TESIS

KARAKTERISTIK SITUS DAN KERENTANAN SEISMIK DI KABUPATEN KLATEN DENGAN *METODE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO* (HVSR) DARI DATA MIKROTREMOR

Site Characteristics and Seismic Vulnerabilty at Klaten District with The Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) Method from Microtremor Data

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Pascasarjana Strata Dua Konsentrasi Manajemen Rekayasa Kegempaan

ANGGIT MAS ARIFUDIN

15.914.046

KONSENTRASI MANAJEMEN REKAYASA KEGEMPAAN

PROGRAM PASCA SARJANA MAGISTER TEKNIK SIPIL

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA

YOGYAKARTA

2018

LEMBAR PERSETUJUAN

KARAKTERISTIK SITUS DAN KERENTANAN SEISMIK DI KABUPATEN KLATEN DENGAN *METODE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO* (HVSR) DARI DATA MIKROTREMOR

Oleh :

ANGGIT MAS ARIFUDIN

NIM :15 914 046

Diperiksa dan disetujui oleh :

Pembimbing I :

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

Tanggal : 05/7/2018

Pembimbing II :

Setya Winarno, ST., MT., Ph.D

Tanggal : 04 JULI 2018

ii

HALAMAN PENGESAHAN

KARAKTERISTIK SITUS DAN KERENTANAN SEISMIK DI KABUPATEN KLATEN DENGAN *METODE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO* (HVSR) DARI DATA MIKROTREMOR

Disusun oleh :

ANGGIT MAS ARIFUDIN

15 914 046

Telah diuji di depan Dosen Penguji

Pada tanggal 03 Juli 2018

Dan dinyatakan telah memenuhi syarat untuk diterima

Susunan Dosen Penguji

Dosen Pembimbing I	Dosen Pembimbing II	Dosen Penguji
(Prof. Ir. Widodo, MSCE., Ph.D)	**(Setya Winarno, ST., MT., Ph.D)**	**(Dr. Ir. Lalu Makruf, MT)**

Yogyakarta, 06 Juli 2018

Universitas Islam Indonesia
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil
Ketua Program,

(Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., A.U)

SURAT 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 orang 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 yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya tanggung jawab saya, bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 05 Juli 2018

Yang membuat pernyataan,



ANGGIT MAS ARIFUDIN

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِيْمِ

اَلسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللهِ وَبَرَكَاتُهُ

Alhamdulillaahirabbil'aalamiin, segala puji dan syukur dihaturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan berkah-Nya sehingga penyusunan tesis yang berjudul "**Karakteristik Situs dan Kerentanan Seismik Di Kabupaten Klaten Dengan *Metode Horizontal To Vertical Spectral Ratio* (Hvsr) Dari Data Mikrotremor**",yang juga merupakan salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Magister Teknik (MT) di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia ini dapat diselesaikan dengan baik. Shalawat dan salam senantiasa penulis sampaikan kepada junjungan kita tercinta, Nabi Muhammad SAW, beserta keluarganya, para sahabat, hingga para pengikutnya.

Penulis menyadari bahwa terselesaikannya tesis ini tidak lepas dari bantuan banyak pihak baik yang terlibat secara langsung maupun tidak langsung. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya atas segala bantuan yang telah diberikan kepada:

1. Fathul Wahid, ST., M.Sc., Ph.D., selaku Rektor Universitas Islam Indonesia.
2. Dr. -Ing. Ir. Widodo, M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
3. Prof. Ir. Sarwidi, MSCE., Ph.D., IP-U., selaku Ketua Program Magister Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
4. Prof. Ir. Widodo, MSCE., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak mengarahkan, membimbing dan membantu mencarikan berbagai referensi sehingga penulis banyak mempelajari hal-hal yang baru.
5. Setya Winarno, ST., MT., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan masukan dan motivasi sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan dengan baik.
6. Dr. Ir. Lalu Makruf, MT., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan saran-saran dalam penyusunan tesis ini.

7. Bapak dan Ibu Dosen pada Program Pascasarjana Magister Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia.
8. Staf Pengelola Magister Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia Mbak Fenska, Mbak Febri, Bapak Gandung, Bapak Ponijan, dan khusus kepada Bapak Nur Iman Bashori.
9. Orang Tuaku Bapak Jumarlan, S.Pd dan Ibu Dra. R. Herni Mastuti atas segala doa yang tak pernah putus dan kesabaran yang lebih untuk terus mendorong dan menyemangatiku menyelesaikan tesis ini. *Matur nuwun Pak Buk.*
10. Adikku Bestari Intan Kusumaningtyas yang menemani mengerjakan tesis, membantu pekerjaan kakaknya, teman bercanda, teman seru-seruan, teman bertengkar, terimakasih karena selalu sabar mengahadapi kakakmu ini.
11. Wanita yang aku sayangi dan kagumi Anggir Siti Muthmainnah, S.E yang selalu mengerti keadaanku dikala susah ataupun senang, dan mampu menjadi penyemangatku menyelesaikan tesis ini dan menuju target-target berikutnya. *Love you sayang.*
12. Teman-teman Laboratorium Komputasi Teknik Sipil yang telah memberikan tempat yang nyaman untuk mengerjakan tesis, rasa nyaman sebagai keluarga besar Labkom dan keceriaan disaat susah ataupun senang, khususnya kepada Mas Fiaz Albanna terimakasih atas semua nasihat dan bantuannya.
13. Bapak Ibuknya Mas Faiz dan Bapak Ibuk Agil yang telah memberikan tempat istirahat, fasilitas, arahan, dan bantuan ketika pengambilan data di Klaten selama berhari-hari.
14. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Yogyakarta, Dinas Pekerjaan Umum Kabupaten Klaten, Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (BAPPEDA) Kabupaten Klaten dan BPBD Kabupaten Klaten, serta semua lembaga pemerintah dan perangkat kecamatan/desa/dukuh yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah memberikan data dan informasi dalam penelitian ini.
15. Teman-teman Manajemen Rekayasa Kegempaan 2015 (MRK 7); Limpat Aji Wibowo, Imam Irnawan, Ahmad fajar, (MRK 8); Mas Tirto, Mbak Rita, Trisno, Jeje, Dheka, Mbak Nisya, dan (MRK 9); Shander, Carol.
16. Teman-teman Pusat Inovasi Material Vulkanis Merapi UII atas keseruannya.

17. Revan, Jalil, Aris Widodo, Mudio atas bantuan dan kerja kerasnya ketika pengukuran di lapangan.
18. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya tesis ini.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Penulis berharap semoga hasil penelitian ini dapat bermanfaat dan bisa menjadi acuan dalam perencanaan pembangunan di Kabupaten Klaten sehingga bermanfaat bagi warga wilayah Klaten, sehingga saran dan pengembangan penelitian lebih lanjut sangat diharapkan demi perbaikan di masa yang akan datang.

وَالسَّلَامُ عَلَيْكُمْ وَرَحْمَةُ اللهِ وَبَرَكَاتُهُ

Yogyakarta, Juni 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Hal

LEMBAR PERSETUJUAN.....**Error! Bookmark not defined.**

HALAMAN PENGESAHAN.....**Error! Bookmark not defined.**

SURAT PERNYATAAN.....**Error! Bookmark not defined.**

KATA PENGANTAR iv

DAFTAR ISI viii

DAFTAR TABEL xii

DAFTAR GAMBAR xiii

DAFTAR LAMPIRAN xvi

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL xvii

ABSTRAK xix

BAB I PENDAHULUAN 1

1.1 LATAR BELAKANG 1

1.2 RUMUSAN MASALAH 4

1.3 TUJUAN PENELITIAN 4

1.4 BATASAN MASALAH 5

1.5 MANFAAT PENELITIAN 5

1.6 DEFINISI OPERASIONAL 6

BAB II TINJAUAN PUSTAKA 7

2.1 PENELITIAN TERDAHULU 7

2.1.1 LitBang BMKG (2010) 7

2.1.2 Daryono (2011) 9

2.1.3 Anton Murtono (2013) 10

2.1.4 Sri Mulyati (2015) 11

2.1.5 Ari Sungkowo (2016) 12

2.1.6 Dewi Wahyu Ratnasari (2017) 14

2.1.7 Yulistiani (2017) 14

2.1.8 Gurler *et al.* (2000) 16

2.1.9 Nakamura (2008) 17

2.1.10 Mahajan, A.K *et al* (2011) 18
2.2 KEASLIAN PENELITIAN 19
BAB III LANDASAN TEORI 26
3.1 GEMPA BUMI 26
3.1.1 Pengertian Gempa Bumi 26
3.1.2 Parameter Gempa Bumi 27
3.2 KONDISI GEOLOGI DAN KEGEMPAAN 29
3.2.1 Kondisi Geologi Klaten 29
3.2.2 Sejarah Kegempaan Klaten 31
3.3 SEISMOGRAF 32
3.4 MIKROTREMOR 34
3.5 METODE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR) 35
3.6 SITE EFFECT 38
3.7 FAKTOR AMPLIFIKASI SPEKTRUM TANAH (Ag) 41
3.8 FREKUENSI DOMINAN TANAH (fg) DAN PERIODE DOMINAN (Tg) 42
3.9 KETEBALAN SEDIMEN TANAH (h) 44
3.10 INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg) 45
3.11 PEAK GROUND ACCELERATION (PGA) 45
3.12 KECEPATAN GELOMBANG GESER (Vs) 48
3.13 REGANGAN GESER TANAH (*GROUND SHEAR STRAIN*) 50
3.14 INVERSI KURVA HVSR 51
3.15 LIKUIFAKSI 51
BAB IV METODOLOGI PENELITIAN 54
4.1 LOKASI PENELITIAN 54
4.2 PERALATAN DAN TEKNIK PENGUMPULAN DATA 54
4.2.1 Peralatan 54
4.2.2 Teknik Pengumpulan Data 56
4.3 PENGOLAHAN DATA 61
4.3.1 Pengolahan Data Mikrotremor 61

4.3.2 Perhitungan Frekuensi Dominan (f_0), Faktor Amplifiksi (*Ag*), dan Periode Dominan (*Tg*) 61
4.3.3 Perhitungan Ketebalan Sedimen (*h*) 64
4.3.4 Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik (*Kg*) 65
4.3.5 Perhitungan Nilai Percepatan Tanah Puncak (PGA) 65
4.3.6 Perhitungan Nilai Kecepatan Gelombang Geser (*Vs*) 65
4.3.7 Perhitungan Nilai Vs30 66
4.3.8 Perhitungan *Ground Shear Strain* (GGS) atau Regangan Geser Tanah 66
4.3.9 Kondisi Bawah Permukaan 67
4.3.10 Analisis Likuifaksi 67
4.3.11 Peta Kerentanan Seismik 67
4.4 DIAGRAM ALUR PENELITIAN 67
BAB V ANALISIS DAN PEMBAHASAN 69
5.1 PENGOLAHAN DATA 69
5.1.1 Pengolahan Data Mikrotremor 69
5.1.2 Topologi Kurva HVSR 76
5.1.3 Mikrozonasi Nilai Faktor Amplifikasi Tanah (Ag) 81
5.1.4 Mikrozonasi Nilai Frekuensi Dominan Tanah (fg) 83
5.1.5 Mikrozonasi Nilai Periode Dominan Tanah (Tg) 84
5.1.6 Mikrozonasi Ketebalan Sedimen (h) 86
5.1.7 Mikrozonasi Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg) 87
5.2 PGA BERDASARKAN SURVEI MIKROTREMOR (PGA KANAI) . 88
5.3 PARAMETER DINAMIK TANAH 91
5.3.1 Kecepatan Gelombang Sekunder (vs) Inversi Kurva HVSR Mikrotremor 91
5.3.2 Perbandingan Vs30 Mikrotremor dan Vs30 USGS 93
5.3.3 Regangan Geser Tanah (γ) 95
5.4 HUBUNGAN REGANGAN GESER TANAH (γ), KEDALAMAN MUKA AIR TANAH, DAN POTENSI LIKUIFAKSI 96
5.5 TINGKAT KERENTANAN SEISMIK DI WILAYAH KABUPATEN KLATEN 97

