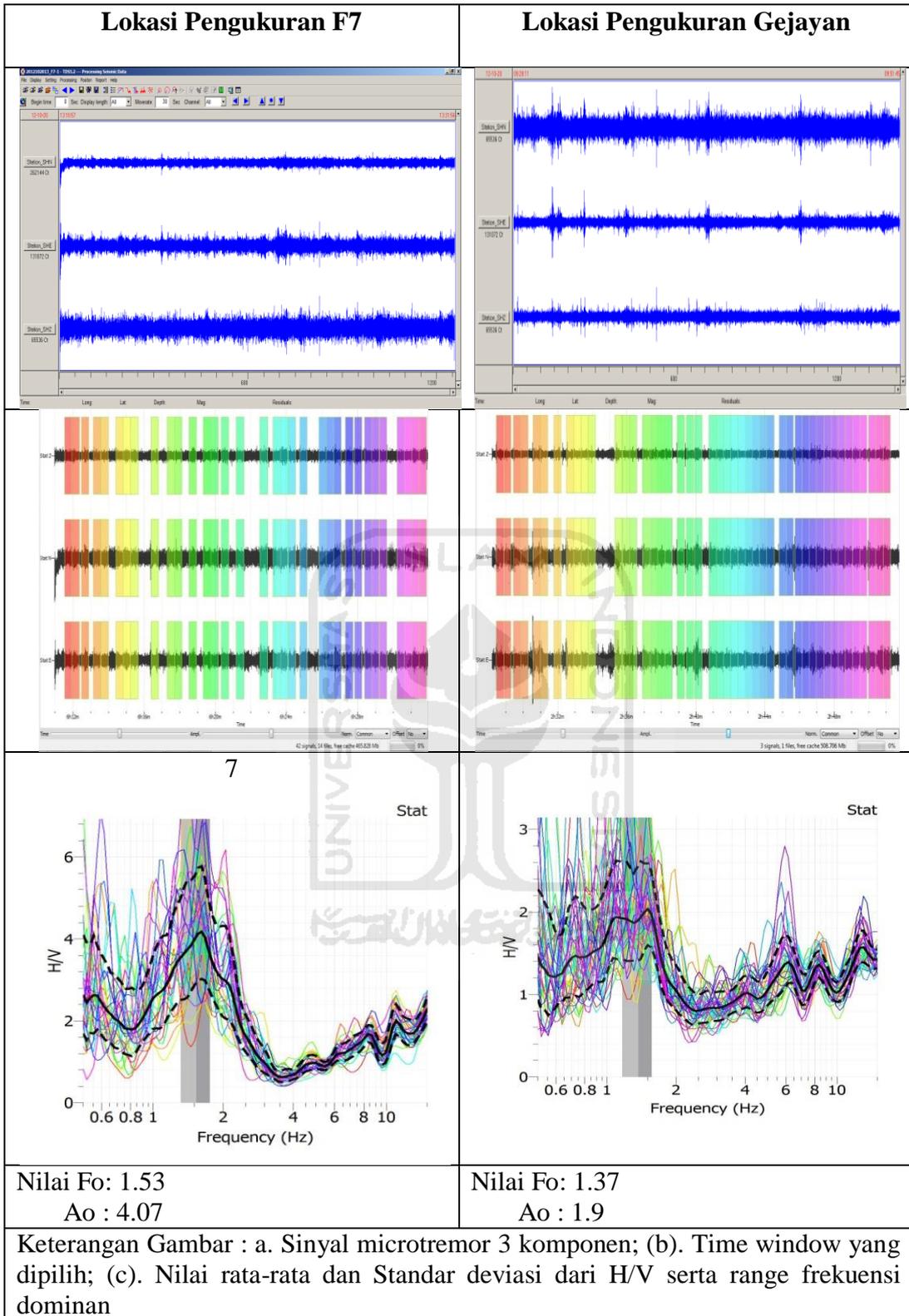


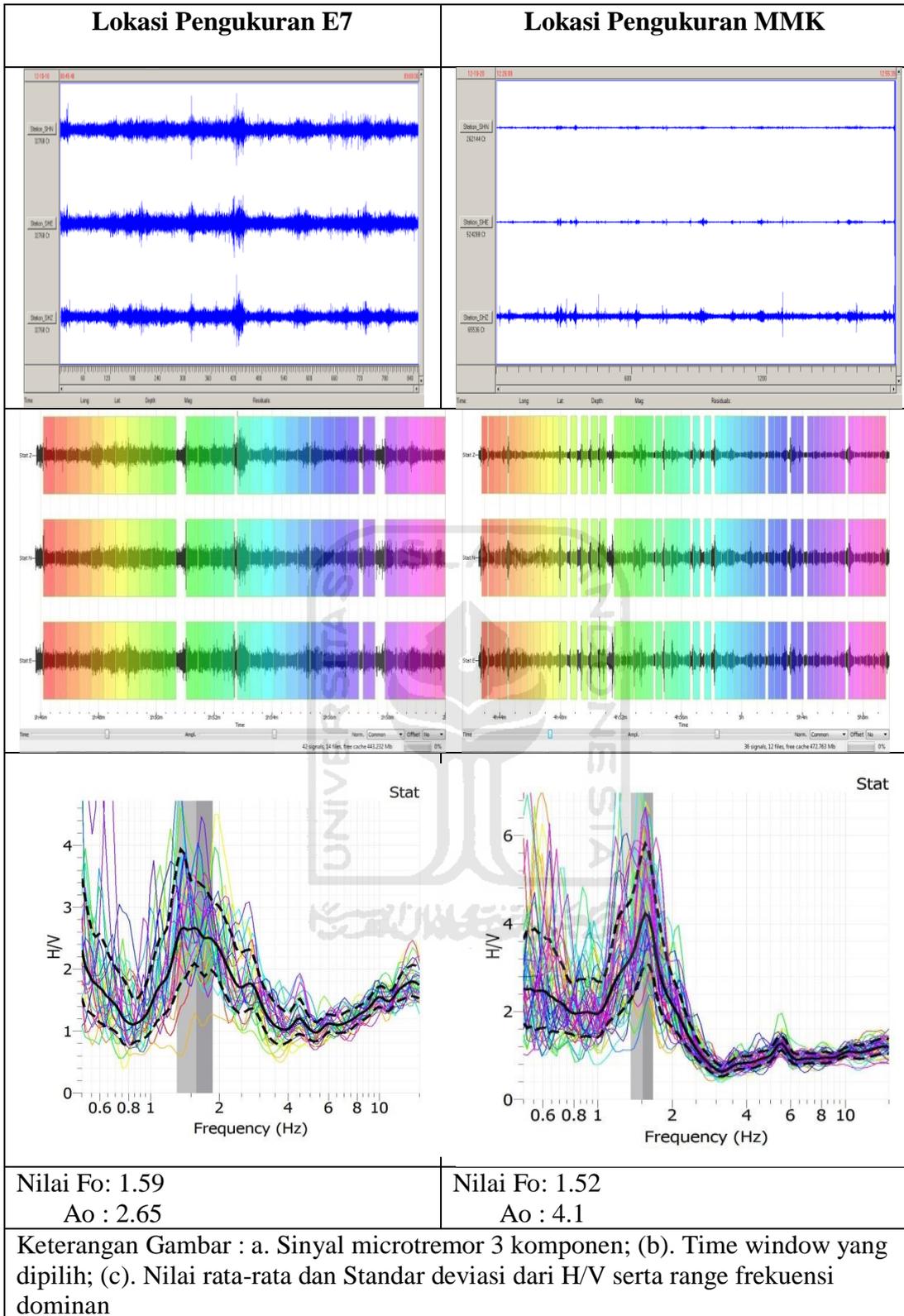


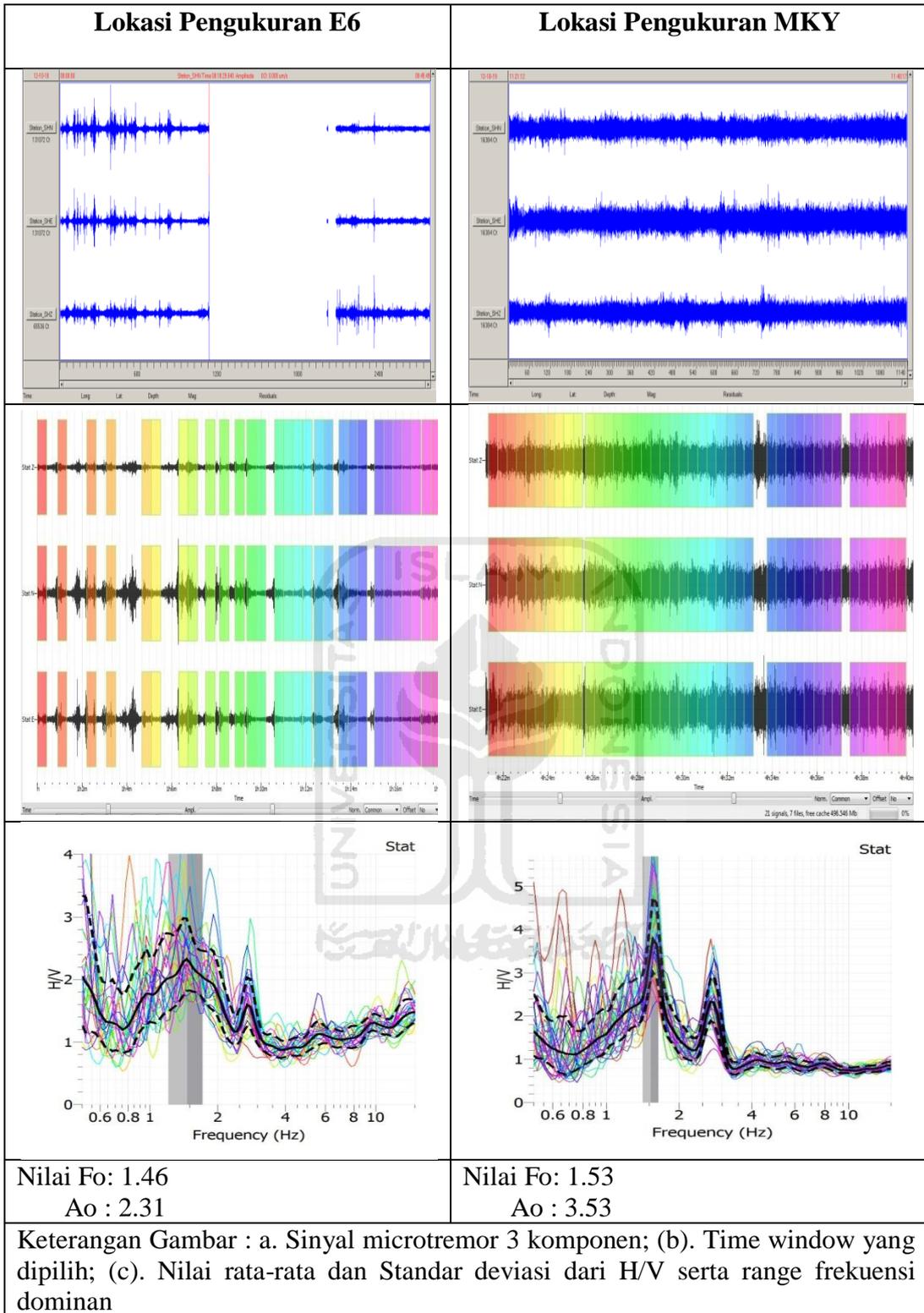




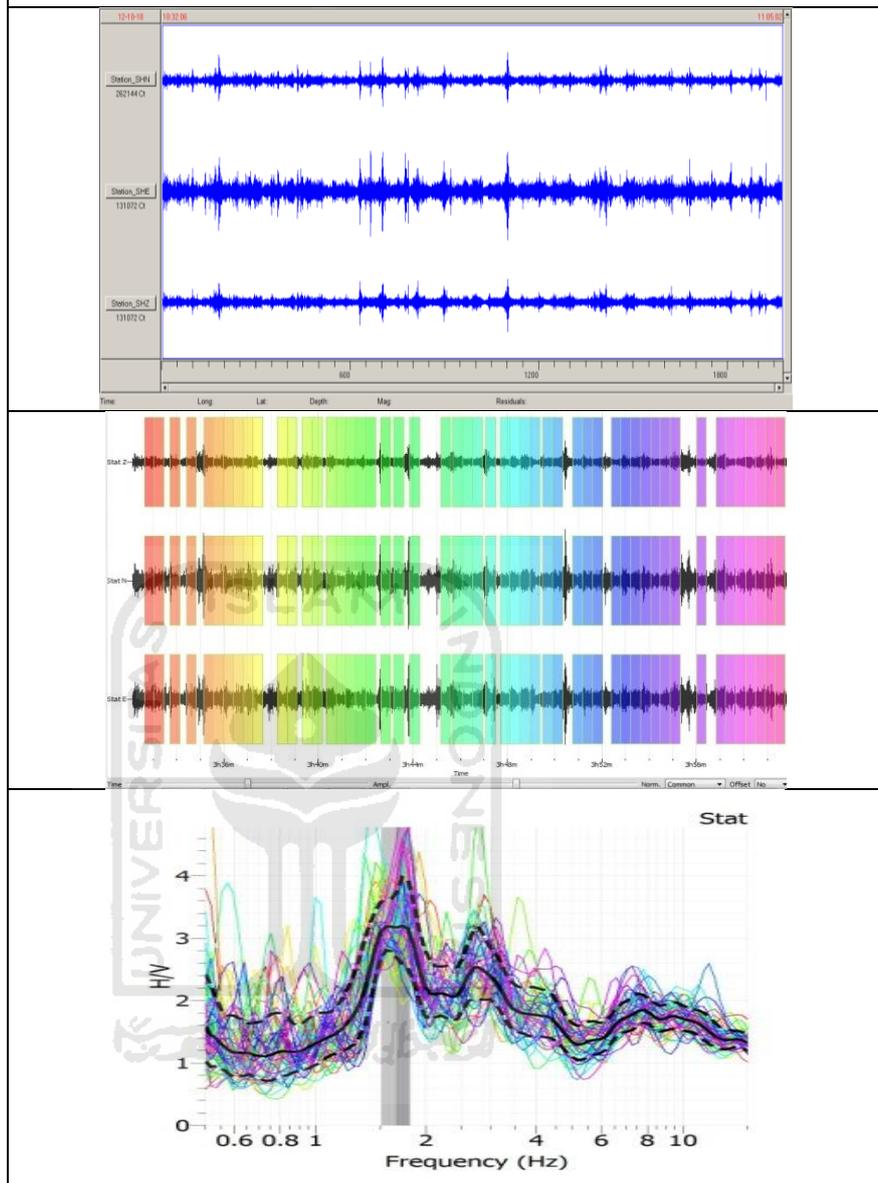








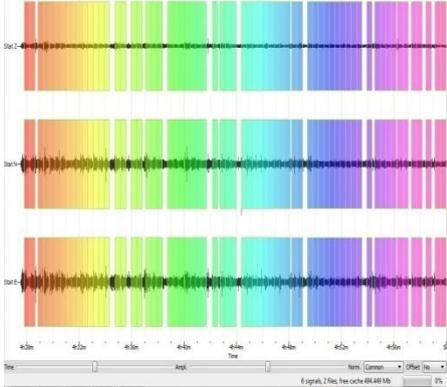
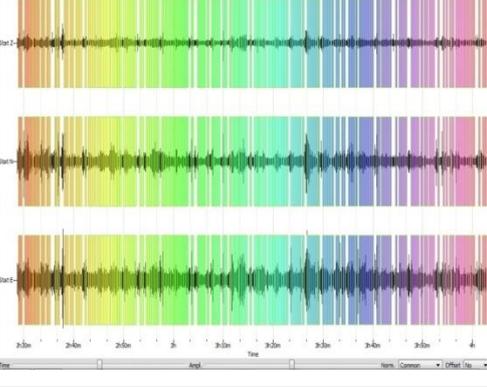
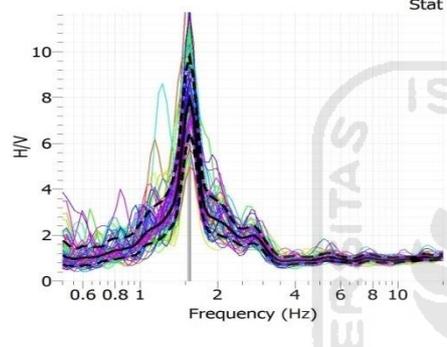
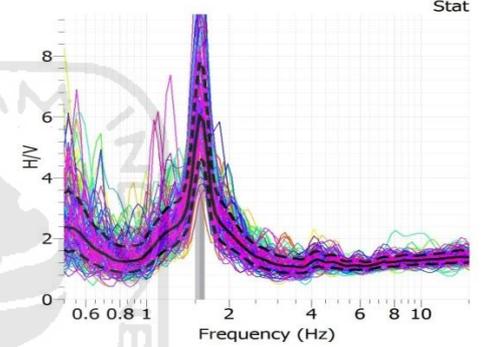
## Lokasi Pengukuran O5



Nilai  $F_0$ : 1.66

$A_0$  : 3.17

Keterangan Gambar : a. Sinyal microtremor 3 komponen; (b). Time window yang dipilih; (c). Nilai rata-rata dan Standar deviasi dari H/V serta range frekuensi dominan

|  |   |
|--|---|
| Lokasi Pengukuran : Lapangan<br>Browijoyo Sorosutan  | <b>Lokasi Pengukuran Lap. Karang</b>  |
| Sinyal asli trec   | Sinyal asli trec  |
|   |   |
|    |  |
| Nilai Fo:<br>Ao :  | Nilai Fo:<br>Ao :   |
| Keterangan Gambar : a. Sinyal microtremor 3 komponen; (b). Time window yang dipilih; (c). Nilai rata-rata dan Standar deviasi dari H/V serta range frekuensi dominan |   |

## Lampiran 2

### DATA PENGUKURAN MIKROTREMOR

| No | Code | Lokasi  | Lat       | Long       | Ao   | Fo   | Kg    |
|----|------|---|-----------|------------|------|------|-------|
| 1  | A1   | Perum Jambon Permai   | 428770.41 | 9140912.24 | 2.32 | 1.36 | 3.96  |
| 2  | A2   | Jl.Kya Mojo (politeknik Depkes) Pingit                      | 428528.47 | 9140008.80 | 2.53 | 1.25 | 5.12  |
| 3  | A3   | Per4an selatan perpustakaan ke selatan-Belakang SD Kanisius | 428485.95 | 9139098.66 | 2.11 | 1.39 | 3.20  |
| 4  | A4   | Selatan Lap. Parkir Ngabean                                 | 428947.67 | 9137113.02 | 2.56 | 1.64 | 4.00  |
| 5  | A5   | Jl. Wakhid Hasyim-Sup Buah 91 ke barat/masjid patangpuluhan | 429333.61 | 9136681.88 | 6.48 | 2.69 | 15.61 |
| 6  | A6   | Gereja JL Bantul  | 429075.08 | 9135989.92 | 3.17 | 1.50 | 6.70  |
| 7  | B2   | Selatan SMK N 1 Yk-Belakang SMP N 6 Yk                      | 430103.36 | 9140102.00 | 3.06 | 7.20 | 1.30  |
| 8  | B3   | Jl. Mangkubumi-Indomaret kebarat- Depan SMK N 7 Yk          | 429941.45 | 9139194.29 | 2.17 | 0.62 | 7.60  |
| 9  | B4   | Kantor Kepatihan  | 430203.04 | 9138238.91 | 2.04 | 1.43 | 2.91  |
| 10 | B5   | Jl. Panembahan timur Kraton Yk                              | 429994.74 | 9136993.91 | 3.11 | 1.53 | 6.32  |
| 11 | B6   | Ngadinengaran timur Swalayan Maga Yk                        | 429864.37 | 9135831.21 | 4.89 | 2.68 | 8.92  |
| 12 | B7   | Barat STIE Kerjasama  | 430061.33 | 9134753.94 | 5.19 | 1.56 | 17.27 |
| 13 | C2   | Samping kantor kelurahan Terban- Utara UII cik di tiro      | 431072.96 | 9140041.00 | 2.81 | 0.72 | 10.97 |
| 14 | C3   | Balai Pamungkas Kotabaru                                    | 431149.73 | 9139075.22 | 2.05 | 1.44 | 2.92  |
| 15 | C4   | Hal SD Islamiah Pakualaman                                  | 431101.09 | 9137922.40 | 2.77 | 1.54 | 4.98  |
| 16 | C5   | Jl.S Parman kanan-deket jembatan Code Wiragunan             | 431056.49 | 9137055.75 | 2.72 | 1.35 | 5.48  |
| 17 | C6   | Halaman Musium Perjuangan Yk                                | 430742.66 | 9135882.64 | 5.13 | 1.56 | 16.87 |
| 18 | C7   | Barat SD pabel Wirasaban                                    | 431173.26 | 9135220.49 | 5.58 | 2.81 | 11.08 |
| 19 | D2   | TK internasional Samirano                                   | 432261.17 | 9140174.49 | 2.06 | 6.55 | 0.65  |