5.6 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg), REGANGAN GESER (γ), DAN PERCEPATAN TANAH (α) 102
5.7 HUBUNGAN FREKUENSI DOMINAN (fg), DAN KETEBALAN SEDIMEN TANAH (h) 103
5.8 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK DENGAN RASIO KERUSAKAN RUMAH 104
5.9 HUBUNGAN TINGKAT KERENTANAN SEISMIK DAN RASIO KERUSAKAN RUMAH 106
5.10 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg) DAN KEDALAMAN MUKA AIR SUMUR 107
5.11 PGA DAN REGANGAN GESER *(GROUND SHEAR STRAIN)* PERLAPISAN 108
5.11.1 Analisis *Spectral Matching* untuk daerah Kabupaten Klaten 110
5.11.2 Analisis PGA dan Regangan Geser Tanah Perlapisan 114
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN 121
6.1 KESIMPULAN 121
6.2 SARAN 122
DAFTAR PUSTAKA 123

DAFTAR TABEL

Hal

Tabel 2.1 Rangkuman Penelitian Terdahulu 21
Tabel 3.1 Intensitas Gempabumi Skala MMI (*Modified Mercally Intensity*) 28
Tabel 3.2 Sejarah Gempa Merusak di Yogyakarta dan Klaten 31
Tabel 3.3 Klasifikasi tanah konversi Kanai & Tanaka dengan Omote-Nakajima (Gunawan dan Subardjo, 2005; Pitilakis *et. al*., 2004). 43
Tabel 3.4 Hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah (Nakamura, 1997) 53
Tabel 4.1 Syarat pengukuran mikrotremor (SESAME, 2004) 60
Tabel 5.1 Data Gempa Jogja 26 Mei 2006 dari USGS 72
Tabel 5.2 Rekapitulasi Nilai vs Titik 10 75
Tabel 5.3 Hubungan regangan geser, fenomena, dan kedalaman air sumur 97
Tabel 5.4 Klasifikasi Kg 98
Tabel 5.5 Klasifikasi PGA Kanai 98
Tabel 5.6 Klasifikasi regangan geser 98
Tabel 5.7 Klasifikasi Vs30 98
Tabel 5.8 Klasifikasi kedalaman air sumur 98
Tabel 5.9 Nilai R2 dan Pembobotan Parameter Kerentanan Seismik 101
Tabel 5.10 Jumlah Rumah rusak di Kabupaten Klaten (Bappeda Klaten, 2006) 106
Tabel 5.11 Perhitungan Spektrum Target dengan atenuasi PSA Boore et, al. 111
Tabel 5.12 Input soil profil titik bor Gereja Wedi 114
Tabel 5.13 Hasil perhitungan PGA dalam satuan g pada permukaan tanah dari masing – masing *input motion* 114
Tabel 5.14 Hasil perhitungan Regangan Geser Tanah dalam % dari masing – masing *input motion* 115

DAFTAR GAMBAR

Hal

Gambar 2.1 Peta Tektonik dan Lempeng Indonesia 1
Gambar 2.2 Peta Intensitas Gempa Bumi DIY dan Jawa Tengah 2
Gambar 2.1 Tingkat Kerawanan Bahaya Gempa Bumi Kab. Bantul 8
Gambar 2.2 Peta Kerusakan Bangunan Akibat Gempa di Bantul 8
Gambar 2.3 Peta Persebaran Spasial Indeks Kerentanan Seismik berdasarkan Mikrotremor di Zona Graben Bantul (Daryono, 2011)..... 10
Gambar 2.4 Peta distribusi indeks kerentanan seismik (Kg) 13
Gambar 2.5 Peta Mikrozonasi nilai GGS di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno (Yulistiani, 2017)..... 15
Gambar 2.6 Peta Distribusi Indeks Kerentanan Seismik dan Data Kerusakan Di Mexico City..... 17
Gambar 2.7 Nilai indeks kerentanan seismik (Kg) setelah gempa di Loma Prieta tahun 1989 (Nakamura, 2008)..... 18
Gambar 2.8 Model Vs dari inversi kurva H/V di Jammu City, Hilamaya India (Mahajan, AK *et al.* 2012) 19
Gambar 2.9 Peta Administrasi Kabupaten Klaten (BAPPEDA, 2011) 20
Gambar 3.1 Mekanisme terjadinya gempa bumi (Thomson, 2008)..... 27
Gambar 3.2 Peta Geologi Lembar Surakarta-Giritontro dan Wilayah Penelitian (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi) 30
Gambar 3.3 Data lokasi episenter, mainshock, aftershock, dan patahan gempa 32
Gambar 3.4 Seismometer tipe DS-4A..... 33
Gambar 3.5 Digitizer tipe TDL-303S 33
Gambar 3.6 Contoh data Mikrotremor Kecamatan Gantiwarno (Titik 10) 34
Gambar 3.7 Karakteristik Seismogram Mikrotremor 35
Gambar 3.8 Ilustrasi prinsip metode HVSR mikrotremor 36
Gambar 3.9 Frekuensi resonansi f0 dan puncak spektrum Ag..... 36
Gambar 3.10 Shear deformation of surface layer 37
Gambar 3.11 Model cekungan yang berisi material sedimen..... 40

Gambar 3.12 Model dua lapisan: *bedrock* dan sedimen 44
Gambar 3.13 Ilustrasi terjadinya likuifaksiakibat gempa 52
Gambar 4.1 Perangkat Keras Pengukuran Mikrotremor..... 56
Gambar 4.2 Peta Geologi Kabupaten Klaten 57
Gambar 4.3 Rencana titik perekaman mikrotremor berdasarkan topografi..... 58
Gambar 4.4 Rencana titik pengukuran mikrotremor dan bor 59
Gambar 4.5 Sinyal mikrotremor tiga komponen di Kecamatan Gantiwarno..... 61
Gambar 4.6 Contoh windowing sinyal pada titik 14..... 62
Gambar 4.7 Tahap-tahap Metode HVSR (Ari Sungkowo, 2016)..... 64
Gambar 4.8 Kurva HSR Titik 22 64
Gambar 4.9 Analisis Nilai Vs dengan Dinver..... 66
Gambar 4.10 Diagram Alur Penelitian..... 68
Gambar 5.1 Rekaman mikrotremor tiga komponen Titik 10 (UD, EW dan NS) 70
Gambar 5.2 *Windowing* sinyal mikrotremor Titik 10 70
Gambar 5.3 Kurva HVSR Titik 10 71
Gambar 5.4 Tampilan Inversi kurva HVSR Dinver..... 74
Gambar 5.5 Hasil Akhir *ground profile* Titik 10 75
Gambar 5.6 Kurva HVSR dengan satu puncak jelas (Titik 22)..... 77
Gambar 5.7 Kurva dengan dua puncak *(double peak)* Titik 25 78
Gambar 5.8 Kurva dengan puncak lebar..... 79
Gambar 5.9 Distribusi Tipe Kurva HVSR 80
Gambar 5.10 Peta faktor amplifikasi tanah (A_g)..... 82
Gambar 5.11 Peta frekuensi dominan tanah (*fg*)..... 84
Gambar 5.12 Peta periode dominan tanah (T*g*) 85
Gambar 5.13 Peta ketebalan sedimen (H)..... 86
Gambar 5.14 Peta Indeks Kerentanan Sesimik (Kg) 88
Gambar 5.15 Peta nilai PGA Kanai (gal)..... 89
Gambar 5.16 Peta nilai PGA Kanai (g)..... 90
Gambar 5.17 Peta distribusi getaran (*shakemap*) USGS gempa Jogja 27 Mei... 90
Gambar 5.18 Peta distribusi Nilai Vs Mikrotremor..... 92
Gambar 5.19 Peta Jenis Tanah berdasarkan Nilai Vs 92
Gambar 5.20 Peta distribusi Nilai Vs30 Mikrotremor..... 93

Gambar 5.21 Peta distribusi Nilai Vs30 USGS 94
Gambar 5.22 Perbandingan Secara Visual Hasil Vs30 Mikrotremor dengan Vs30 USGS..... 94
Gambar 5.23 Peta distribusi regangan geser tanah (γ)..... 95
Gambar 5.24 Peta distribusi kedalaman air sumur..... 96
Gambar 5.25 Grafik Hubungan Kg dengan Rasio Kerusakan Rumah..... 99
Gambar 5.26 Grafik Hubungan Kedalaman Muka Air Sumur dengan Rasio Kerusakan Rumah 99
Gambar 5.27 Grafik Hubungan Vs30 dengan Rasio Kerusakan Rumah..... 100
Gambar 5.28 Grafik Hubungan PGA Kanai dengan Rasio Kerusakan Rumah.. 100
Gambar 5.29 Grafik Hubungan Regangan Geser dengan Rasio Kerusakan..... 100
Gambar 5.30 Peta tingkat kerentanan seismik Kabupaten Klaten 102
Gambar 5.31 Grafik Hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen. 103
Gambar 5.32 Grafik Hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen dari data penelitian Daryono (2011), Nurul Hudayat (2015), dan penulis 104
Gambar 5.33 Rasio Kerusakan Rumah kabupaten Klaten..... 105
Gambar 5.34 Hubungan indeks kerentanan seismik dengan rasio kerusakan 105
Gambar 5.35 Peta tingkat kerentanan seismik dengan rasio kerusakan..... 107
Gambar 5.36 Hubungan antara kedalaman air sumur dengan indeks kerentanan seismik..... 108
Gambar 5.37 Lokasi Titik Bor Gereja Wedi..... 109
Gambar 5.38 Spektrum Target..... 111
Gambar 5.39 Respon spektral original, matched, dan target dari dua gempa..... 112
Gambar 5.40 *Time history* hasil matching dari tiga gempa 113
Gambar 5.41 Grafik *Maximum Acceleration* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten . 116
Gambar 5.42 Grafik *Maximum Shear Strain* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten.. 117
Gambar 5.43 Grafik *Maximum Relative Displacement* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten 118

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Pengukuran Lapangan
Lampiran 2. Data Pengukuran Mikrotremor
Lampiran 3. Ketebalan Sedimen & *Vs*
Lampiran 4. Pga Kanai
Lampiran 5. *Ground Profile* Inversi Kurva Hvsr
Lampiran 6. Vs30 Mikrotremor, Vs30 Usgs, & Rasio Vs30
Lampiran 7. Pembobotan Kerentanan Seismik
Lampiran 8. Data Bor
Lampiran 9. Peta Mikrozonasi Hasil Penelitian
Lampiran 10. Peta Kontur Hasil Penelitian