| 20 | D4   | Depan SMP M 2 Yogya   | 432331.91 | 9137947.61 | 3.27 | 1.30 | 8.23  |
| 21 | D3   | Depan Balai Yasa PJKA                                       | 431946.00 | 9138444.00 | 2.49 | 1.22 | 5.08  |
| 22 | D6   | Belakang Hotel Restu Batikan                                | 431950.47 | 9136023.73 | 3.50 | 1.49 | 8.22  |
| 23 | D7   | Belakang JNE Sorogenen offset selatan SMTK Yogya            | 432281.83 | 9135112.86 | 4.76 | 1.59 | 14.25 |
| 24 | E3   | Timur salon shinta Timoho                                   | 432903.23 | 9138754.76 | 2.59 | 1.30 | 5.16  |
| 25 | E4   | Selatan Sparta-Utara Timoho Town Square                     | 432956.11 | 9137981.86 | 3.32 | 1.36 | 8.10  |
| 26 | E5   | sektariat keluarga Bengkulu                                 | 433116.11 | 9137128.60 | 2.58 | 1.40 | 4.75  |
| 27 | E6   | Masjid Gambiran Baru-depan diknakertrans ke timur           | 432971.00 | 9135910.05 | 2.31 | 1.46 | 3.65  |
| 28 | F5   | Halte utara PLN Gedongkuning ke barat- lap Bulutangkis      | 433879.80 | 9137016.28 | 3.27 | 1.43 | 7.48  |
| 29 | F6   | Selatan Stisipol Kartika Bangsa                             | 433987.03 | 9135908.56 | 5.28 | 1.54 | 18.10 |
| 30 | F7   | Kotagede Timur Apotek Citra                                 | 434731.29 | 9134961.04 | 4.07 | 1.53 | 10.83 |
| 31 | GEJ  | Gejayan   | 432780.46 | 9140254.84 | 1.90 | 1.37 | 2.64  |
| 32 | MMK  | Makam Masjid Kotagede                                       | 433656.07 | 9134503.65 | 4.10 | 1.52 | 11.06 |
| 33 | MK   | Masjid Kauman Yogyakarta                                    | 429729.66 | 9137366.46 | 3.53 | 1.53 | 8.14  |
| 34 | E7   | Masjid Gambiran   | 432999.00 | 9134999.00 | 2.65 | 1.59 | 4.42  |
| 35 | E8   | Utara terminal bus Giwangan                                 | 433000.00 | 9134000.00 | 4.99 | 1.57 | 15.86 |
| 36 | O5   | Barat SMU M 3 Yogya/masjid patangpuluhan                    | 428000.00 | 9137000.00 | 3.17 | 1.66 | 6.05  |
| 38 | T1   | Depan Hotel Phoneix Yogyakarta                              | 430522.00 | 9139633.00 | 3.46 | 1.12 | 10.69 |
| 39 | T2   | YKPN Balapan  | 431975.00 | 9139431.00 | 3.29 | 1.50 | 7.22  |
| 40 | T3   | Stasiun Tugu  | 429995.00 | 9138998.00 | 3.25 | 2.34 | 4.51  |
| 41 | T4   | Rusunawa Tukangan   | 430591.00 | 9138474.00 | 2.85 | 1.21 | 6.71  |
| 42 | T5   | Jalan Hayam Wuruk   | 430976.00 | 9138484.00 | 1.71 | 1.01 | 2.90  |
| 43 | T6   | Jl Dokter Sutomo Selatan jembatan layang                    | 431401.00 | 9138479.00 | 4.19 | 1.77 | 9.92  |
| 44 | T7   | Jl. Gandekan  | 429601.00 | 9138533.00 | 2.66 | 1.46 | 4.85  |
| 45 | T8   | Depan SMU M 7 Yogyakarta                                    | 428509.00 | 9137476.00 | 2.84 | 1.55 | 5.20  |
| 46 | T9   | Wirbrajan   | 428271.00 | 9137276.00 | 3.32 | 1.10 | 10.02 |
| 47 | T10  | Jl. HOS Cokroaminoto  | 428405.00 | 9138033.00 | 3.31 | 1.50 | 7.30  |
| 48 | DR1  | Timur PG Madukismo  | 428123.00 | 9134453.00 | 3.50 | 3.00 | 4.08  |
| 49 | DR2  | Pondok Pesantren Krapyak                                    | 429412.00 | 9134371.00 | 2.80 | 2.90 | 2.70  |
| 50 | T11  | Batas Kota Jl. Magelang                                     | 429523.00 | 9141029.00 | 1.68 | 1.83 | 1.54  |
| 51 | T12  | Jambon  | 428980.00 | 9140904.00 | 5.29 | 1.44 | 2.43  |