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

a_b	Percepatan getaran di *bedrock*
A_g	Faktor amplifikasi spektrum tanah (nilai puncak kurva HVSR)
A_{gd}	Faktor perbesaran *displacement*
A_{gk}	Faktor perbesaran kecepatan getaran
A_{ga}	Faktor perbesaran cepatan getaran
A_m	Simpangan Maksimum
a_s	Percepatan getaran di *surface*
Δ	Jarak hipocenter
d_b	*Displacement* di *bedrock*
d_s	*Dispalcement* di *surface*
Fg	Frekuensi dominan tanah
$G(T)$	Faktor perbesaran/amplifikasi
γ	*Ground shear strain*
γ_c	*Cyclic ground shear starin* h Ketebalan sedimen
k_b	Kecepatan getaran di *bedrock*
K_g	Indek kerentanan seismik
k_s	Kecepatan getaran di *surface*
λ	Panjang gelombang
M	Magnitudo
η	Viskositas
S_{HS}	Spektra fourier komponen horisontal di *surface* (tanah permukaan)
S_{HB}	Spektra fourier komponen horisontal di *bedrock*
S_{VB}	Spektra fourier komponen vertikal di *bedrock*
τ_c	*Cyclic shear stress*
t	Waktu
T	Periode
T_g	Periode dominan tanah
T_H	Fungsi transfer gelombang SH dari bedrock ke lapisn tanah permukaan
T_m	Periode maksimum

v_p	Kecepatan gelombang Primer
v_s	Kecepatan gelombang Sekunder
v_{sb}	Kecepatan gelombang Sekunder di *bedrock*
v_{ss}	Kecepatan gelombang Sekunder di *surface*
$Vs30$	Kecepatan rata-rata gelombang sekunder sampai kedalaman 30 meter
ρ	Densitas
ξ	Damping ratio
z	Kedalaman

ABSTRAK

Telah dilakukan penelitian kerentanan seismik dan karakteristik dinamik tanah di Kabupaten Klaten menggunakan data mikrotremor. Penelitan ini dilakukan untuk membuat peta mikrozonasi faktor frekuensi dominan (f_g), amplifikasi tanah (A_g), indeks kerentanan seismik (K_g), percepatan tanah puncak (PGA), regangan geser tanah (γ), ketebalan sedimen (h) dan kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter (Vs30) dari data mikrotremor 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 dengan acuan gempa bumi Jogja 27 Mei 2006 dan *software* NERA.

Hasil penelitian menunjukan bahwa sebaran nilai frekuensi dominan (f_g) berkisar antara 0,6232 Hz sampai 13,853 Hz, faktor amplifikasi tanah (A_g) berkisar antara 1,0968 sampai 26,1338, indeks kerentanan seismik (K_g) berkisar antara 0,2123 sampai 270,1838, percepatan tanah puncak (PGA) Kanai berkisar antara 123,324 gal sampai 819,353 gal, regangan geser tanah (γ) berkisar antara 0.00011 (0,011 %) sampai dengan 0.1758 (17,58 %), ketebalan sedimen (h) berkisar antara 5,106 m sampai 113,6488 m dan kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter (Vs30) mikrotremor berkisar antara 199,256 m/s sampai dengan 997,693 m/s.

Nilai K_g, *PGA*, γ, relatif tinggi, kedalaman air sumur relatif dangkal dan Vs30 relatif rendah di daerah penelitian pada umumnya terdapat di bagian selatan dari Kabupaten Klaten di sebagian besar wilayah Kecamatan Gantiwarno, Wedi dan Prambanan bagian selatan yang mengalami kerusakan parah. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara tingkat kerusakan dengan indeks kerentanan siesmik, regangan geser tanah, *PGA*, kedalaman air sumur, dan Vs30 sebagaimana ditunjukkan pada peta tingkat kerentanan seismik Kabupaten Klaten.

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 District of Klaten. This study was conducted to map the distribution of dominan frequency (f_g), ground amplification factor (A_g), Vulnerability index (K_g), Peak ground acceleration (PGA), Ground shear strain (γ), the thickness of the sedimen layer (h), and shear velocity until 30 meters depth (Vs30) from microtremor data and 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 analize data using Horizontal to vertical Spectral Ratio (HVSR). Peak ground acceleration in ground surface layer was calculated using Kanai empirical equation with reference Yogyakarta earthquake event 27 Mei 2006 and NERA software.

The result of this research shows us that, distribution of dominan frequency (f_g) 0,6232 Hz to 13,853 Hz, ground amplification factor (A_g) value ranged form 1,0968 to 26,1338, vulnerability index (K_g) ranged from 0,2123 to 270,1838, Peak ground acceleration (PGA) Kanai 123,324 gal to 819,353 gal, ground shear strain (γ) ranged from 0,00011 (0,011 %) to 0,1758 (17,58 %), the thickness of the sedimen layer (h) ranged from 5,106 m to 113,6488 m, shear velocity until 30 meters depth (Vs30) microtremor ranged from 199,256 m/s to 997,693 m/s.

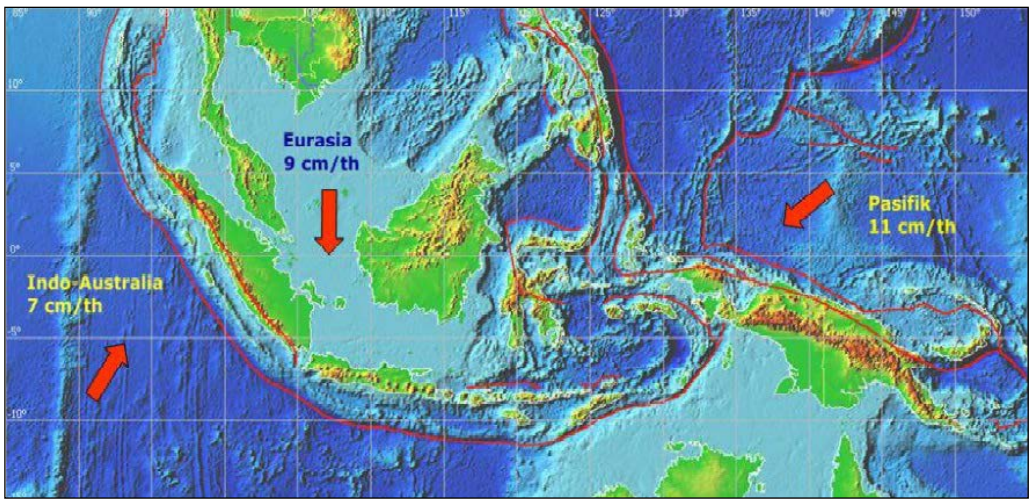
High value of K_g, PGA, γ, shallow well water depth and low value of Vs30 commonly contained in south side District of Klaten in large part Gantiwarno sub district, Wedi, and south side of Prambanan which suffered the heavy damage level. It is shows the relationship of the damage level with vulnerability index (K_g), ground shear strain (γ), peak ground acceleration (PGA), well water depth, and shear velocity until 30 meters depth (Vs30) which showed with the seismik vulnerability level map District of Klaten.

Keyword : Microtremor, PGA, seismic vulnerability index, ground shear strain, HVSR

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

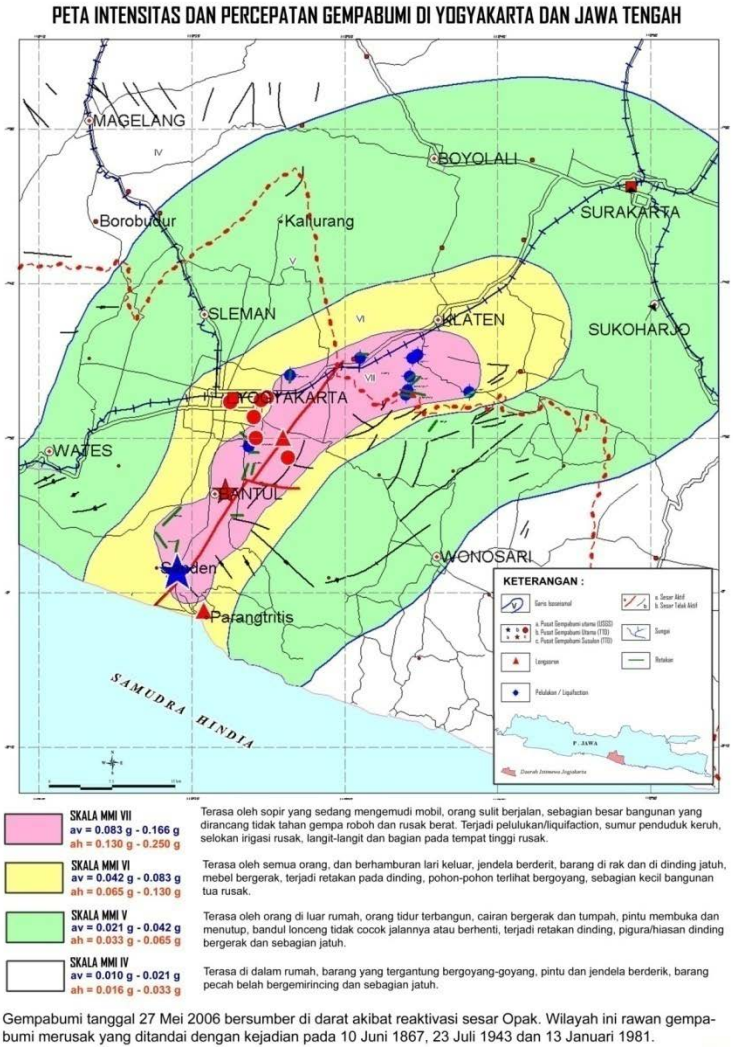
Indonesia merupakan titik temu antara tiga lempeng besar dunia, yaitu Lempeng Pasifik, Lempeng Eurasia, dan Lempeng Hindia-Australia yang lazim disebut *Triple Junction* seperti bisa dilihat pada **Gambar 2.1**. Pergerakan Lepeng Hidia-Australia setiap tahunnya sekitar 7 cm ke arah utara, Lempeng Pasifik sekitar 11 cm tiap tahunnya ke arah barat daya, dan lempeng Eurasia sekitar 9 cm tiap tahunnya ke arah selatan. Dampak pergerakan lempeng *triple junction* menyebabkan kepulauan Indonesia mempunyai tingkat kegempabumian cukup tinggi sehingga rawan gempabumi tektonik.



Gambar 2.1 Peta Tektonik dan Lempeng Indonesia

Adanya zona subduksi aktif ini menyebabkan daerah di sekitar jalur subduksi ini mempunyai tingkat kegempaan tinggi, termasuk wilayah Klaten, Jawa Tengah seperti bisa dilihat pada **Gambar 2.2**. Salah satu gempa bumi yang mengakibatkan kerusakan parah di Kabupaten Klaten yaitu gempa bumi Yogyakarta terjadi pada Sabtu, 27 Mei 2006, pukul 05.55 pagi dengan kekuatan 6,3 SR. Gempabumi terjadi akibat tumbukan dua lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia yang terjadi lebih kurang 37 km di

Selatan Kota Yogyakarta dengan kedalaman 33 km di bawah permukaan laut. Gempa bumi menjadi begitu dahsyat dampaknya, karena adanya pergeseran Patahan Opak dari Bantul hingga ke Prambanan sepanjang 40 km dengan arah 30º Timur Laut dengan menghasilkan hiposenter gempa berkedalaman dangkal 17,1 km (BAPPENAS, 2006).



Gambar 2.2 Peta Intensitas Gempa Bumi DIY dan Jawa Tengah (PVMBG, 2006)

Sektor yang mengalami kerusakan dan kerugian terparah pada kejadian gempabumi adalah sektor perumahan dibandingkan dengan sektor lainnya (Media Center DIY, 2006). Penyebab utama kerusakan adalah banyaknya bangunan yang tidak memiliki konstruksi tahan gempa bumi dan menggunakan bahan bangunan yang kurang berkualitas untuk menahan guncangan gempa bumi dahsyat. Selain

itu, rumah yang terkena dampak gempabumi tektonik telah berusia antara 15 hingga 25 tahun.

Gempabumi Yogyakarta mengakibatkan 5.716 orang meninggal, 126.326 tempat tinggal rusak berat, dan 1.275 infrastruktur rusak parah. Wilayah yang mengalami kerusakan terparah di Jawa Tengah adalah Kabupaten Klaten, dengan 1.041 orang meninggal, 30.300 rumah rata dengan tanah, dan 76 bangunan pemerintah rusak. Sebagian besar wilayah Klaten yang mengalami kerusakan parah yaitu Kecamatan Wedi dan Kecamatan Gantiwarno.

Kerusakan yang terjadi akibat gempa bumi Yogyakarta ini ternyata memiliki pola persebaran yang tidak merata, tidak teratur, dan blok-blok wilayah tertentu. Kondisi geologi dan jenis tanah memegang peranan penting dalam menimbulkan tingkat kerusakan. Daerah yang dekat dengan sumber gempa tidak semuanya rusak parah sedangkan yang jauh dari pusat gempa tidak aman secara keseluruhan. Seperti ditunjukkan pada kerusakan yang terjadi di wilayah Wedi dan Gantiwarno yang jauh dari sumber gempa mengalami kerusakan parah, sedangkan di wilayah Kota Bantul yang lebih dekat dengan sumber gempa justru tidak mengalami kerusakan parah. Lapisan tanah lunak dan tebal yang berada di atas batuan dasar bisa meningkatkan faktor amplifikasi gelombang gempabumi dan efek pantulan gelombang gempa bumi dari batuan dasar. Cepat rambat gelombang juga akan sangat lambat pada lapisan lunak dibanding dengan lapisan keras. Wilayah yang termasuk dalam kategori rawan bencana gempa bumi yaitu wilayah yang memiliki nilai amplifikasi tanah cukup besar. Nilai amplifikasi tanah dipengaruhi oleh nilai periode dominan tanah dan ketebalan sedimen, semakin tebal nilai ketebalan sedimen tanah maka nilai periode dominan dan amplifikasi tanah akan semakin besar pula. Dengan kata lain ketebalan sedimen sangat mempengaruhi besar kecilnya guncangan saat terjadi gempa bumi.

Gempa bumi merupakan bencana yang tidak dapat diprediksi kapan, dimana dan berapa kekuatan kejadiannya. Hal efektif yang bisa dilakukan oleh pemerintah dan masyarakat yaitu melakukan usaha mitigasi dengan cara mengetahui penyebab dan zona-zona yang sangat rawan hingga zona yang relatif aman terhadap bahaya gempabumi. Dalam penelitian ini akan dilakukan pengukuran mikrotremor yaitu getaran tanah dengan amplitudo mikrotremor yang

dapat ditimbulkan oleh peristiwa alam dan sktifitas angin, gelombang laut, mesin, kendaraan, dan lain-lain. Pengukuran di beberapa titik ukur di wilayah Kabupaten Klaten bagian selatan untuk mengetahui tingkat kerentanan gempa bumi dan karakteristik dinamik tanah sebagai salah satu upaya mitigasi gempa bumi. Getaran mikrotremor diukur di permukaan dilakukan dengan sismograf. Data mikrotremor selanjutnya diolah untuk memperoleh nilai faktor amplifikasi spektrum tanah, frekuensi resonansi dan perioda dominan tanah, selanjutnya diolah untuk mendapatkan nilai indeks kerentanan seismik (*Kg*), nilai kecepatan gelombang geser (*vs*), nilai percepatan tanah maksimum (PGA), ketebalan sedimen tanah (h), regangan geser tanah (γ), dan modulus geser (G) di wilayah kabupaten Klaten. Hasil penilaian diharapkan dapat memberikan gambaran tingkat kerentanan wilayah Kabupaten Klaten yang dapat dipertimbangkan sebagai bahan penataan ruang dan pengembangan wilayah.

1.2 RUMUSAN MASALAH

Dari uraian latar belakang di atas dapat dirumuskan permasalahan, yaitu :

1. Bagaimana peta distribusi nilai faktor amplifikasi sinyal, frekuensi dominan, dan periode dominan di Kabupaten Klaten bagian selatan berdasarkan data mikrotremor ?
2. Bagaimana peta distribusi nilai indeks kerentanan seismik (Kg), nilai percepatan tanah puncak (PGA), nilai karakteristik dinamik tanah dalam bentuk kecepatan gelombang geser (vs) dan nilai regangan geser tanah (γ) ?
3. Bagaimana tingkat kerentanan seismik di Kabupaten Klaten ?

1.3 TUJUAN PENELITIAN

Berdasarkan rumusan masalah di atas maka tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah :

1. Membuat peta distribusi nilai faktor amplifikasi sinyal, frekuensi dominan, dan periode dominan di Kabupaten Klaten bagian selatan berdasarkan data mikrotremor.

2. Membuat peta distribusi nilai indeks kerentanan seismik (Kg), nilai percepatan tanah puncak (PGA), nilai karakteristik dinamik tanah dalam bentuk kecepatan gelombang geser (v_s) dan nilai regangan geser tanah (γ).
3. Mengetahui tingkat kerentanan seismik di Kabupaten Klaten.

1.4 BATASAN MASALAH

Penelitian ini dibatasi sebagai berikut :

1. Daerah penelitian terletak pada wilayah yang dibatasi oleh koordinat secara geografis, antara 110º29’56,4” - 110º40’58,8” BT dan 07º41’13,2” - 07º48’14,4” LS meliputi 9 kecamatan di wilayah Kabupaten Klaten, yaitu Kecamatan Gantiwarno, Wedi, Bayat, Kalikotes, Klaten Tengah, Klaten Selatan, Jogonalan, Prambanan, Trucuk dan sebagian wilayah Kabupaten Gunung Kidul yang berbatasan dengan Kabupaten Klaten.
2. Pengambilan data mikrotremor mengacu pada aturan yang ditetatpkan oleh SESAME *European Research Project* (SESAME, 2004).
3. Sinyal mikrotremor diukur menggunakan *Digital Portable Seismograph* tipe TDL-303S dengan titik penelitian sebanyak 111 titik.
4. Penelitian ini difokuskan pada analisis kurva H/V untuk mendapatkan informasi tentang frekuensi dominan tanah, faktor amplifikasi spektrum tanah, indeks kerentanan seismik, kecepatan gelombang geser, dan percepatan tanah puncak.
5. Perhitungan nilai PGA di Kabupaten Klaten yang dilakukan peneliti dengan menggunakan rumusan atenuasi gempa Kanai 1966 dalam John Douglas, 2011.

1.5 MANFAAT PENELITIAN

Hasil penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut :

1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai tingkat kerawanan gempabumi di wilayah Klaten bagian selatan khususnya Kecamatan Gantiwarno, Wedi, Bayat, Kalikotes, Klaten Tengah, Klaten Selatan, Prambanan, Trucuk dan Jogonalan.

2. Dapat disajikan sebagai acuan pembangunan infrastruktur tahan gempabumi dan untuk menggambarkan daerah rawan gempabumi sebagai media mitigasi dan penanggulangan bencana.
3. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi acuan atau literatur pada penelitian selanjutnya.

1.6 DEFINISI OPERASIONAL

1. Karakteristik situs adalah kondisi suatu wilayah dilihat dari susunan dan parameter-parameter tanah.
2. Kerentanan adalah kondisi yang menentukan apakah bahaya yang terjadi akan menimbulkan bencana atau tidak.
3. Kerentanan Seismik adalah kondisi tingkat kerawanan wilayah terhadap goncangan gempa bumi yang ditentukan berdasarkan kondisi material batuan daerah setempat.
4. *Horizontal to Vertical Spektral Ratio (HVSR)* adalah metode pemodelan rasio amplitudo spektrum dari data rekaman getaran (*seismogram*) mikrotremor 3 komponen, yaitu komponen horisontal N-S, horisontal E-W dan komponen vertikal, untuk menghitung nilai frekuensi dominan dan amplifikasi tanah.
5. Mikrotremor adalah getaran alami tanah yang terjadi secara terus menerus, serta terjebak pada lapisan permukaan sedimen dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap.
6. Wilayah penelitian adalah Kabupaten Klaten bagian selatan meliputi Kecamatan Gantiwarno, Wedi, Bayat, Trucuk, Prambanan, Kalikotes, Klaten Selatan, Klaten Tengah, dan Jogonalan.

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 PENELITIAN TERDAHULU

Beberapa peneliti sebelumnya telah melakukan kajian dan penelitian terkait dengan penelitian ini atau penelitian yang menggunakan metode terkait. Penelitian dari Indonesia diantaranya adalah LitBang BMKG (2010), Daryono (2011), Anton Murtono (2013), Sri Mulyati (2015), Ari Sungkowo (2016), Dewi Wahyu Ratnasari (2017), dan Yulistiani (2017). Penelitian dari luar negeri diantaranya Gurler *et al.* (2000), Nakamura (2008), dan Mahajan, A.K *et al.* (2012). Beberapa penelitian tersebut dirujuk dalam penelitian ini.

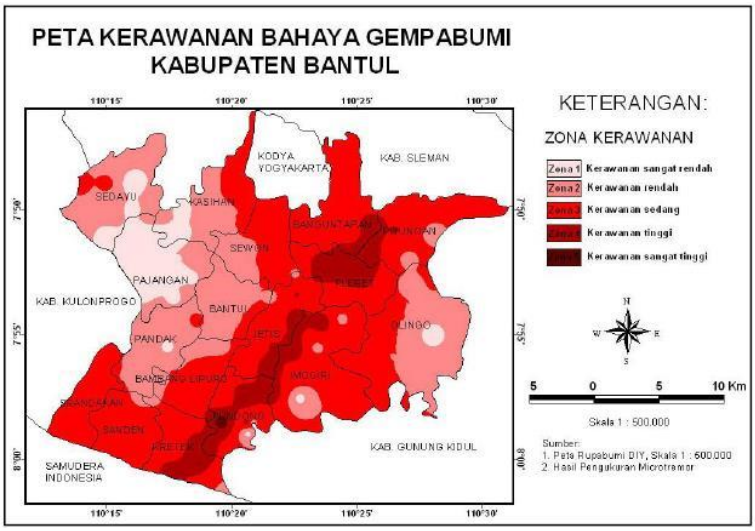
2.1.1 LitBang BMKG (2010)

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.