### Lampiran 3

#### Data Ketebalan lapisan sedimen ( Vs Imai and Tonouchi 1982)

| No |     | Lat      | Long    | fo   | Vs  | H     |
|----|-----|----------|---------|------|-----|-------|
| 1  | A1  | 428770.4 | 9140912 | 1.36 | 252 | 46.32 |
| 2  | A2  | 428528.5 | 9140009 | 1.25 | 254 | 50.80 |
| 3  | A3  | 428486   | 9139099 | 1.39 | 257 | 46.22 |
| 4  | A4  | 428947.7 | 9137113 | 1.64 | 267 | 40.70 |
| 5  | A5  | 429333.6 | 9136682 | 2.69 | 269 | 25.00 |
| 6  | A6  | 429075.1 | 9135990 | 1.5  | 269 | 44.83 |
| 7  | A7  | 428991.2 | 9134946 | 1.59 | 268 | 42.14 |
| 9  | B4  | 430203   | 9138239 | 1.43 | 264 | 46.15 |
| 10 | B5  | 429994.7 | 9136994 | 1.53 | 272 | 44.44 |
| 11 | B6  | 429864.4 | 9135831 | 2.68 | 271 | 25.28 |
| 12 | B7  | 430061.3 | 9134754 | 1.56 | 269 | 43.11 |
| 13 | C2  | 431073   | 9140041 | 0.72 | 248 | 86.11 |
| 14 | C3  | 431149.7 | 9139075 | 1.44 | 258 | 44.79 |
| 15 | C4  | 431101.1 | 9137922 | 1.54 | 268 | 43.51 |
| 16 | C5  | 431056.5 | 9137056 | 1.35 | 273 | 50.56 |
| 17 | C6  | 430742.7 | 9135883 | 1.56 | 271 | 43.43 |
| 18 | C7  | 431173.3 | 9135220 | 2.81 | 268 | 23.84 |
| 20 | D4  | 432331.9 | 9137948 | 1.3  | 267 | 51.35 |
| 21 | D3  | 431946   | 9138444 | 1.22 | 263 | 53.89 |
| 22 | D6  | 431950.5 | 9136024 | 1.49 | 273 | 45.81 |
| 23 | D7  | 432281.8 | 9135113 | 1.59 | 268 | 42.14 |
| 24 | E3  | 432903.2 | 9138755 | 1.3  | 266 | 51.15 |
| 25 | E4  | 432956.1 | 9137982 | 1.36 | 267 | 49.08 |
| 26 | E5  | 433116.1 | 9137129 | 1.4  | 269 | 48.04 |
| 27 | E6  | 432971   | 9135910 | 1.46 | 271 | 46.40 |
| 28 | F5  | 433879.8 | 9137016 | 1.43 | 269 | 47.03 |
| 29 | F6  | 433987   | 9135909 | 1.54 | 271 | 43.99 |
| 30 | F7  | 434731.3 | 9134961 | 1.53 | 272 | 44.44 |
| 31 | Gej | 432780.5 | 9140255 | 1.37 | 268 | 48.91 |
| 32 | MMK | 433656.1 | 9134504 | 1.52 | 271 | 44.57 |
| 33 | MK  | 429729.7 | 9137366 | 1.53 | 270 | 44.12 |
| 34 | E7  | 432999   | 9134999 | 1.59 | 270 | 42.45 |
| 35 | E8  | 433000   | 9134000 | 1.57 | 271 | 43.15 |
| 36 | O5  | 428000   | 9137000 | 1.66 | 265 | 39.91 |
| 37 | t1  | 430522   | 9139633 | 1.12 | 250 | 55.80 |
| 38 | t2  | 431975   | 9139431 | 1.5  | 260 | 43.33 |
| 39 | t3  | 429995   | 9138998 | 2.34 | 255 | 27.24 |
| 40 | t4  | 430591   | 9138474 | 1.21 | 262 | 54.13 |
| 41 | t5  | 430976   | 9138484 | 1.01 | 262 | 64.85 |
| 42 | t6  | 431401   | 9138479 | 1.77 | 263 | 37.15 |
| 43 | t7  | 429601   | 9138533 | 1.46 | 259 | 44.35 |
| 44 | t8  | 428509   | 9137476 | 1.55 | 265 | 42.74 |
| 45 | t9  | 428271   | 9137276 | 1.1  | 265 | 60.23 |
| 46 | t10 | 428405   | 9138033 | 1.5  | 262 | 43.67 |
| 47 | D1  | 428123   | 9134453 | 3    | 269 | 22.42 |
| 48 | D2  | 429412   | 9134371 | 2.9  | 269 | 23.19 |
| 49 | At1 | 429523   | 9141029 | 1.83 | 250 | 34.15 |
| 50 | At2 | 428980   | 9140904 | 1.44 | 252 | 43.75 |

## Lampiran 4

### Percepatan tanah maksimum metode Kanai

| No | Kode | lat      | long    | T (dt) | PGA (gal) |
|----|------|----------|---------|--------|-----------|
| 1  | A1   | 428770.4 | 9140912 | 0.735  | 458.068   |
| 2  | A2   | 428528.5 | 9140009 | 0.800  | 451.778   |
| 3  | A3   | 428486   | 9139099 | 0.719  | 492.230   |
| 4  | A4   | 428947.7 | 9137113 | 0.610  | 582.076   |
| 5  | A5   | 429333.6 | 9136682 | 0.372  | 765.073   |
| 6  | A6   | 429075.1 | 9135990 | 0.667  | 582.601   |
| 7  | A7   | 428991.2 | 9134946 | 0.629  | 622.216   |
| 8  | B3   | 429941.5 | 9139194 | 1.613  | 338.113   |
| 9  | B4   | 430203   | 9138239 | 0.699  | 535.952   |
| 10 | B5   | 429994.7 | 9136994 | 0.654  | 579.295   |
| 11 | B6   | 429864.4 | 9135831 | 0.373  | 799.534   |
| 12 | B7   | 430061.3 | 9134754 | 0.641  | 639.245   |
| 13 | C2   | 431073   | 9140041 | 1.389  | 360.312   |
| 14 | C3   | 431149.7 | 9139075 | 0.694  | 530.375   |
| 15 | C4   | 431101.1 | 9137922 | 0.649  | 573.987   |
| 16 | C5   | 431056.5 | 9137056 | 0.741  | 556.026   |
| 17 | C6   | 430742.7 | 9135883 | 0.641  | 622.065   |
| 18 | C7   | 431173.3 | 9135220 | 0.356  | 866.331   |
| 19 | D4   | 432331.9 | 9137948 | 0.769  | 539.633   |
| 20 | D3   | 431946   | 9138444 | 0.820  | 508.466   |
| 21 | D6   | 431950.5 | 9136024 | 0.671  | 621.331   |
| 22 | D7   | 432281.8 | 9135113 | 0.629  | 671.584   |
| 23 | E3   | 432903.2 | 9138755 | 0.769  | 526.905   |
| 24 | E4   | 432956.1 | 9137982 | 0.735  | 557.360   |
| 25 | E5   | 433116.1 | 9137129 | 0.714  | 588.097   |
| 26 | E6   | 432971   | 9135910 | 0.685  | 631.105   |
| 27 | F5   | 433879.8 | 9137016 | 0.699  | 605.124   |
| 28 | F6   | 433987   | 9135909 | 0.649  | 660.577   |
| 29 | F7   | 434731.3 | 9134961 | 0.654  | 695.635   |
| 30 | Gej  | 432780.5 | 9140255 | 0.730  | 507.067   |
| 31 | MMK  | 433656.1 | 9134504 | 0.658  | 693.910   |
| 32 | MKY  | 429729.7 | 9137366 | 0.654  | 567.434   |
| 33 | E7   | 432999   | 9134999 | 0.629  | 685.318   |
| 34 | E8   | 433000   | 9134000 | 0.637  | 710.877   |
| 35 | O-5  | 428000   | 9137000 | 0.602  | 574.081   |
| 36 | KRG  | 433465   | 9135211 | 0.641  | 678.947   |
| 37 | BRJ  | 431631   | 9135513 | 0.645  | 642.661   |
| 38 | t1   | 430522   | 9139633 | 0.893  | 452.967   |

|    |       |        |         |       |         |
|----|-------|--------|---------|-------|---------|
| 39 | t2    | 431975 | 9139431 | 0.667 | 542.902 |
| 40 | t3    | 429995 | 9138998 | 0.427 | 664.047 |
| 41 | t4    | 430591 | 9138474 | 0.826 | 493.542 |
| 42 | t5    | 430976 | 9138484 | 0.990 | 454.294 |
| 43 | t6    | 431401 | 9138479 | 0.565 | 606.625 |
| 44 | t7    | 429601 | 9138533 | 0.685 | 529.512 |
| 45 | t8    | 428509 | 9137476 | 0.645 | 553.387 |
| 46 | t9    | 428271 | 9137276 | 0.909 | 466.829 |
| 47 | t10   | 428405 | 9138033 | 0.667 | 531.935 |
| 48 | Dar1  | 428123 | 9134453 | 0.333 | 848.637 |
| 49 | Dar2  | 429412 | 9134371 | 0.345 | 868.736 |
| 50 | atas1 | 429523 | 9141029 | 0.546 | 536.993 |
| 51 | atas2 | 428980 | 9140904 | 0.694 | 473.495 |



## Lampiran 5

### Percepatan tanah maksimum metode Champbell

| No | Kode | lat       | long       | PGA (g) |
|----|------|-----------|------------|---------|
| 1  | A1   | 428770.41 | 9140912.24 | 0.124   |
| 2  | A2   | 428528.47 | 9140008.8  | 0.127   |
| 3  | A3   | 428485.95 | 9139098.66 | 0.129   |
| 4  | A4   | 428947.67 | 9137113.02 | 0.137   |
| 5  | A5   | 429333.61 | 9136681.88 | 0.139   |
| 6  | A6   | 429075.08 | 9135989.92 | 0.141   |
| 7  | A7   | 428991.19 | 9134946.09 | 0.145   |
| 8  | B3   | 429941.45 | 9139194.29 | 0.132   |
| 9  | B4   | 430203.04 | 9138238.91 | 0.136   |
| 10 | B5   | 429994.74 | 9136993.91 | 0.140   |
| 11 | B6   | 429864.37 | 9135831.21 | 0.144   |
| 12 | B7   | 430061.33 | 9134753.94 | 0.148   |
| 13 | C2   | 431072.96 | 9140041    | 0.131   |
| 14 | C3   | 431149.73 | 9139075.22 | 0.134   |
| 15 | C4   | 431101.09 | 9137922.4  | 0.139   |
| 16 | C5   | 431056.49 | 9137055.75 | 0.142   |
| 17 | C6   | 430742.66 | 9135882.64 | 0.146   |
| 18 | C7   | 431173.26 | 9135220.49 | 0.149   |
| 19 | D4   | 432331.91 | 9137947.61 | 0.141   |
| 20 | D3   | 431946    | 9138444    | 0.138   |
| 21 | D6   | 431950.47 | 9136023.73 | 0.148   |
| 22 | D7   | 432281.83 | 9135112.86 | 0.152   |
| 23 | E3   | 432903.23 | 9138754.76 | 0.138   |
| 24 | E4   | 432956.11 | 9137981.86 | 0.142   |
| 25 | E5   | 433116.11 | 9137128.6  | 0.145   |
| 26 | E6   | 432971    | 9135910.05 | 0.150   |
| 27 | F5   | 433879.8  | 9137016.28 | 0.147   |
| 28 | F6   | 433987.03 | 9135908.56 | 0.152   |
| 29 | F7   | 434731.29 | 9134961.04 | 0.158   |
| 30 | Gej  | 432780.46 | 9140254.84 | 0.133   |
| 31 | MMK  | 433656.07 | 9134503.65 | 0.158   |
| 32 | MKY  | 429729.66 | 9137366.46 | 0.138   |
| 33 | E7   | 432999    | 9134999    | 0.154   |
| 34 | E8   | 433000    | 9134000    | 0.159   |
| 35 | O-5  | 428000    | 9137000    | 0.135   |

|    |       |        |         |       |
|----|-------|--------|---------|-------|
| 36 | KRG   | 433465 | 9135211 | 0.154 |
| 37 | BRJ   | 431631 | 9135513 | 0.149 |
| 38 | t1    | 430522 | 9139633 | 0.132 |
| 39 | t2    | 431975 | 9139431 | 0.135 |
| 40 | t3    | 429995 | 9138998 | 0.133 |
| 41 | t4    | 430591 | 9138474 | 0.136 |
| 42 | t5    | 430976 | 9138484 | 0.136 |
| 43 | t6    | 431401 | 9138479 | 0.137 |
| 44 | t7    | 429601 | 9138533 | 0.134 |
| 45 | t8    | 428509 | 9137476 | 0.135 |
| 46 | t9    | 428271 | 9137276 | 0.135 |
| 47 | t10   | 428405 | 9138033 | 0.133 |
| 48 | Dar1  | 428123 | 9134453 | 0.144 |
| 49 | Dar2  | 429412 | 9134371 | 0.148 |
| 50 | atas1 | 429523 | 9141029 | 0.125 |
| 51 | atas2 | 428980 | 9140904 | 0.125 |



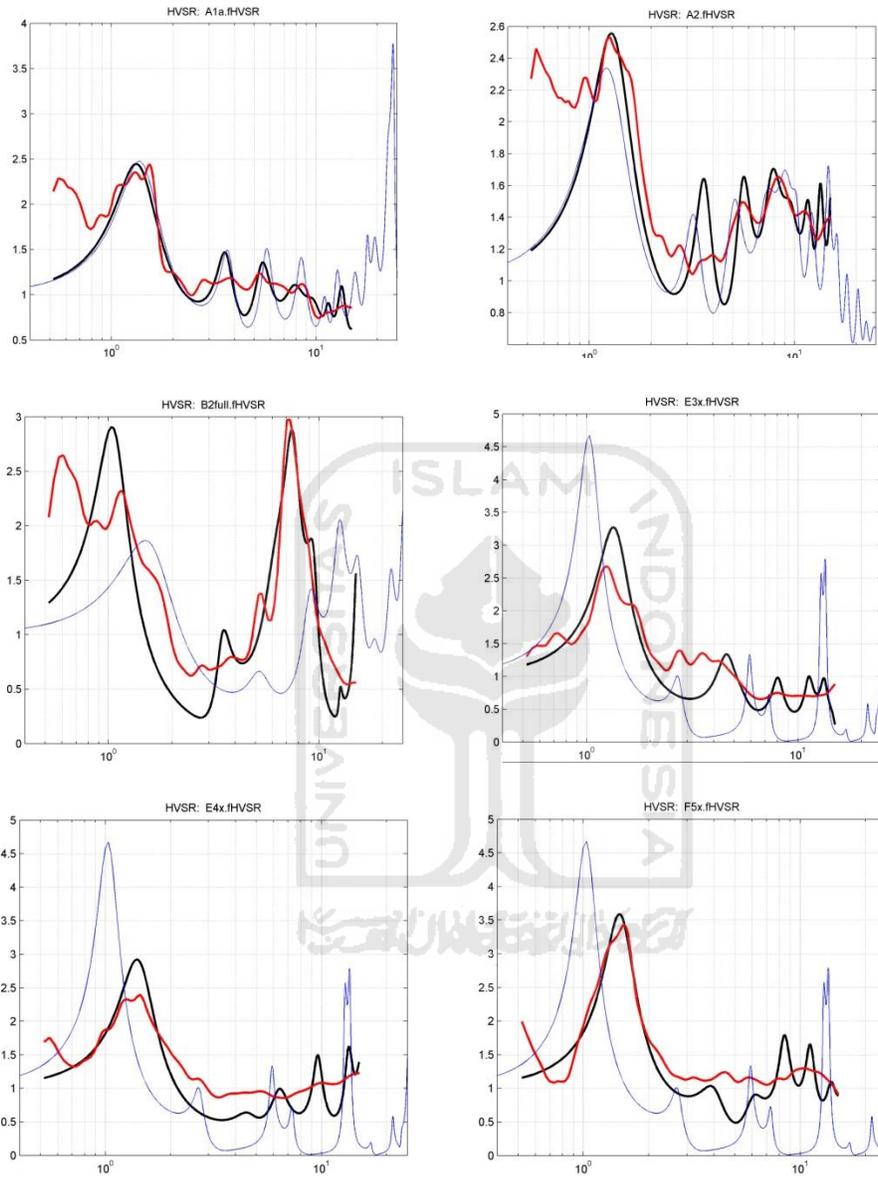
## Lampiran 6

Tabel Perbandingan persamaan replikasi dengan beberapa persamaan empiris  
korelasi Vs dengan N-SPT

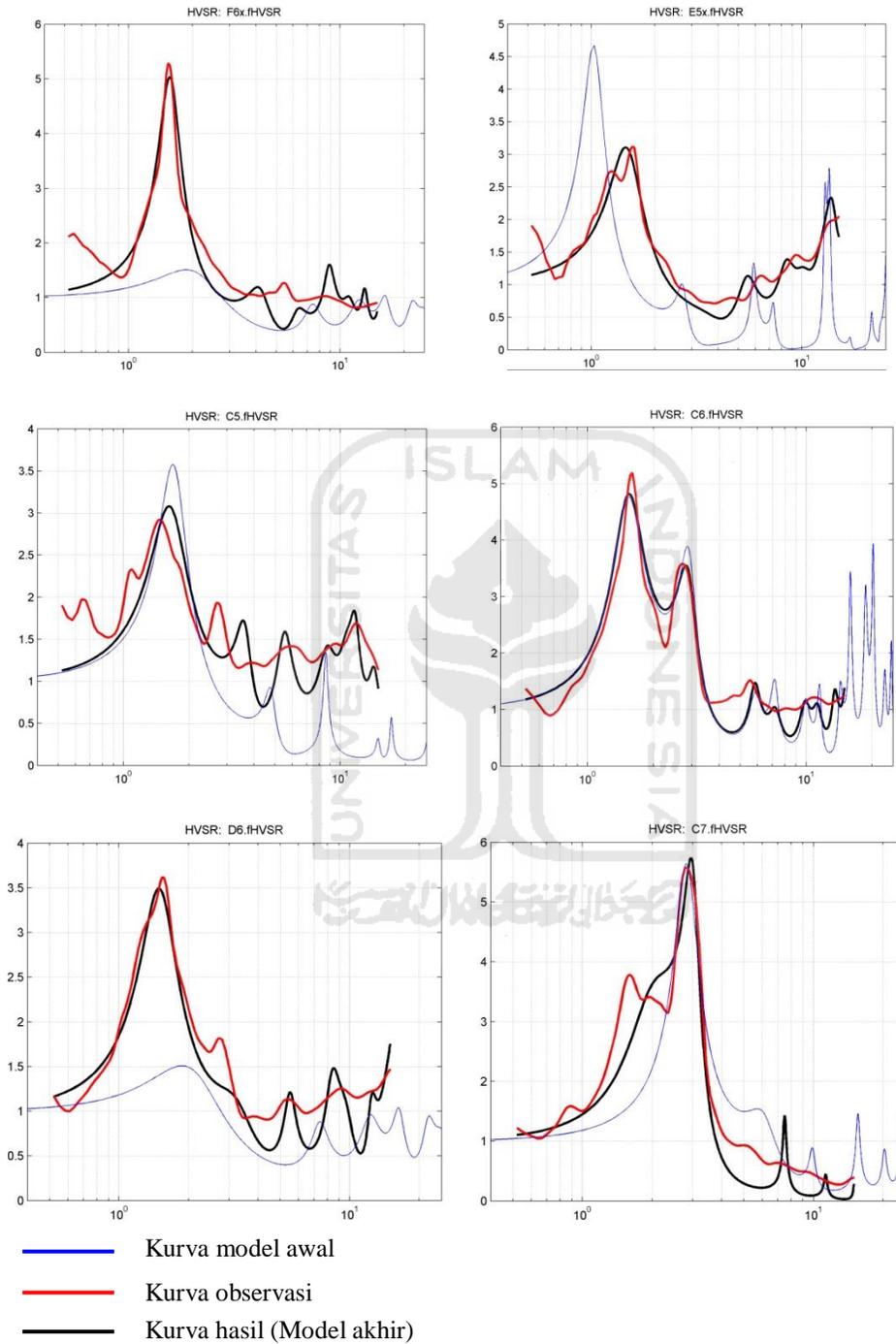
| No | Vs    | N    | Seed at. al | Replikasi | Sykora and Coster | Lee    | Jafari et. al | Yosida et.al |
|----|-------|------|-------------|-----------|-------------------|--------|---------------|--------------|
| 1  | 117.7 | 15   | 218.44      | 180.76    | 201.86            | 214.86 | 219.84        | 226.79       |
| 2  | 78.13 | 17.5 | 235.94      | 196.94    | 215.7             | 231.72 | 250.61        | 238.03       |
| 3  | 769.2 | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 4  | 322.6 | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 5  | 454.6 | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 6  | 454.6 | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 7  | 100   | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 8  | 208.3 | 20   | 252.23      | 212.13    | 228.45            | 247.39 | 280.74        | 248.23       |
| 9  | 122   | 22.5 | 267.53      | 226.49    | 240.31            | 262.09 | 310.3         | 257.58       |
| 10 | 172.4 | 22.5 | 267.53      | 226.49    | 240.31            | 262.09 | 310.3         | 257.58       |
| 11 | 112.4 | 25   | 282         | 240.16    | 251.45            | 275.97 | 339.37        | 266.24       |
| 12 | 357.1 | 25   | 282         | 240.16    | 251.45            | 275.97 | 339.37        | 266.24       |
| 13 | 312.5 | 26   | 287.58      | 245.45    | 255.73            | 281.33 | 350.87        | 269.54       |
| 14 | 400   | 27.5 | 295.76      | 253.23    | 261.97            | 289.17 | 368.01        | 274.33       |
| 15 | 208.3 | 27.5 | 295.76      | 253.23    | 261.97            | 289.17 | 368.01        | 274.33       |
| 16 | 80    | 27.5 | 295.76      | 253.23    | 261.97            | 289.17 | 368.01        | 274.33       |
| 17 | 357.1 | 27.5 | 295.76      | 253.23    | 261.97            | 289.17 | 368.01        | 274.33       |
| 18 | 357.1 | 27.7 | 296.84      | 254.25    | 262.79            | 290.2  | 370.28        | 274.96       |
| 19 | 122   | 28   | 298.44      | 255.78    | 264.01            | 291.73 | 373.69        | 275.89       |
| 20 | 400   | 30   | 308.92      | 265.79    | 271.96            | 301.76 | 396.26        | 281.93       |
| 21 | 227.3 | 30   | 308.92      | 265.79    | 271.96            | 301.76 | 396.26        | 281.93       |
| 22 | 227.3 | 30   | 308.92      | 265.79    | 271.96            | 301.76 | 396.26        | 281.93       |
| 23 | 270.3 | 30   | 308.92      | 265.79    | 271.96            | 301.76 | 396.26        | 281.93       |
| 24 | 434.8 | 32   | 319.05      | 275.5     | 279.61            | 311.46 | 418.6         | 287.7        |
| 25 | 434.8 | 32   | 319.05      | 275.5     | 279.61            | 311.46 | 418.6         | 287.7        |
| 26 | 400   | 32.5 | 321.53      | 277.89    | 281.48            | 313.83 | 424.15        | 289.1        |
| 27 | 270.3 | 35   | 333.67      | 289.58    | 290.6             | 325.44 | 451.73        | 295.91       |
| 28 | 270.3 | 40   | 356.7       | 311.91    | 307.77            | 347.44 | 506.03        | 308.58       |
| 29 | 270.3 | 55   | 418.27      | 372.35    | 352.94            | 406.12 | 663.33        | 341.03       |