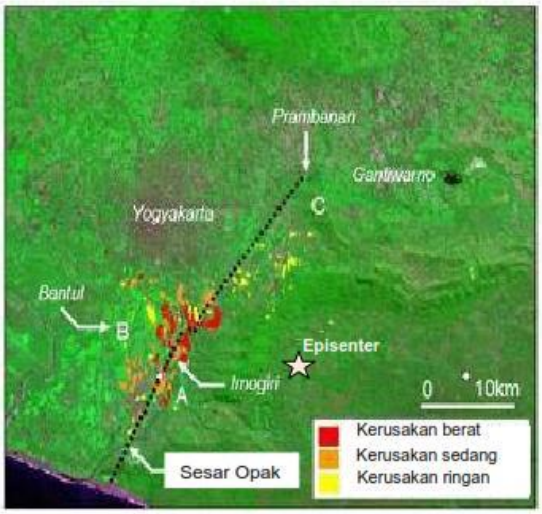
Penelitian dilakukan dengan pengukuran mikrotremor di wilayah Kabupaten Bantul menggunakan seperangkat seismograf portabel TDS 303. Data seismogram yang terekam dilakukan analisis dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Penelitian ini juga memakai pendekatan SIG

(Sistem Informasi Geografi) sebagai perangkat lunak untuk pemetaan dan analisis fenomena alam.

Penelitian ini menggunakan metodologi analisis keputusan multi krieria 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.



Gambar 2.1 Tingkat Kerawanan Bahaya Gempa Bumi Kab. Bantul



Gambar 2.2 Peta Kerusakan Bangunan Akibat Gempa di Bantul (Miura et al, 2008)

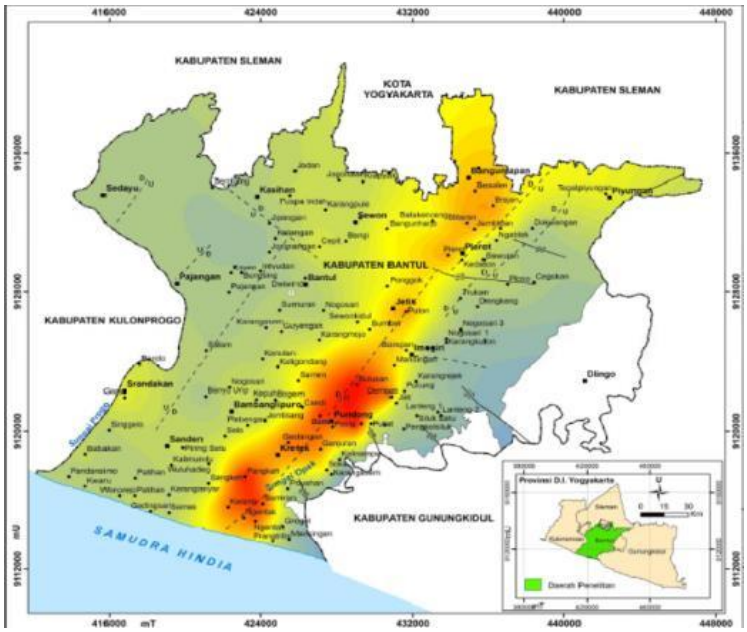
Peta tingkat kerawanan gempa bumi Kabupaten Bantul hasil analisis multi kriteria, merupakan model peta tingkat kerawanan gempabumi hasil inovasi baru dalam metode zonasi daerah rawan gempa bumi. Ada kesesuaian pola antara peta rasio kerusakan aktual akibat gempa bumi Yogyakarta 26 Mei 2006 dengan peta kerawanan gempa bumi hasil kajian seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.1** dan **Gambar 2.2**. 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.

2.1.2 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 2.3**. Nilai rata-rata indeks kerentanan seismik tertinggi terdapat pada satuan bentuk lahan Dataran Fluviovulkanik Merapi Muda (*Kg*=8,5).



Gambar 2.3 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 (*Kg*=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.

2.1.3 Anton Murtono (2013)

Anton (2013) menganalisa tingkat kerawanan gempa pada daerah Candi Plaosan dan sekitarnya dengan mengukur nilai mikrotremor. Dari data mikrotremor untuk menentukan nilai amplifikasi dan frekuensi natural mengacu pada metode kurva HVSR Nakamura, yang selanjutnya disajikan dalam bentuk peta mikrozonasi gempa bumi dan peta kerawanan gempa bumi.

Tujuan dari penelitian ini yakni zonasi nilai kerentanan bencana gempabumi daerah Candi Plaosan dan sekitarnya dan hubungan hasil mikrotremor

dengan kondisi geologi daerah penelitian. Titik pengamatan penelitain ini sebanyak 68 titik yang tersebar di Candi Plaosan dan seiktarnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai frekuensi natural (f0) berkisar antara 0,5 – 0,9 Hz tetapi frekuensi yang dominan berkisar antara 0,9 – 1,1 Hz. Secara keseluruhan ketebalan lapisan berkisar antara 50 – 138 meter tetapi ketebalan yang dominan berkisar antara 80 – 138 meter. Pada peta frekuensi, daerah yang berada pada zonasi frekuensi tinggi memiliki sedimen yang relatif tipis dan pada zonasi frekuensi rendah memiliki sedimen yang relatif tebal. Nilai amplifikasi (A0) pada daerah penelitian berkisar antara 1 – 7 tetapi amplifikasi yang dominan berkisar antara 2 – 4. Secara keseluruhan nilai kerentanan seismik (Kg) berkisar antara 1 – 65 tetapi kerentanan seismik yang dominan berkisar antara 1 – 22.

Berdasarkan dari analisis peta frekuensi, peta ketebalan, peta amplifikasi, dan peta kerentanan seismik, maka daerah Candi Plaosan dan sekitarnya memiliki potensi bencana gempa bumi yang cukup besar. Dikarenakan kondisi geologi daerah tersebut yakni sifat sedimen yang lepas – lepas hasil aktivitas Gunung Merapi dan memiliki sedimen yang cukup tebal berkisar antara 80 – 138 meter.

2.1.4 Sri Mulyati (2015)

Sri Mulyati (2015) meneliti hubungan tingkat kerawanan fisik dengan kerentanan fisik bangunan wilayah Kecamatan Wedi dan Gantiwarno Kabupaten Klaten. Dua kecamatan tersebut mengalami kerusakan terparah di wilayah Provinsi Jawa Tengah akibat gempa bumi Bantul 27 Mei 2006, padahal terletak jauh dari pusat gempa bumi.

Penelitian ini bertujuan untuk 1) memetakan tingkat kerawanan fisik wilayah di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Wedi, 2) memetakan tingkat kerentanan fisik bangunan tempat tinggal di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Wedi, 3) menganalisis hubungan tingkat kerawanan fisik wilayah dengan kerentanan fisik bangunan terhadap bahaya gempa bumi.

Analisis data mikrotremor menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectrum Ratio*). Titik pengukuran mikrotremor sebanyak 35 titik pada 6 satuan bentuklahan yaitu satuan bentuklahan Fluvial, Fluvial Vulkanik, Fluvial

Denudasional, Denudasional, Struktural Denudasional dan Struktural. Penilaian kerawanan fisik wilayah berdasarkan nilai amplifikasi, frekuensi, kedalaman lapisan sedimen dan PGA di batuan dasar. Penilaian kerentanan fisik bangunan dilakukan dengan mengklasifikasikan kerentanan berdasarkan jenis atap bangunan rumah (joglo, limasan dan kampung). Analisis data menggunakan metode kuantitatif.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa tingkat kerawanan fisik wilayah sangat tinggi berada di Kecamatan Gantiwarno, sedangkan kerawanan fisik wilayah rendah berada di Kecamatan Wedi. Wilayah penelitian memiliki tingkat kerawanan tinggi terhadap gempabumi disebabkan oleh sebagian besar wilayah memiliki satuan bentuk lahan Fluvial yang bersifat lunak. Tingkat kerentanan fisik bangunan di wilayah penelitian tergolong tinggi. Jumlah bangunan yang rentan sebanyak 104 unit rumah dari jumlah total sampel (60,5%), sedangkan bangunan dengan tingkat kerentanan sedang sebanyak 38 unit (22,1%) dan tingkat kerentanan rendah 30 unit (17,4%). Hal ini dikarenakan bangunan di wilayah penelitian didominasi oleh rumah dengan tipe atap kampung yang memiliki tingkat kerentanan tinggi. Pola kerusakan bangunan total dan berat berada pada tingkat kerawanan fisik yang tinggi, sedangkan bangunan dengan tingkat kerusakan ringan tersebar pada tingkat kerawanan sedang dan rendah.hal ini menunjukan hubungan antara pola kerentanan bangunan dengan pola sebaran kerawanan fisik wilayah.

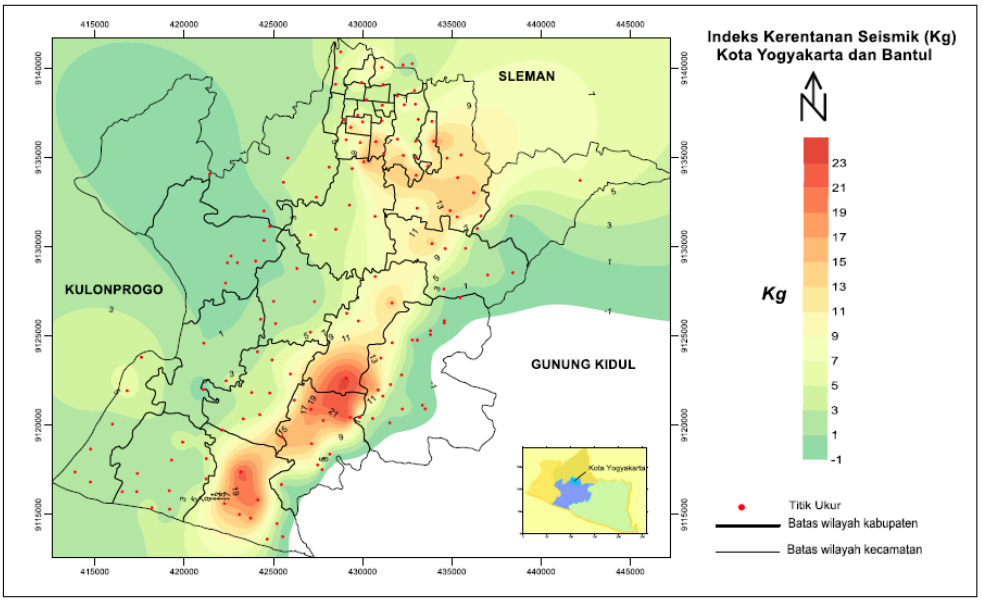
2.1.5 Ari Sungkowo (2016)

Ari Sungkowo (2016) meneliti kerentanan seismik dan karakteristik dinamik tanah di Kota Yogyakarta menggunakan data mikrotremor. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan sebaran nilai faktor amplifikasi tanah (*Ag*), frekuensi dominan (*fg*), indeks kerentanan seismik (*Kg*), percepatan tanah maksimum (PGA), *ground shear strain* (γ), ketebalan lapisan (*h*), dan kecepatan gelombang geser sampai kedalaman 30 meter (Vs30) yang dapat menunjukkan tingkat kerentanan suatu daerah terhadap bahaya gempa bumi. Dalam pengukuran mikrotremor dengan menggunakan seismometer tiga komponen TDS 303. Data tersebut kemudian dianalisa dengan metode *Horizontal to Vertical Ratio* (HVSR).