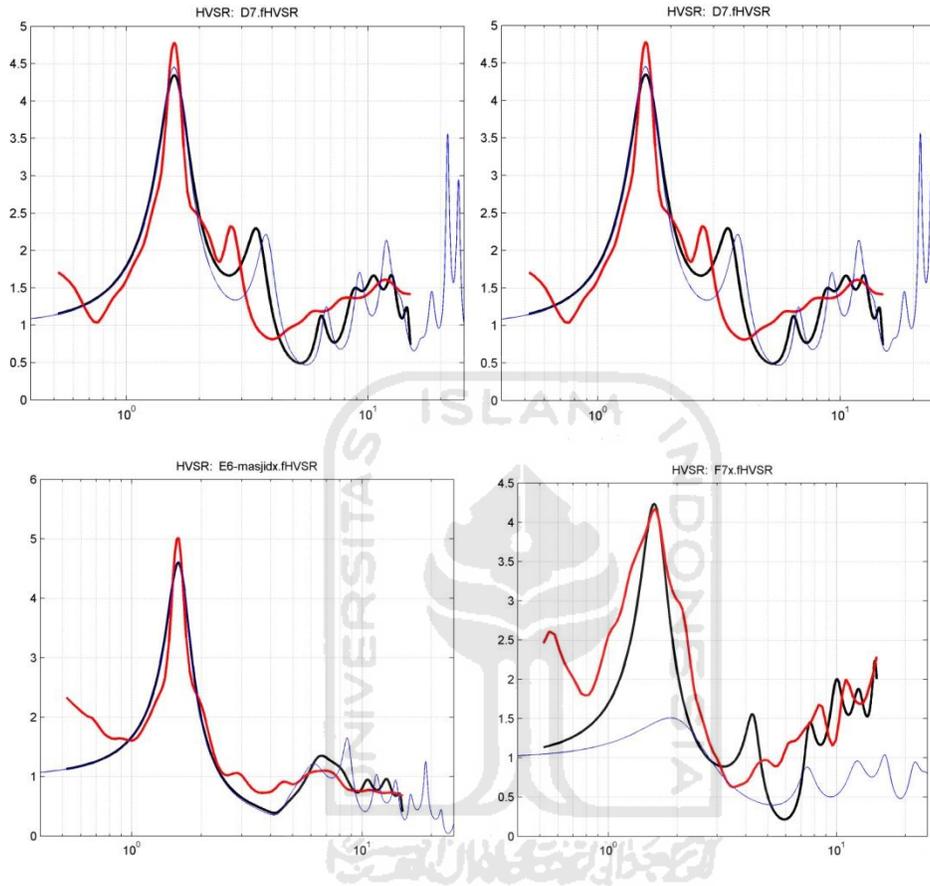
## Lampiran 7

### Kurva HVSR hasil Inversi



- Kurva model awal
- Kurva observasi
- Kurva hasil (Model akhir)

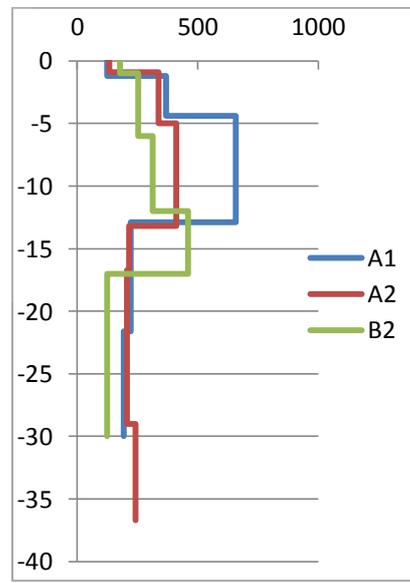
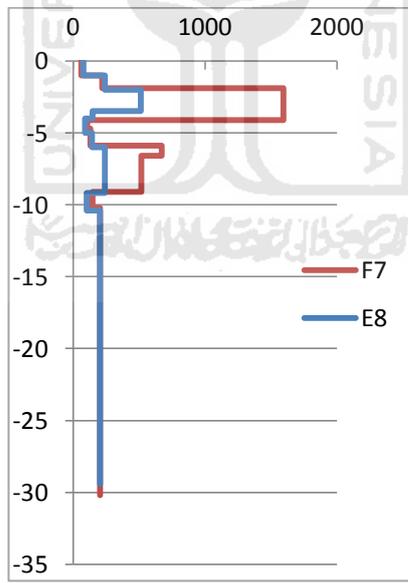
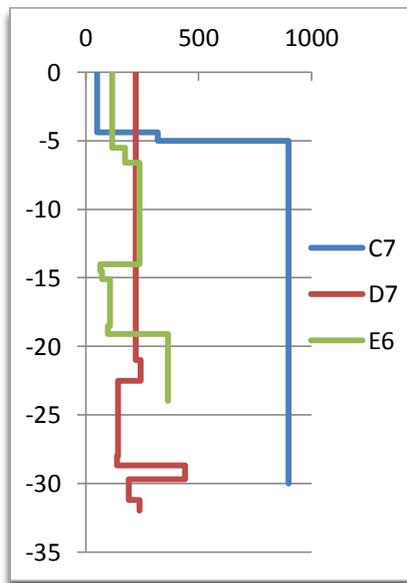
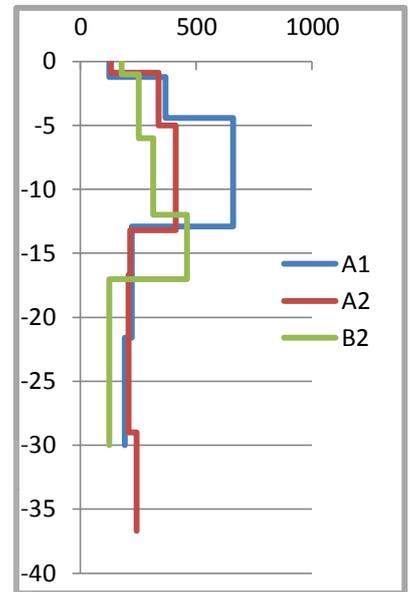
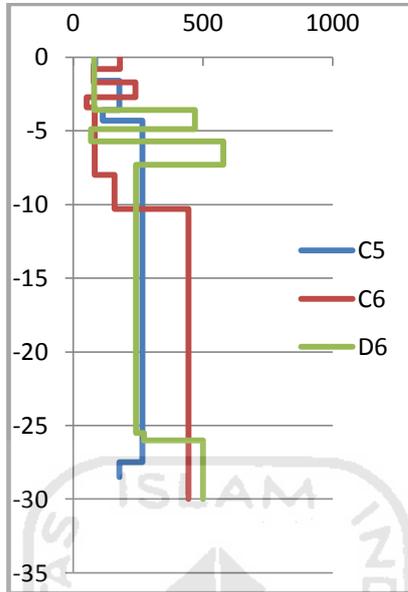
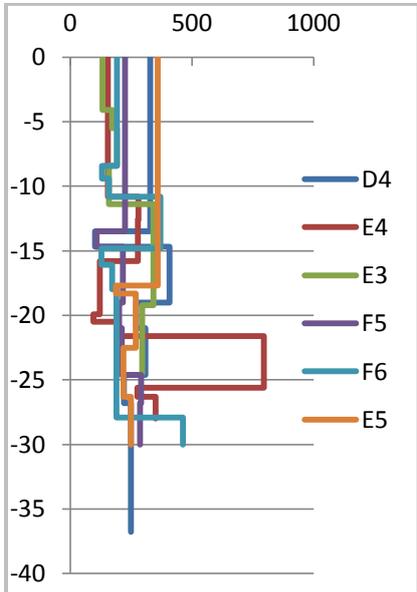




- Kurva model awal
- Kurva observasi
- Kurva hasil (Model akhir)

# Lampiran 10

## Profil 1D Vs Inversi kurva HVSR



## Lampiran 9

### Vs30 inversi kurva HVSR

| No | Kode | Lintang UTM | Bujur UTM  | Vs30   |
|----|------|-------------|------------|--------|
| 1  | A1   | 428770.4    | 9140912.24 | 195.54 |
| 2  | A2   | 428528.5    | 9140008.8  | 204.84 |
| 3  | A3   | 428486      | 9139098.66 | 220.21 |
| 4  | A4   | 428947.7    | 9137113.02 | 212.56 |
| 5  | A6   | 429075.1    | 9135989.92 | 220.74 |
| 6  | A7   | 428991.2    | 9134946.09 | 215.65 |
| 7  | B2   | 430103.4    | 9140102    | 210.2  |
| 8  | B6   | 429864.4    | 9135831.21 | 183.41 |
| 9  | B7   | 430061.3    | 9134753.94 | 238.99 |
| 10 | C3   | 431149.7    | 9139075.22 | 223.72 |
| 11 | C5   | 431056.5    | 9137055.75 | 229.58 |
| 12 | C6   | 430742.7    | 9135882.64 | 200.02 |
| 13 | C7   | 431173.3    | 9135220.49 | 210.12 |
| 14 | D4   | 432331.9    | 9137947.61 | 207.58 |
| 15 | D6   | 431950.5    | 9136023.73 | 202.39 |
| 16 | E3   | 432903.2    | 9138754.76 | 262.08 |
| 17 | E4   | 432956.1    | 9137981.86 | 203.61 |
| 18 | E5   | 433116.1    | 9137128.6  | 258.95 |
| 19 | E6   | 432971      | 9135910.05 | 198.85 |
| 20 | E7   | 432999      | 9134999    | 199.99 |
| 21 | F5   | 433879.8    | 9137016.28 | 186.67 |
| 22 | F6   | 433987      | 9135908.56 | 200.14 |
| 23 | F7   | 434731.3    | 9134961.04 | 200.15 |
| 24 | B5   | 429994.7    | 9136993.91 | 261.12 |
| 25 | B7   | 430061.3    | 9134753.94 | 238.99 |
| 26 | E8   | 433000      | 9134000    | 186.47 |
| 27 | o5   | 428000      | 9137000    | 247.66 |

## Lampiran 10

Tabel N-SPT

| Depth | Malang | Porosuta | Janturan |       | Golo    |       | Palagan B1 |       | Jl Mangkubumi |       | Hotel Grage Ramayana |       | Hotel Aston Yk |       | Bookstore UGM |       |
|-------|--------|----------|----------|-------|---------|-------|------------|-------|---------------|-------|----------------------|-------|----------------|-------|---------------|-------|
|       | N-SPT  | N-SPT    | depth    | N-SPT | depth   | N-SPT | depth      | N-SPT | depth         | N-SPT | depth                | N-SPT | depth          | N-SPT | depth         | N-SPT |
| 1     |        |          | -1.7     | 25    | -1.725  | 17    | -3         | 27    | -2            | 25    | -1.5                 | 10    | -1.5           | 16    | -1.5          | 19    |
| 2     |        |          | -3.2     | 27    | -3.225  | 34    | -4         | 28    | -4            | 29    | -3.0                 | 12    | -3             | 22    | -3            | 37    |
| 3     | 20     | 17       | -4.7     | 24    | -4.725  | 30    | -5         | 27    | -6            | 33    | -4.5                 | 15    | -4.5           | 24    | -4.5          | 48    |
| 4     | 28     | 18       | -6.2     | 26    | -6.225  | 24    | -6         | 22    | -8            | 30    | -6.0                 | 30    | -6             | 28    | -6            | 12    |
| 5     | 22.5   | 19       | -7.7     | 28    | -7.725  | 26    | -7         | 22    | -10           | 28    | -7.5                 | 20    | -7.5           | 10    | -7.5          | 9     |
| 6     | 20     | 20       | -9.2     | 30    | -9.225  | 31    | -8         | 25    | -12           | 24    | -9.0                 | 24    | -9             | 12    | -9            | 22    |
| 7     | 20     | 22       | -10.7    | 30    | -10.725 | 25    | -9         | 29    | -14           | 60    | -10.5                | 20    | -10.5          | 24    | -10.5         | 8     |
| 8     | 20     | 24       | -12.2    | 33    | -12.225 | 10    | -10        | 30    | -16           | 60    | -12.0                | 26    | -12            | 14    | -12           | 20    |
| 9     | 17.5   | 22       | -13.7    | 11    | -13.725 | 32    | -11        | 45    | -18           | 28    | -13.5                | 28    | -13.5          | 20    | -13.5         | 14    |
| 10    | 15     | 21       | -15.2    | 34    | -15.225 | 35    | -12        | 75    | -20           | 32    | -15.0                | 25    | -15            | 24    | -15           | 14    |
| 11    | 20     | 21       | -16.7    | 30    | -16.725 | 25    | -13        | 64    | -22           | 30    | -16.5                | 30    | -16.5          | 28    | -16.5         | 12    |
| 12    | 27.5   | 22       | -18.2    | 31    | -18.225 | 32    | -14        | 30    | -24           | 34    | -18.0                | 22    | -18            | 34    | -18           | 24    |
| 13    | 30     | 27       | -19.7    | 11    | -19.725 | 25    | -15        | 15    |               |       | -19.5                | 44    | -19.5          | 24    | -19.5         | 36    |
| 14    | 32.5   | 25       | -21.2    | 30    | -21.225 | 10    | -16        | 13    |               |       |                      |       | -21            | 32    | -21           | 20    |
| 15    | 27.5   | 25       | -22.7    | 35    | -22.725 | 37    | -17        | 14.5  |               |       |                      |       | -22.5          | 30    | -22.5         | 10    |
| 16    | 20     | 25       | -24.2    | 22    | -24.225 | 40    | -18        | 15    |               |       |                      |       | -24            | 32    | -24           | 11    |
| 17    | 22.5   | 25       | -25.7    | 36    | -25.725 | 26    | -19        | 12    |               |       |                      |       | -25.5          | 34    | -25.5         | 50    |
| 18    | 25     | 25       | -27.2    | 30    | -27.225 | 46    | -20        | 14    |               |       |                      |       | -27            | 32    | -27           | 50    |
| 19    | 26     | 24       | -28.7    | 10    | -28.725 | 42    | -21        | 23    |               |       |                      |       | -28.5          | 30    | -28.5         | 42    |
| 20    | 27.5   | 22       |          |       | -30.225 | 30    | -22        | 58    |               |       |                      |       | -30            | 32    |               |       |
| 21    | 27.7   | 27       |          |       |         |       | -23        | 60    |               |       |                      |       | -31.5          | 28    |               |       |
| 22    | 25     | 31       |          |       |         |       | -24        | 43    |               |       |                      |       | -33            | 10    |               |       |
| 23    | 27.5   | 31       |          |       |         |       | -25        | 35    |               |       |                      |       | -34.5          | 24    |               |       |
| 24    | 30     | 30       |          |       |         |       | -26        | 32    |               |       |                      |       | -36            | 32    |               |       |
| 25    | 30     | 30       |          |       |         |       | -27        | 34    |               |       |                      |       | -37.5          | 36    |               |       |
| 26    | 32     | 29       |          |       |         |       | -28        | 75    |               |       |                      |       | -39            | 39    |               |       |
| 27    | 32     | 29       |          |       |         |       | -29        | 75    |               |       |                      |       |                |       |               |       |
| 28    | 30     | 45       |          |       |         |       | -30        | 69    |               |       |                      |       |                |       |               |       |
| 29    | 35     | 30       |          |       |         |       | -31        | 75    |               |       |                      |       |                |       |               |       |
| 30    | 40     | 15       |          |       |         |       | -32        | 75    |               |       |                      |       |                |       |               |       |
| 31    | 55     | 18       |          |       |         |       | -33        | 75    |               |       |                      |       |                |       |               |       |
| 32    |        | 28       |          |       |         |       |            |       |               |       |                      |       |                |       |               |       |