Nilai PGA dihitung dengan persamaan Kanai untuk gempa bumi 27 Mei 2006 dengan magnitudo 6,3 Mw dan NERA.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sebaran nilai faktor amplifikasi tanah (*Ag*) berkisar antara 1,69 sampai 6,48, frekuensi dominan (*fg*) berkisar antara 0,62 Hz sampai 3,4 Hz, indeks keretanan seismik (*Kg*) berkisar antara 0,65 sampai 18,43, percepatan tanah maksimum (PGA) Kanai berkisar antara 338,1 gal sampai 868,74 gal, *ground shear strain* (γ) 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 (Vs30) berkisar antara 185 m/dt sampai dengan 265 m/dt.

Nilai *Kg*, PGA, γ, relatif tinggi dan Vs30 relatif rendah di daerah penelitian pada umumnya terdapat di daerah bagian selatan dari Kota Yogyakarta di wilayah Kecamatan Kotagede, Umnulharjo, Mergangsan, dan Mantrijeron yang mengalami kerusakan parah. Hasil penelitian menunjukkan adanya hubungan antara tingkat kerusakan dengan indeks kerentanan seismik, *ground shear strain*, PGA, dan Vs30 sebagaimana ditunjukkan peta tingkat kerentanan seismik pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Peta distribusi indeks kerentanan seismik (Kg)

2.1.6 Dewi Wahyu Ratnasari (2017)

Dewi Wahyu Ratnasari (2017) melakukan penelitian indeks kerentanan gempa bumi di Desa Gunung Gajah, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten. Berdasarkan kondisi Geologi, Desa Gunung Gajah memiliki jenis batuan yang komplek. Terdapat tiga jenis batuan yang muncul dipermukaan yaitu batu metamorf, batu beku, dan batu sedimen dalam jumlah yang luas dan memiliki umur yang berbeda dari umur pra-tersier hingga umur quarter. Dari kondisi geologi ini membuktikan bahwa di daerah tersebut pernah terjadi aktivitas tektonik yang sangat tinggi. Daerah ini juga terdapat banyak blok patahan yang mana patahan-patahan tersebut bisa menjadi sumber getaran apabila terjadi aktifitas tektonik.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai persebaran frekuensi dominan, amplifikasi, Kg, dan PGA yang mana nilai – nilai tersebut menunjukkan karakteristik tanah bawah permukaan. Pendekatan yang digunakan untuk mengetahui gerakan tanah pada penelitian ini adalah metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR).*

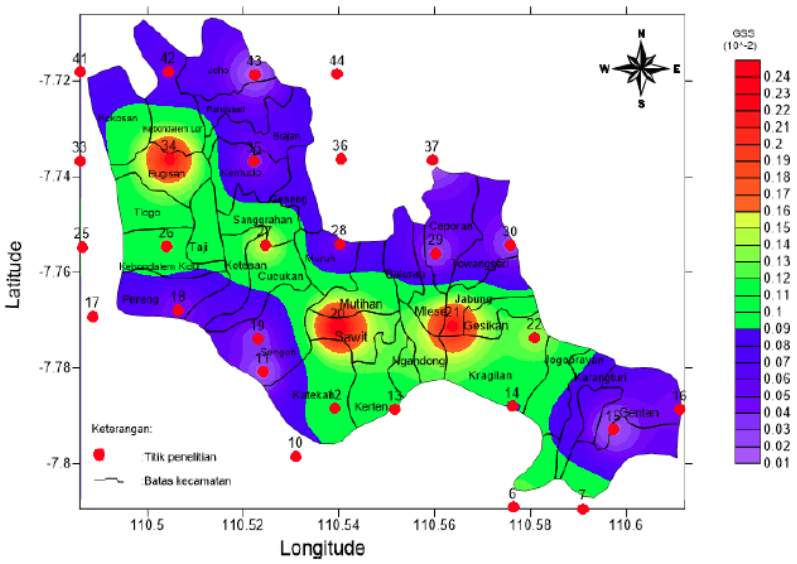
Dari hasil pengolahan metode HVSR diketahui bahwa karakter tanah di Desa Gunung Gajah memiliki nilai frekuensi dominan sebesar 0,79 – 18,22 Hz, amplifikasi 0,13 – 15,09, Kg sebesar 0,02 – 20,29 detik, dan PGA sebesar 51,12 – 247,24 gal. Berdasarkan pendekatan Nakamura dapat diketahui daerah penelitian memiliki tingkat resiko kerusakan rendah yang menyebar pada formasi Metamorf, Wungkal-Gamping, Diorit, dan Oyo/Wonosari. Tingkat kerusakan sedang menyebar di formasi Metamorf bagian barat dan Diorit di bagian timur. Berdasarkan pendekatan Kanai, daerah yang memilki resiko rendah menyebar di tengah area penelitian pada formasi Wungkal-Gamping, Metamorf, Diorit, dan Oyo/Wonosari.

2.1.7 Yulistiani (2017)

Yulistiani (2017) meneliti tentang potensi likuifaksi berdasarkan nilai *ground shear strain* (GGS) di Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno, Kabupaten Klaten. *Ground shear strain* didapatkan dari analisis data mikrotremor dengan menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR).* Kecamatan

Prambanan dan Gantiwarno termasuk daerah yang rawan gempa bumi, ditunjukkan dengan jenis tanah yang tersebar di daerah tersebut berupa regosol coklat kelabu yang berbahan induk berupa abu dan pasir vulkanik, juga terdapat persebaran hidrogeologi dengan akuifer produktif tersebar di seluruh wilayah tersebut. Dengan jenis tanah dan kondisi hidrogeologi demikian, Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno memiliki potensi likuifaksi saat terjadi gempabumi.

Percepatan tanah maksimum dan indeks kerentanan seismik merupakan parameter yang berpengaruh terhadap nilai *ground shear strain* (GGS). Percepatan tanah maksimum adalah nilai percepatan getaran tanah terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat yang diakibatkan oleh gelombang gempa bumi, sedangkan indeks kerentanan seismik merupakan suatu parameter yang sangat berhubungan dengan tingkat kerawanan suatu wilayah terhadap gempa bumi. Daerah yang memiliki nilai GGS tinggi berpotensi mengalami gerakan tanah, salah satu fenomenanya yaitu likuifaksi. Fenomena likuifaksi muncul ketika terjadi gempa bumi dan dapat menjadi salah satu faktor meningkatnya kerusakan yang diakibatkan oleh gempa bumi. Likuifaksi merupakan fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran gempa. Titik penelitain pada penelitian ini sebanyak 30 titik, yang kemudian dipetakan berdasarkan nilai GGS setiap titik pengamatan, seperti dilihat pada **Gambar 2.5**.

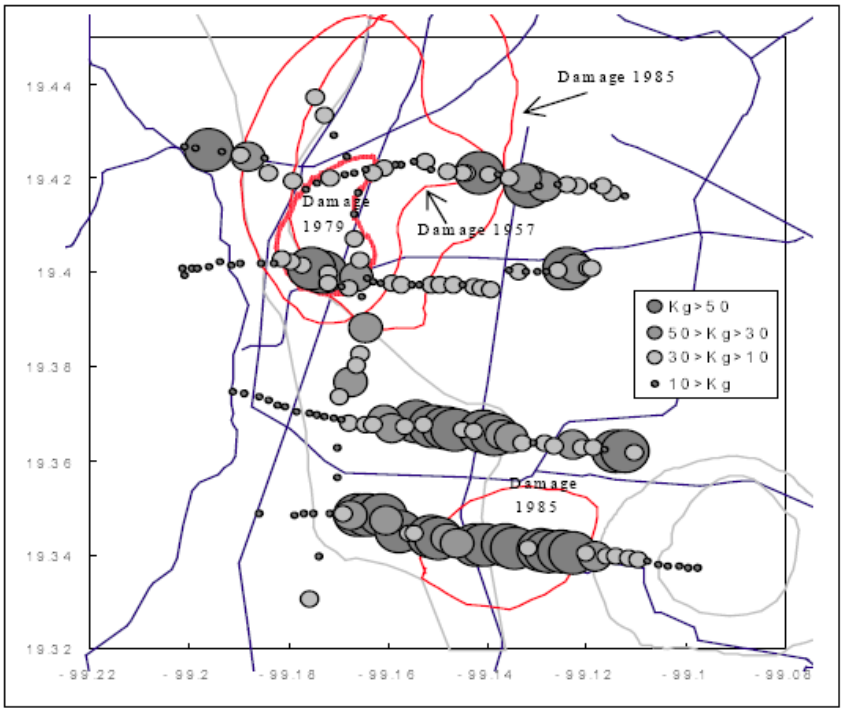


Gambar 2.5 Peta Mikrozonasi nilai GGS di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno (Yulistiani, 2017)

Hasil dari penelitian ini adalah nilai GGS di Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno berkisar antara 0,01 x 10^{-2} – 0,24 x 10^{-2}. Nilai GGS tertinggi berada di daerah Sawit yaitu 0,24 x 10^{-2} dan nilai GGS terendah berada di daerah Ceporan yaitu 0,01 x 10^{-2} . Dari hasil tersebut Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno, potensi adanya likuifaksi relatif rendah dan hanya terjadi di beberapa titik penelitian yaitu Desa Bugisan (titik 34), Desa Sawit (titik 20), dan Desa Jabung (titik 21) dengan nilai GGS masing – masing daerah yaitu 0,21 x 10^{-2} , 0,24 x 10^{-2} , dan 0,01 x 10^{-2}.

2.1.8 Gurler *et al.* (2000)

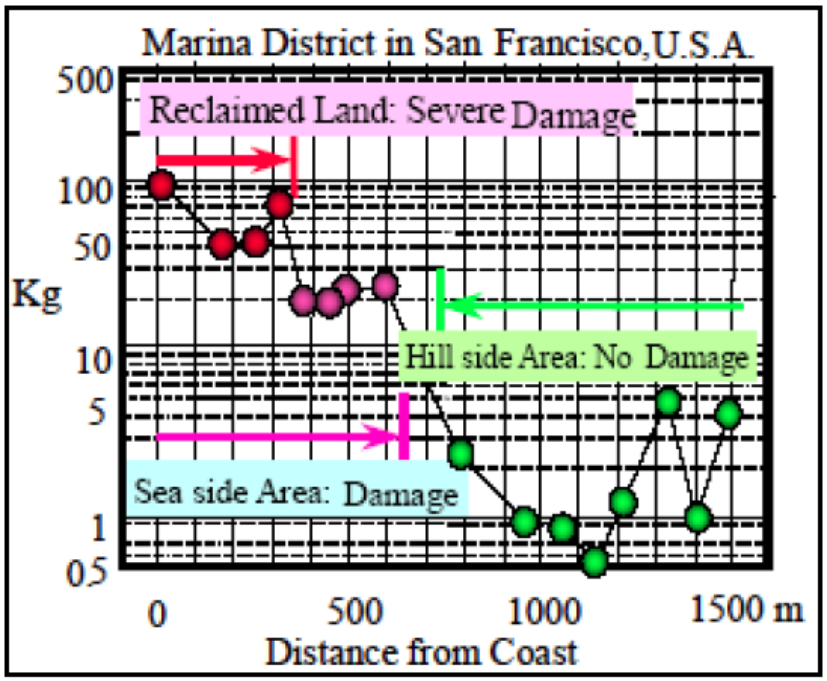
Menganalisis hubungan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan data kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu di daerah Mexico City, Mexico. Gurler *et al*. (2000) melakukan pengukuran mikrotremor pada 200 lokasi di Mexico City yang berulangkali dilanda kerusakan akibat gempa bumi tahun 1957, 1979, dan 1985. Jalur pengukuran mikrotremor memotong perbuktian, daerah transisi, dan rawa yang sudah direklamasi. Hasil penelitian dapat mengidentifikasi “zona lemah”, yang ditandai dengan indeks kerentanan seismik tinggi di zona bekas rawa, seperti terlihat pada **Gambar 2.6**. Indeks kerentanan seismik berubah semakin kecil setelah memasuki zona transisi dan zona perbuktian. 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 2.6 Peta Distribusi Indeks Kerentanan Seismik dan Data Kerusakan Di Mexico City

2.1.9 Nakamura (2008)

Nakamura (2008) melakukan pengukuran mikrotremor untuk mengkaji indeks kerentanan seismik di distrik Marina (San Fransisco) yang mengalami tingkat kerusakan parah akibat gempabumi Loma Prieta 1989 yang menggoncang pantai California (Mw 6,9). Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa terdapat perbedaan dari sebaran nilai indeks kerentanan sesmik didaerah pantai hingga kawasan perbukitan, daerah pantai yang merupakan dataran aluvial dan reklamasi menunjukkan nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi dan mengalami kerusakan bangunan yang parah, kemudian nilai indeks kerentanan seismik berubah semakin kecil ketika memasuki kawasan perbukitan yang tidak mengalami kerusakan bangunan. Seperti terlihat pada **Gambar 2.7** di bawah ini.



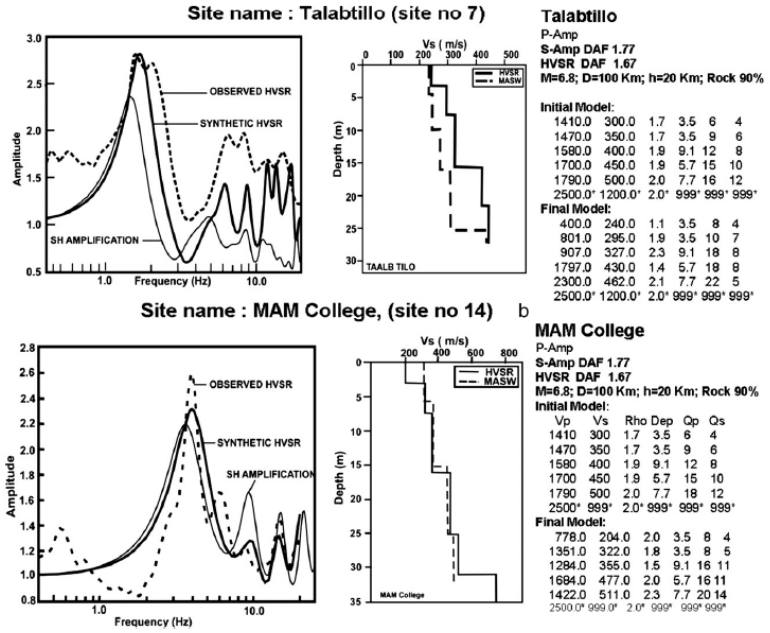
Gambar 2.7 Nilai indeks kerentanan seismik (Kg) setelah gempa di Loma Prieta tahun 1989 (Nakamura, 2008)

Gambar 2.7 di atas menunjukkan distribusi nilai Kg di San Francisco setelah gempa di Loma-Prieta tahun 1989. Untuk daerah di sepanjang garis pantai sampai di bukit bisa dilihat bawah Nilai Indeks Kerentan (Kg) di atas 20 mengalami kerusakan yang parah, sedangkan daerah yang tidak mengalami kerusakan memiliki nilai Kg yang kecil. Dengan mempertimbangkan nilai kecepatan basement di area tersebut sebesar 50 gal (menurut pengamatan), nilai Kg = 1000 x 10^{-6} dapat mengidentifikasi daerah yang mengalami likuifaksi.

2.1.10 Mahajan, A.K *et al* (2011)

Mahajan, A.K *et al.* (2011) melakukan penelitian di daerah Jammu City, Himalaya India dengan metode aktif MASW dan metode pasif mikrotremor HVSR untuk mengetahui kecepatan gelombang geser di struktur. Kesepatan 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 – 3 Hz di bagian tengah dan 1,75 Hz – 2 Hz di bagian utara, bagian barat daya dan bagian selatan. Inversi kurva H/V juga dilakukan di daerah tersebut yang

dibandingkan dengan hasil dari survei MASW, seperti terlihat pada **Gambar 2.8** di bawah ini.



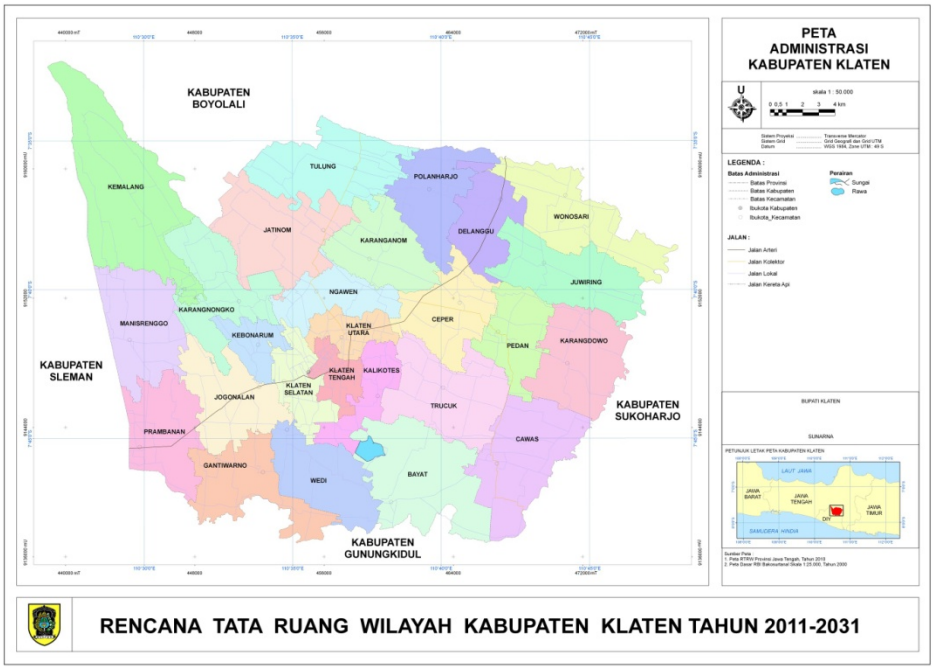
Gambar 2.8 Model Vs dari inversi kurva H/V di Jammu City, Hilamaya India (Mahajan, AK *et al.* 2012)

Rangkuman dari penelitian terdahulu di atas dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

2.2 KEASLIAN PENELITIAN

Beberapa penelitian mengenai indeks kerentanan sismik dengan pengukuran mikrotremor sudah dilakukan oleh para peneliti terdahulu. Penelitian ni 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. Meskipun demikian, penelitian ini menjadi baru karena memilki perbedaan dalam hal karekteristik lokasi kajian yaitu di Kabupaten Klaten bagian selatan dengan mengambil cakupan wilayah yang cukup luas yaitu 9 Kecamatan dan sebagian wilayah Gunungkidul dan Sleman yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Klaten. Peta administrasi Kabupaten Klaten dapat dilihat pada **Gambar 2.9**. Penelitian indeks kerentanan seismik berdasarkan pengukuran mikrotremor yang dilakukan oleh 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 (*vs*) dari inversi kurva HVSR. Selain itu juga digunakan data karakteristik dinamik tanah yaitu regangan geser tanah dan kedalaman muka air tanah untuk kemudian didapatkan potensi likuifaksi tiap daerah pengamatan.



Gambar 2.9 Peta Administrasi Kabupaten Klaten (BAPPEDA, 2011)

Tabel 2.1 Rangkuman Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Tahun	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Perbedaan dengan penelitian yang akan dilakukan
1	Tim Litbang BMKG	2010	Kajian Kerawanan Bahaya Gempa Bumi di Kabupaten Bantul, DIY	1. Mengkaji tingkat kerawanan gempa bumi di Kabupaten Bantul 2. Mengembangkan inovasi baru dalam metode zonasi rawan gempa gempa bumi di Kabupaten Bantul berdasarkan analisis multikriteria	1. Peta distribusi nilai periode dominan, faktor amplifikasi, PGA 2. Menggunakan metode multi kriteria untuk zonasi rawan gempa bumi 3. Peta kerawanan gempa bumi dengan metode multi kriteria daerah Bantul	1. Menggunakan metode multi kriteria 2. Wilayah studi di Kabupaten Bantul 3. Pengambilan data mikrotremor dengan jarak 2 – 3 km
2	Daryono	2011	Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuk Lahan di Zona Graben Bantul, DIY	1. Mengetahui karakteristik indeks kerentanan seismik pada setiap satuan bentuk lahan 2. Mengetahui persebaran spasial indeks kerentanan seismik berdasarkan pendekatan satuan bentuk lahan di zona Graben Bantul	1. Karakteristik indeks kerentanan seismik, ground shear strain, dan rasio kerusakan rumah berubah mengikuti satuan bentuk lahan 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 air tanah	1. Analisis Indeks kerentanan sesimik dikelompokkan berdasarkan satuan bentuk lahan 2. Wilayah studi di Kabupaten Bantul 3. Kedalaman air tanah didapatkan dari data sekunder sumur bor dan sumur gali
3	Anton Murtono	2013	Analisis Mikrotremor dengan Metode HVSR (Nakamura) untuk Mikrozonasi Gempa Bumi Daerah Candi Plaosan dan Sekitarnya,	1. Menganalisa tingkat kerawanan gempa pada daerah Candi Plaosan dan sekitarnya 2. Menentukan nilai amplifikasi dan frekuensi natural daerah setempat dengan mengacu pada kurva HVSR 3. Pembuatan peta mikrozonasi gempa bumi	1. Secara keseluruhan nilai frekuensi natural (f0) pada daerah penelitian berkisar antara 0,5 – 0,9 Hz tetapi frekuensi yang dominan berkisar antara 0,9 – 1,1 Hz 2. Secara keseluruhan nilai amplifikasi (A0) pada daerah penelitian berkisar antara 1 – 7	1. Pengambilan data mikrotremor berdasar metode *proporsional purposive sampling* 2. Wilayah studi di daerah candi plaosan dan sekitarnya 3. Mikrozonasi menggunkan software Surfer