## Lampiran 11

Tabel Kecepatan Gelombang Geser ( $v_s$ )

### Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ ) REPLIKASI

| No | Lintang (UTM) | Bujur (UTM) | $V_s$ (m/s) | Lokasi           |
|----|---------------|-------------|-------------|------------------|
| 1  | 432728        | 9133941     | 248.90      | Malangan         |
| 2  | 431816        | 9134948     | 238.15      | Sorosutan        |
| 3  | 432639        | 9137066     | 244.61      | Janturan         |
| 4  | 431895        | 9135935     | 256.22      | Golo             |
| 5  | 432248        | 9147401     | 299.03      | Palagan B1       |
| 6  | 429945        | 9139113     | 283.43      | Jl Mangkubumi    |
| 7  | 429901        | 9138662     | 228.40      | Hotel Grage      |
| 8  | 432906        | 9139571     | 241.04      | Hotel Aston      |
| 9  | 431165        | 9140697     | 225.30      | Book Store UGM   |
| 10 | 435764        | 9141779     | 249.02      | Kanwil Pajak     |
| 11 | 433762        | 9142239     | 239.98      | Mall Hartono     |
| 12 | 433033        | 9140550     | 274.06      | Auditorium Sadar |
| 13 | 429486        | 9139399     | 254.70      | Bank BPD DIY     |
| 14 | 430115        | 9137893     | 240.87      | Jl Remujung      |

### Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ ) korelasi Imai and Tonouchi

| No | Lintang (UTM) | Bujur (UTM) | $V_s$ (m/s) | Lokasi           |
|----|---------------|-------------|-------------|------------------|
| 1  | 432728        | 9133941     | 270.94      | Malangan         |
| 2  | 431816        | 9134948     | 264.48      | Sorosutan        |
| 3  | 432639        | 9137066     | 267.73      | Janturan         |
| 4  | 431895        | 9135935     | 274.73      | Golo             |
| 5  | 432248        | 9147401     | 297.38      | Palagan B1       |
| 6  | 429945        | 9139113     | 291.34      | Jl Mangkubumi    |
| 7  | 429901        | 9138662     | 257.42      | Hotel Grage      |
| 8  | 432906        | 9139571     | 265.52      | Hotel Aston      |
| 9  | 431165        | 9140697     | 253.29      | Book Store UGM   |
| 10 | 435764        | 9141779     | 270.35      | Kanwil Pajak     |
| 11 | 433762        | 9142239     | 263.55      | Mall Hartono     |
| 12 | 433033        | 9140550     | 285.35      | Auditorium Sadar |
| 13 | 429486        | 9139399     | 274.30      | Bank BPD DIY     |
| 14 | 430115        | 9137893     | 265.85      | Jl Remujung      |

Lampiran 12

Ringkasan hasil uji mekanika tanah sedimen pemboran Malangan dan Sorosutan (PUP-ESDM DIY)

| No. | Test Point No | Location              | Depth m       | Moisture content $w_n$ , % | Specific Gravity $G_s$ | Finer # 200 % | Cu   | Cc   | Void Ratio (e) | Porosity (%) | Degree of Saturation S, (%) | Bulk Density | Dry Density | Unconsolidated Undrained Triaxial |                     |
|-----|---------------|-----------------------|---------------|----------------------------|------------------------|---------------|------|------|----------------|--------------|-----------------------------|--------------|-------------|-----------------------------------|---------------------|
|     |               |                       |               |                            |                        |               |      |      |                |              |                             | $g/cm^3$     | $g/cm^3$    | $\phi'$                           | $\sigma'_{kg/cm^2}$ |
| 1   | Giwangan      | Giwangan (Malangan)   | 3.50 - 4.00   | 8.95                       | 2.73                   | 30.67         | -    | -    | 0.644          | 39.173       | 37.94                       | 1.81         | 1.66        | 40.69                             | 0.130               |
| 2   |               |                       | 7.50 - 8.00   | 11.57                      | 2.69                   | 79.13         | -    | -    | 0.629          | 38.613       | 49.48                       | 1.85         | 1.65        | 43.15                             | 0.100               |
| 3   |               |                       | 9.50 - 10.00  | 15.53                      | 2.76                   | 27.76         | -    | -    | 0.624          | 38.424       | 68.69                       | 1.96         | 1.70        | 35.25                             | 0.010               |
| 4   |               |                       | 13.50 - 14.00 | 20.24                      | 2.79                   | 3.28          | 4.02 | 1.18 | 0.460          | 31.507       | 100.00                      | 2.30         | 1.91        | 43.85                             | 0.14                |
| 5   |               |                       | 16.50 - 17.00 | 13.36                      | 2.71                   | 38.18         | -    | -    | 0.712          | 41.589       | 50.85                       | 1.79         | 1.58        | 35.94                             | 0.020               |
| 6   |               |                       | 20.50 - 21.00 | 22.07                      | 2.64                   | 33.91         | -    | -    | 0.904          | 47.479       | 64.45                       | 1.70         | 1.39        | 38.83                             | 0.060               |
| 7   |               |                       | 24.50 - 25.00 | 36.28                      | 2.73                   | 26.46         | -    | -    | 0.789          | 44.103       | 100.00                      | 2.09         | 1.52        | 37.41                             | 0.02                |
| 8   |               |                       | 25.50 - 26.00 | 21.89                      | 2.72                   | 23.17         | -    | -    | 0.707          | 41.418       | 84.22                       | 1.94         | 1.60        | 38.21                             | 0.02                |
| 9   |               |                       | 27.00 - 27.50 | 37.82                      | 2.64                   | 90.10         | -    | -    | 1.040          | 50.980       | 96.00                       | 1.78         | 1.30        | 27.37                             | 0.570               |
| 10  |               |                       | 28.50 - 29.00 | 19.57                      | 2.61                   | 66.21         | -    | -    | 0.997          | 49.925       | 51.23                       | 1.56         | 1.31        | 37.04                             | 0.080               |
| 11  | Wirosaban     | Wirosaban (Sorosutan) | 3.50 - 4.00   | 15.51                      | 2.70                   | 27.97         | -    | -    | 0.86           | 46.15        | 48.86                       | 1.65         | 1.44        | 39.06                             | 0.06                |
| 12  |               |                       | 6.50 - 7.00   | 12.57                      | 2.63                   | 70.72         | -    | -    | 0.92           | 47.84        | 36.05                       | 1.54         | 1.37        | 41.21                             | 0.12                |
| 13  |               |                       | 9.00 - 9.50   | 6.54                       | 2.91                   | 19.99         | -    | -    | 0.26           | 20.63        | 73.20                       | 2.46         | 2.31        | 37.64                             | 0.050               |
| 14  |               |                       | 12.50 - 13.00 | 23.30                      | 2.69                   | 38.06         | -    | -    | 0.77           | 43.50        | 81.40                       | 1.87         | 1.52        | 38.04                             | 0.010               |
| 15  |               |                       | 15.00 - 15.50 | 17.62                      | 2.78                   | 20.59         | -    | -    | 0.40           | 28.42        | 123.38                      | 2.32         | 1.98        | 37.72                             | 0.02                |
| 16  |               |                       | 17.00 - 17.50 | 19.57                      | 2.74                   | 25.30         | -    | -    | 0.51           | 33.86        | 104.73                      | 2.16         | 1.81        | 37.06                             | 0.03                |
| 17  |               |                       | 19.50 - 20.00 | 16.96                      | 2.76                   | 30.42         | -    | -    | 0.44           | 30.46        | 106.87                      | 2.25         | 1.92        | 36.15                             | 0.020               |
| 18  |               |                       | 23.00 - 23.50 | 27.40                      | 2.52                   | 67.78         | -    | -    | 1.37           | 57.72        | 50.58                       | 1.36         | 1.07        | 35.50                             | 0.080               |
| 19  |               |                       | 27.00 - 27.50 | 8.00                       | 2.74                   | 18.33         | -    | -    | 0.57           | 36.27        | 38.52                       | 1.94         | 1.79        | 36.21                             | 0.00                |
| 20  |               |                       | 30.50 - 31.00 | 20.07                      | 2.44                   | 87.00         | -    | -    | 0.80           | 44.38        | 61.37                       | 1.62         | 1.35        | 14.01                             | 0.35                |

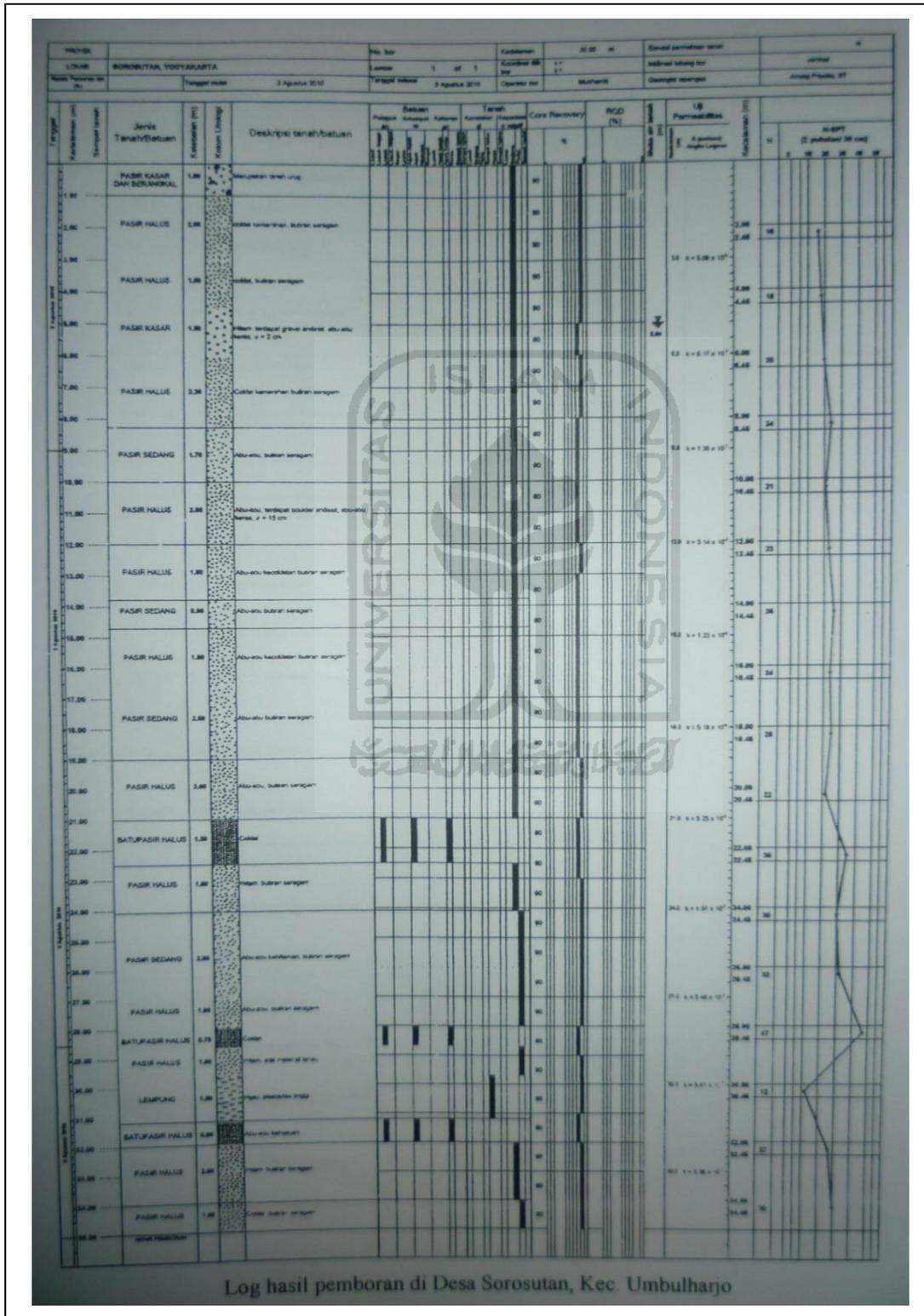
NOTE : Cc and Cu if only finer #200 less than 12 %

## Lampiran 13

### Data Bor

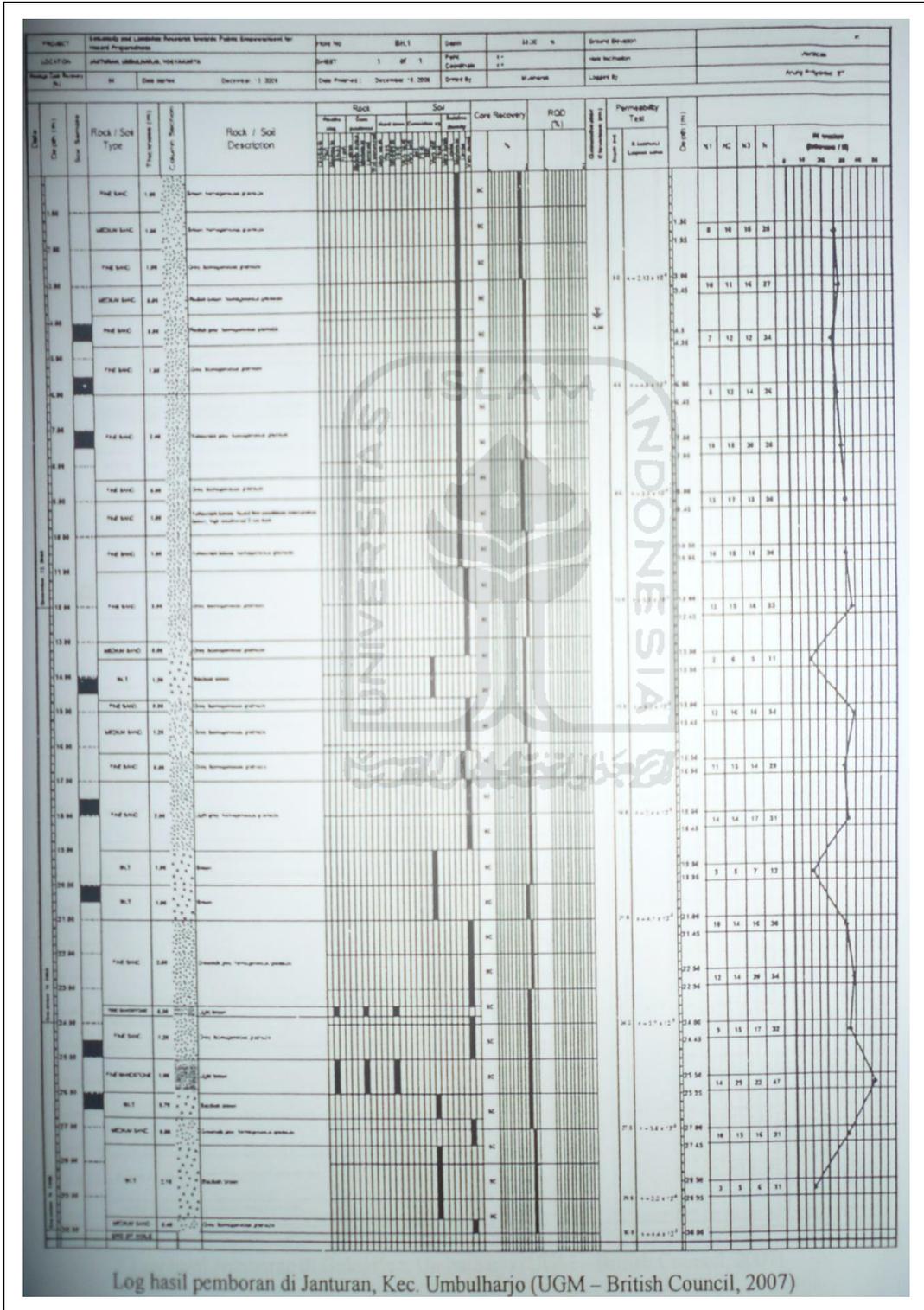


# LOG BOR SOROSUTAN

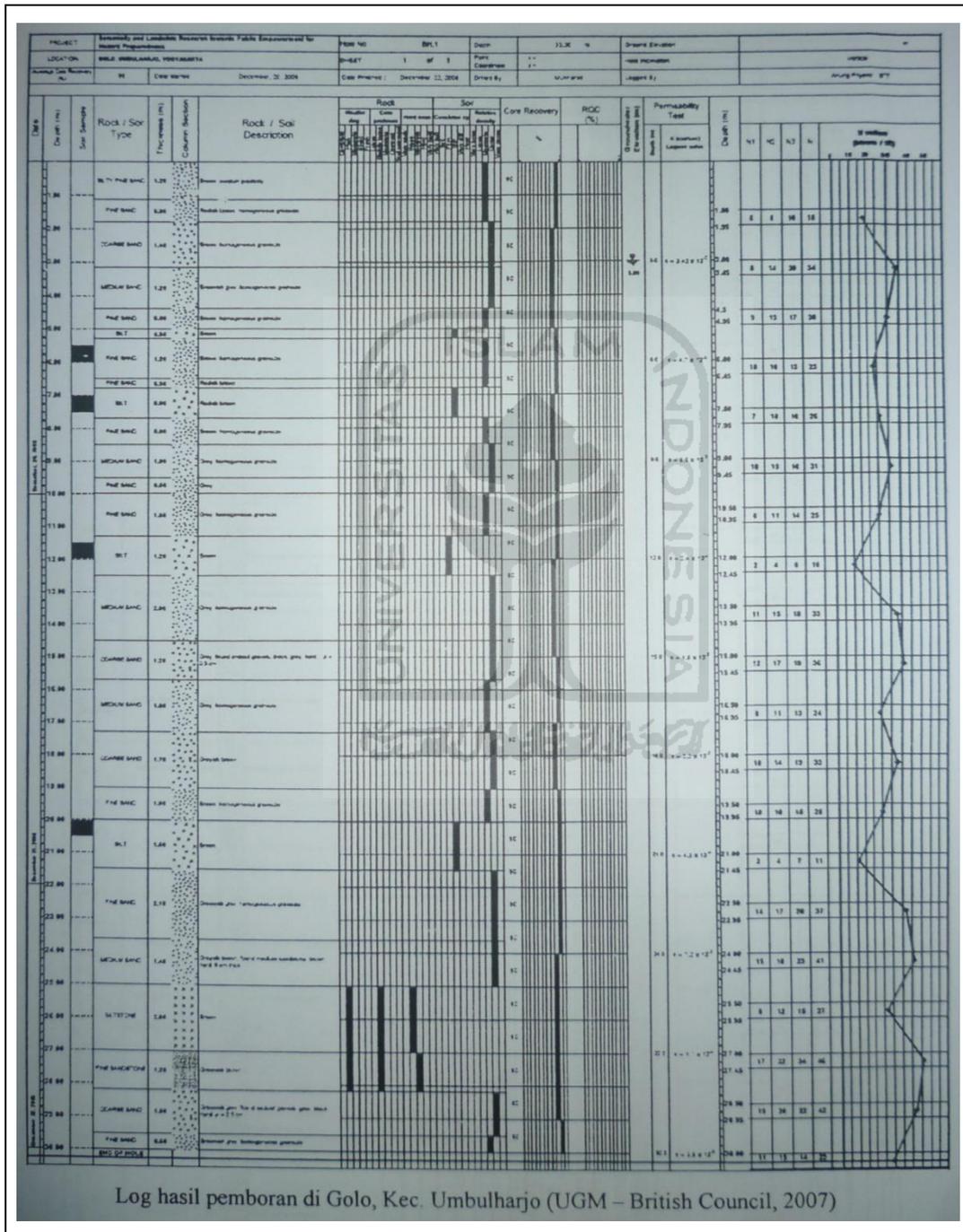




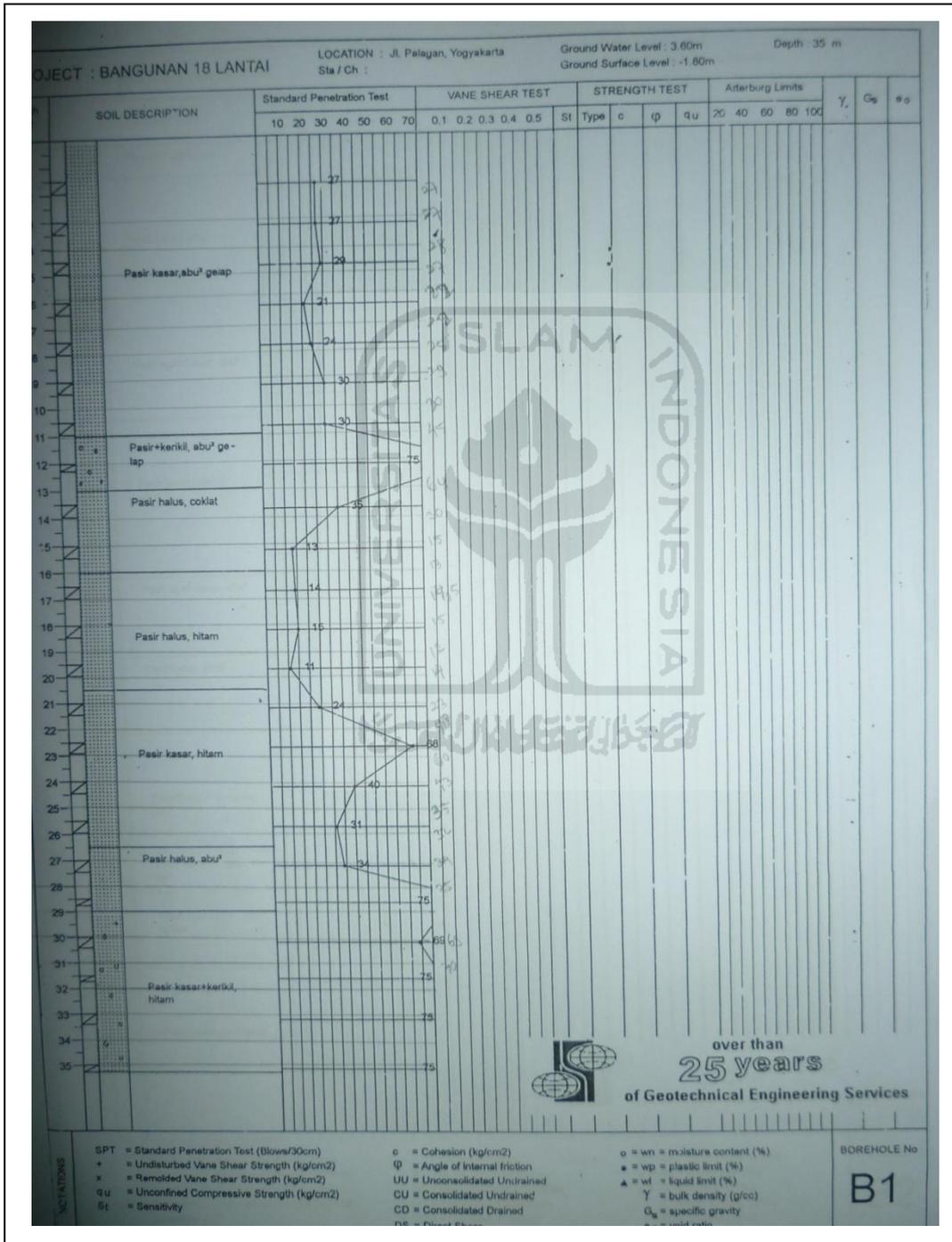
# LOG BOR JANTURAN

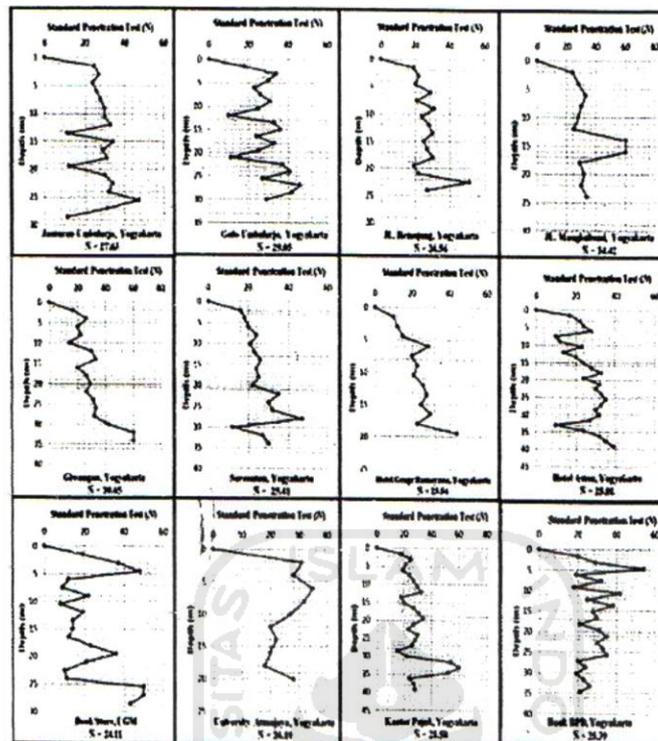


# LOG BOR GOLO

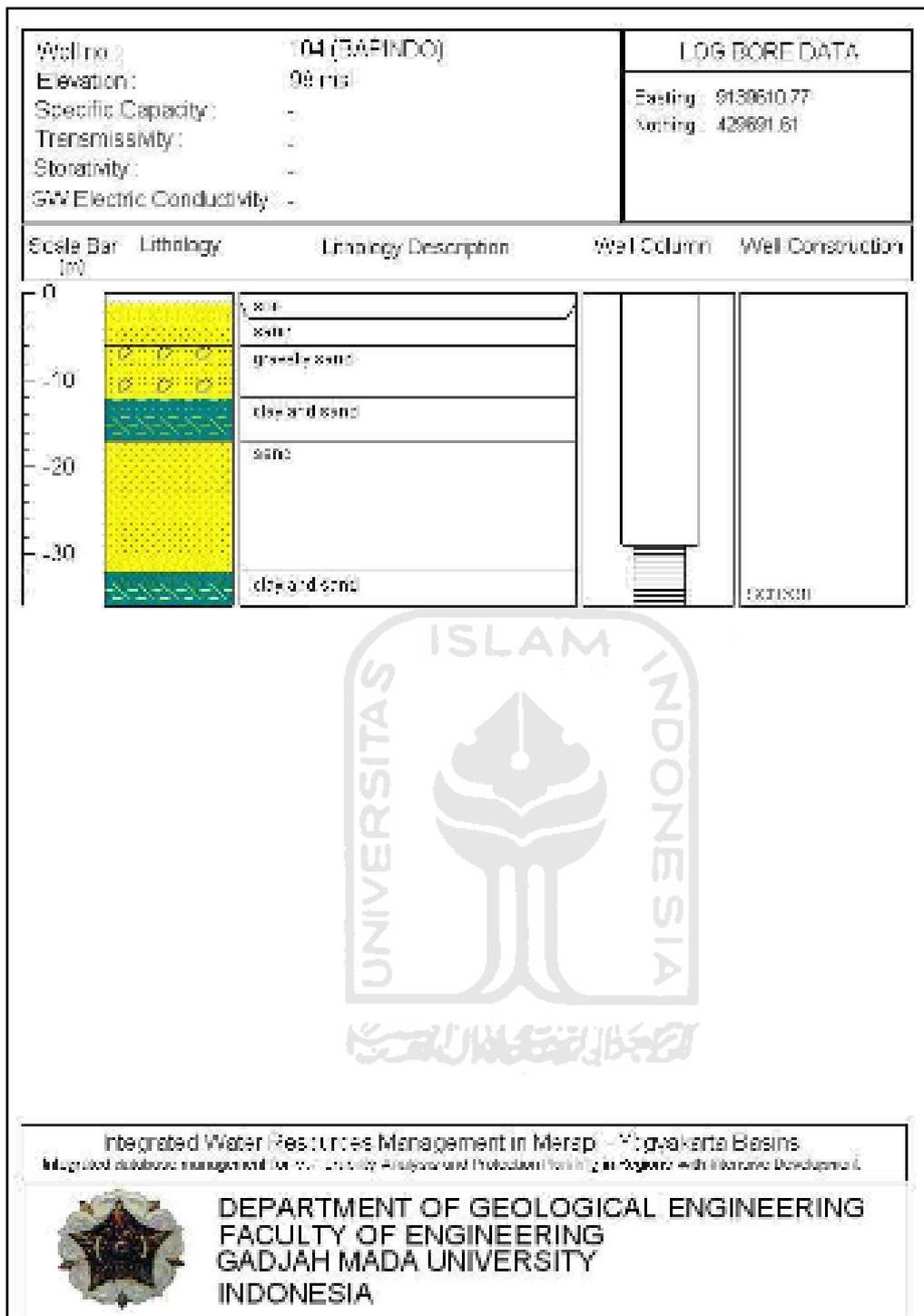


# LOG BOR PALAGAN

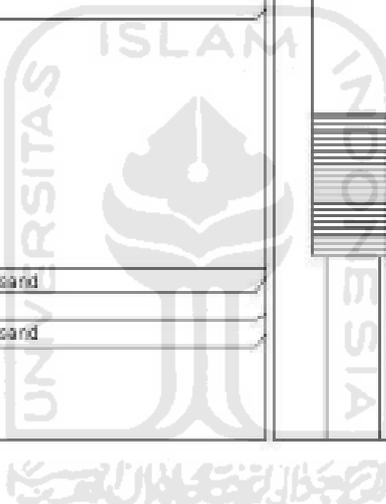
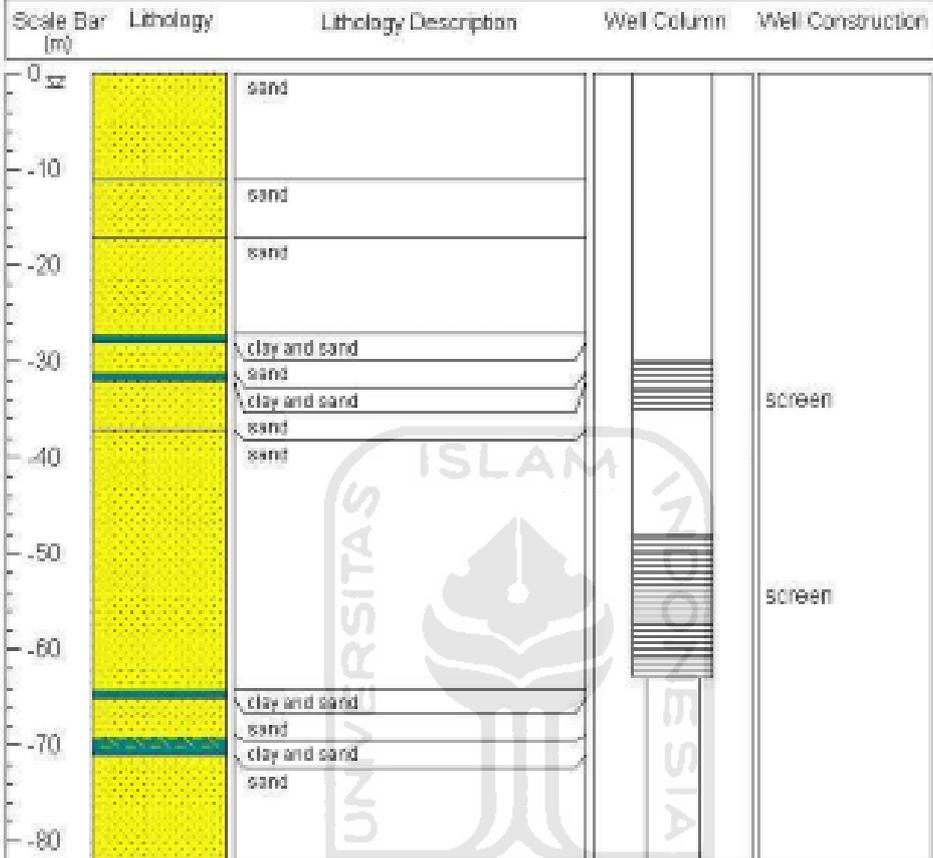




Hasil Standar Penetration Test (SPT) di Yogyakarta (Kyaw, ZL., 2013)



|                              |                         |  |
|------------------------------|-------------------------|--|
| Well no :                    | 119 (YK 08)             | LOG BORE DATA                                |
| Elevation :                  | 82 msl                  |  |
| Specific Capacity :          | 1.32 l/sec/m            |  |
| Transmissivity :             | 223 m <sup>2</sup> /day |  |
| Storativity :                | -                       |  |
| GW Electric Conductivity : - |                         | Easting : 428584.15<br>Northing : 9134767.65 |

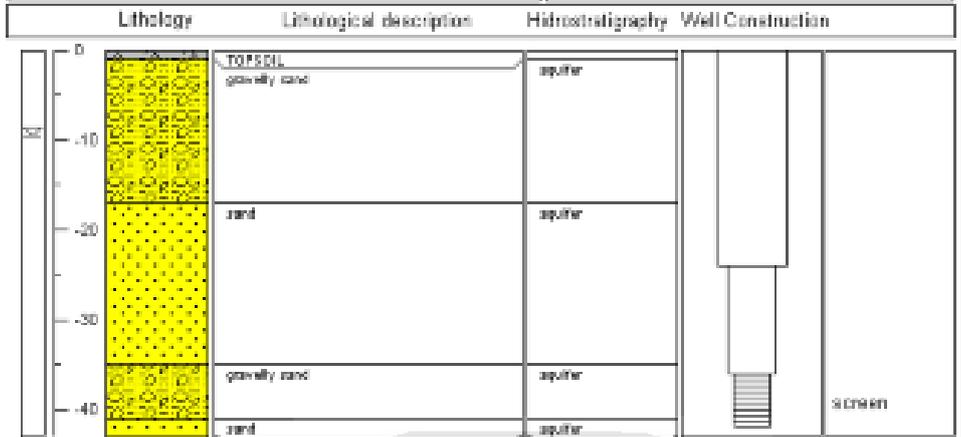


Integrated Water Resources Management in Merapi - Yogyakarta Basins  
 Integrated database management for Vulnerability Analysis and Protection Planning in Regions with Intensive Development



**DEPARTMENT OF GEOLOGICAL ENGINEERING**  
**FACULTY OF ENGINEERING**  
**GADJAH MADA UNIVERSITY**  
**INDONESIA**

|                      |                      |  |              |
|----------------------|----------------------|--|--------------|
| Well Code/Name       | Garuda 01            | Owner  | Garuda Hotel |
| Location             | Kodya Yogyakarta     | Operational status   | Operation    |
| Elevation (max)      | 113                  | Integrated Water Resources Management<br>Merapi - Yogyakarta Basin |              |
| Depth to Groundwater | -9.5 m               | AUN-SECTOR   | JICA         |
| Piezometric/GW table | -                    | Faculty of Engineering - Gadjah Mada University                    |              |
| UTM Position         |                      |  |              |
| Northing : 429990.90 | Easting : 9138821.73 |  |              |



| Well Characteristics                 |             | Water Quality |  |
|--------------------------------------|-------------|---------------|---|
| Specific capacity (L/s/m)            | 1.66 lsec/m | Domestic      |   |
| Transmissivity (m <sup>2</sup> /day) |             | Irigation     |   |
| Hydraulic Conductivity (m/day)       |             | Industry      |   |
| Aquifer Use Class                    |             |               |   |