			Kabupaten Klaten, Provinsi Jawa Tengah	4. Menghitung nilai kerawanan gempa bumi melalui nilai amplifikasi dan frekuensi natural 5. Mengetahui hubungan hasil mikrotremor dengan kondisi geologi daerah penelitian	tetapi amplifikasi yang dominan berkisar antara 2 – 4 3. Secara keseluruhan nilai kerentanan seismik (Kg) pada daerah penelitian berkisar antara 1 – 65 tetapi kerentanan seismik yang dominan berkisar antara 1 - 22 4. Endapan daerah Candi Plaosan dan sekitarnya merupakan endapan produk Gunung Merapi dengan adanya proses fluvial Kali Opak yang mempengaruhinya 5. Berdasarkan dari analisis peta frekuensi, amplifikasi, dan kerentanan seismik, maka daerah Candi Plaosan dan sekitarnya memilki potensi bencana gempa bumi yang cukup besar	
4	Sri Mulyati	2015	Kajian Kondisi Fisik Wilayah Rawan Gempa Bumi untuk Penilaian Kerentanan Fisik Bangunan di Kecamatan Wedi dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten	1. Memetakan tingkat kerawanan fisik wilayah di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Wedi 2. Memetakan tingkat kerentanan fisik bangunan tempat tinggal di Kecamatan Gantiwarno dan Kecamatan Wedi 3. Menganalisis hubungan tingkat kerawanan fisik wilayah dengan kerentanan fisik bangunan terhadap bahaya gempa bumi	1. Tingkat kerawanan fisik wilayah sangat tinggi berada di Kecamatan Gantiwarno, sedangkan tingkat kerawanan fisik wilayah rendah berada di Kecamatan Wedi. 2. Wilayah penelitian memiliki tingkat kerentanan fisik bangunan yang tingi. Jumlah bangunan yang rentan sebanyak 104 unit rumah dari jumlah total sampel (60,5 %), sedangkan bangunan dengan tingkat kerentanan sedang sebanyak 38 unit (22,1%), dan tingkat kerentanan rendah 30 unit	1. Pengambilan data mikrotremor berdasar metode *proporsional purposive sampling* 2. Wilayah studi di Kecamatan Gantiwarno dan Wedi, Klaten 3. Pengambilan data mikrotremor dengan jarak 2 – 3 km 4. Memetakan tingkat kerentanan fisik bangunan berdasarkan bentuk atap bangunan

					(17,4%).	
5	Ari Sungkowo	2016	Studi Kerentanan Seismik dan Karakteristik Dinamik Tanah di Kota Yogyakarta dari Data Mikrotremor	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 (Kg), dan nilai percepatan tanah maksimum (α) di Kota Yogyakarta 3. Membuat peta distribusi nilai karakteristik dinamik tanah dalam bentuk kecepatan gelombang geser (vs), nilai regangan geser tanah (γ), dan nilai modulus geser (G) 4. Mengetahui hubungan antara nilai indeks kerentanan seismik (Kg), regangan geser tanah (γ), dan nilai percepatan tanah maksimum (α)	1. 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. 2. Karakteristik dinamik tanah ditujukan oleh nilai kecepatan gelombang geser vs, yang terukur di titik Malangan dan Surosutan. Vs replikasi rata-rata 251,69 m/s, vs Iami and Tonouchi rata-rata 264,48 m/s, dan vs inversi 275,36 m/s. Vs bernilai rendah berada di bagian selatan Kota Yogyakarta. 3. Karakteristik dinamik tanah ditunjukkan niali regangan geser dengan metode Nakamura berkisar antara 0,0002 – 0,0028. 4. Niali PGA berdasar perhitungan dengan metode Kanai berkisar antara 0,338 g – 0,868 g.	1. Wilayah studi di Kota Yogyakarta 2. Nilai Vs dihitung dengan software modelHVSR 3. Parameter tanah didapatkan dari data down *hole logging* dan *bore log.* 4. Pengambilan data mikrotremor dengan jarak 1-1,5 km 5. Durasi pengukuran mikrotremor 20 menit 6. Nilai PGA dihitung dengan rumus atenuasi Campbell
6	Dewi Wahyu Ratnasari	2017	Analisis Nilai Indeks Kerentanan Tanah (Kg) dan Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Berdasarkan Metode *Horizontal to Vertical Spectral*	1. Mengkaji nilai frekuensi dominan, amplifikasi, indeks kerentanan tanah dan percepatan tanah maksimum di Desa Gunung Gajah, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten. 2. Mengkorelasikan hasil dari pengolahan metode HVSR dengan	1. Daerah Desa Gunung Gajah memiliki frekuensi 0,78 – 18,23 Hz, amplifikasi 1,11 – 15,09, indeks kerentanan tanah 0,02 – 20,29 s , dan percepatan tanah maksimum 51,12 – 247,24 gal. 2. Berdasarkan nilai frekuensi dominan daerah penelitian	1. Wilayah studi di Desa Gunung Gajah, Kecamatan Bayat, Klaten 2. Pengambilan data mikrotremor dengan jarak 0,5 – 1 km 3. Analisis kurva HVSR dengan software Matlab

			Ratio (HVSR) di Desa Gunung Gajah Kecamatan Bayat Kabupaten Klaten	kondisi geologi daerah penelitian.	memiliki jenis tanah I, II, III, dan IV. Jenis tanah I dan II menyebar di batuan sedimen pada Formasi Oyo/Wonosari dan Wungkal-Gamping, Metamorf, dan Diorit pada tengah area penelitian sedangkan jenis tanah III dan IV pada area tepi penelitian.	4. Pemetaan menggunakan software Surfer
7	Yulistiani	2017	Potensi Likuifaksi Berdasarkan Nilai Ground Shear Strain (GSS) di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten Jawa Tengah	1. Mengetahui nilai GSS di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno 2. Mengetahui potensi likuifaksi berdasarkan nilai GSS di Kecamatan Prambanan dan Kecamatan Gantiwarno	1. Besarnya nilai Ground Shear Strain (GSS) di Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno berkisar antara 0,01 x 10-2 – 0,24 x 10-2. Nilai GSS tertinggi berada di daerah Sawit yaotu 0,24 x 10-2 dan nilai GSS terendah berada di daerah Ceporan yaitu 0,01 x 10-2. 2. Berdasarkan nilai GSS di Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno, potensi adanya fenomena likuifaksi relatif rendah dan hanya terjadi di beberapa titik penelitian.	1. Wilayah studi di Kecamatan Prambanan dan Gantiwarno 2. Pemetaan menggunakan software Surfer 3. Potensi likuifaksi berdasarkan nilai GSS 4. Durasi pengukuran data mikrotremor 20 menit
8	Gurler et al.	2000	*Local Site Effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement*	Menganalisis hubungan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan data kerusakan akibat gempa bumi pada masa lalu	1. Zona lemah merupakan zona indeks kerentanan seismik tinggi 2. Zona indeks kerentanan seismik tinggi yang sering terjadi kerusakan terletak di zona bekas rawa.	1. Wilayah penelitian di Mexico City 2. Pengukuran mikrotremor menggunakan alat seri TDS
9	Nakamura	2008	*On the H/V Spectrum*	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	1. Wilayah penelitian di California, USA 2. Tidak menghitung nilai PGA 3. Tidak mengkaji potensi

					daerah transisi hingga kawasan perbuktian	likuifaksi
10	Mahajan, AK et al.	2011	*Active Seismik and passive microtremor HVSR from assessing site effect in Jammu City, NW Himalaya, India*	Membandingkan estimasi kecepatan dengan menggunakan metode MASW dan Model kurva HVSR mikrotremor di wilayah kota Jammu India	Metode MASW dan inversi kurva HVSR mikrotremor dapat digunakan untuk investigasi site effect di Jammu dan metode HVSR baik untuk digunakan di area dengan kontras impedansi tinggi.	1. Wilayah penelitian di Jammu City, India 2. Metode analisis data mikrotremor yang digunakan adalah metode MASW

BAB III
LANDASAN TEORI

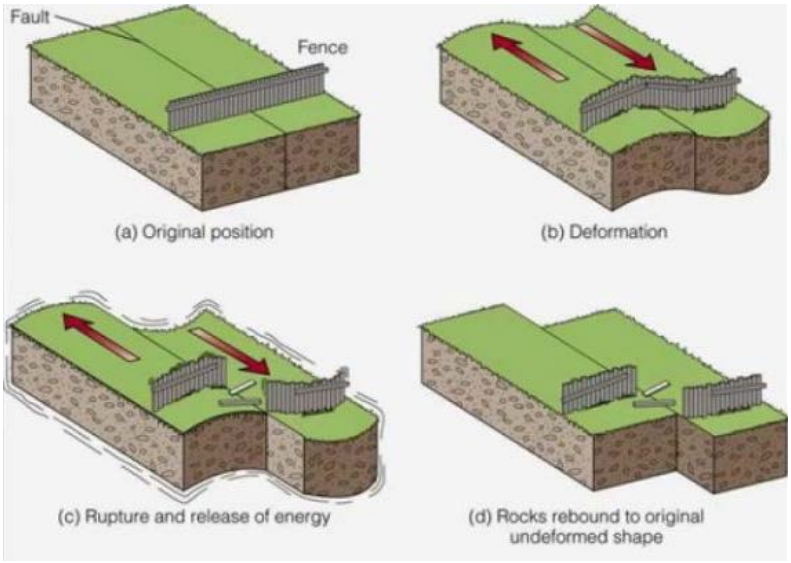
3.1 GEMPA BUMI

3.1.1 Pengertian Gempa Bumi

Gempabumi adalah berguncangnya bumi yang diakibatkan oleh adanya patahan aktif, aktivitas gunung api, runtuhan batuan, dan tumbukan akibat pergerakan lempeng bumi (Supartoyo *et. al.,* 2016). Pergerakan lempeng-lempeng bumi ini menghasilkan akumulasi energi yang menjadi penyebab utama terjadinya gempabumi. Energi yang dihasilkan dipancarkan ke segala arah dalam bentuk gelombang seismik sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi sebagai getaran atau guncangan tanah (BMKG, 2015).

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 dikenal sebagai gempa bumi. (Ari Sungkowo, 2016)



Gambar 3.1 Mekanisme terjadinya gempa bumi (Thomson, 2008)

3.1.2 Parameter Gempa Bumi

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

Waktu kejadian gempabumi (*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. Intensitas gempabumi dinyatakan dalam skala Mercally yang biasa disebut MMI (*Modified*

Mercally Intensity). Skala gempabumi MMI bersifat kualitatif, skala intensitas ini sangat subjektif dan bergantung pada kondisi lokasi dimana gempa terjadi. Badan Metereologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) menetapkan skala intensitas gempa bumi terbaru yang disesuaikan dengan wilayah Indonesia seperti dijelaskan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Intensitas Gempabumi Skala MMI (*Modified Mercally Intensity*)

Skala SIG BMKG	Warna	Deskripsi Sederhana	Deskripsi Rinci	Skala MMI	PGA (gal)
I	Putih	TIDAK DIRASAKAN (*Not Felt*)	Tidak dirasakan atau dirasakan hanya oleh beberapa orang tetapi terekam oleh alat.	I - II	< 2,9
II	Hijau	DIRASAKAN (*Felt*)	Dirasakan oleh orang banyak tetapi tidak menimbulkan kerusakan. Benda-benda ringan yang digantung bergoyang dan jendela kaca bergetar.	III - IV	2,9 - 88
III	Kuning	KERUSAKAN RINGAN (*Slight Damage*)	Bagian non struktur bangunan mengalami kerusakan ringan, seperti retak rambut pada dinding, genteng bergeser ke bawah dan sebagian berjatuhan.	VI	89 - 167
IV	Jingga	KERUSAKAN SEDANG (*Moderate Damage*)	Banyak Retakan terjadi pada dinding bangunan sederhana, sebagian roboh, kaca pecah. Sebagian plester dinding lepas. Hampir sebagian besar genteng bergeser ke bawah atau jatuh. Struktur bangunan mengalami kerusakan ringan sampai sedang.	VII - VIII	168 - 564
V	Merah	KERUSAKAN BERAT (*Heavy Damage*)	Sebagian besar dinding bangunan permanen roboh. Struktur bangunan mengalami kerusakan berat. Rel kereta api melengkung.	IX – XII	> 564

Sumber : BMKG, 2016

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.

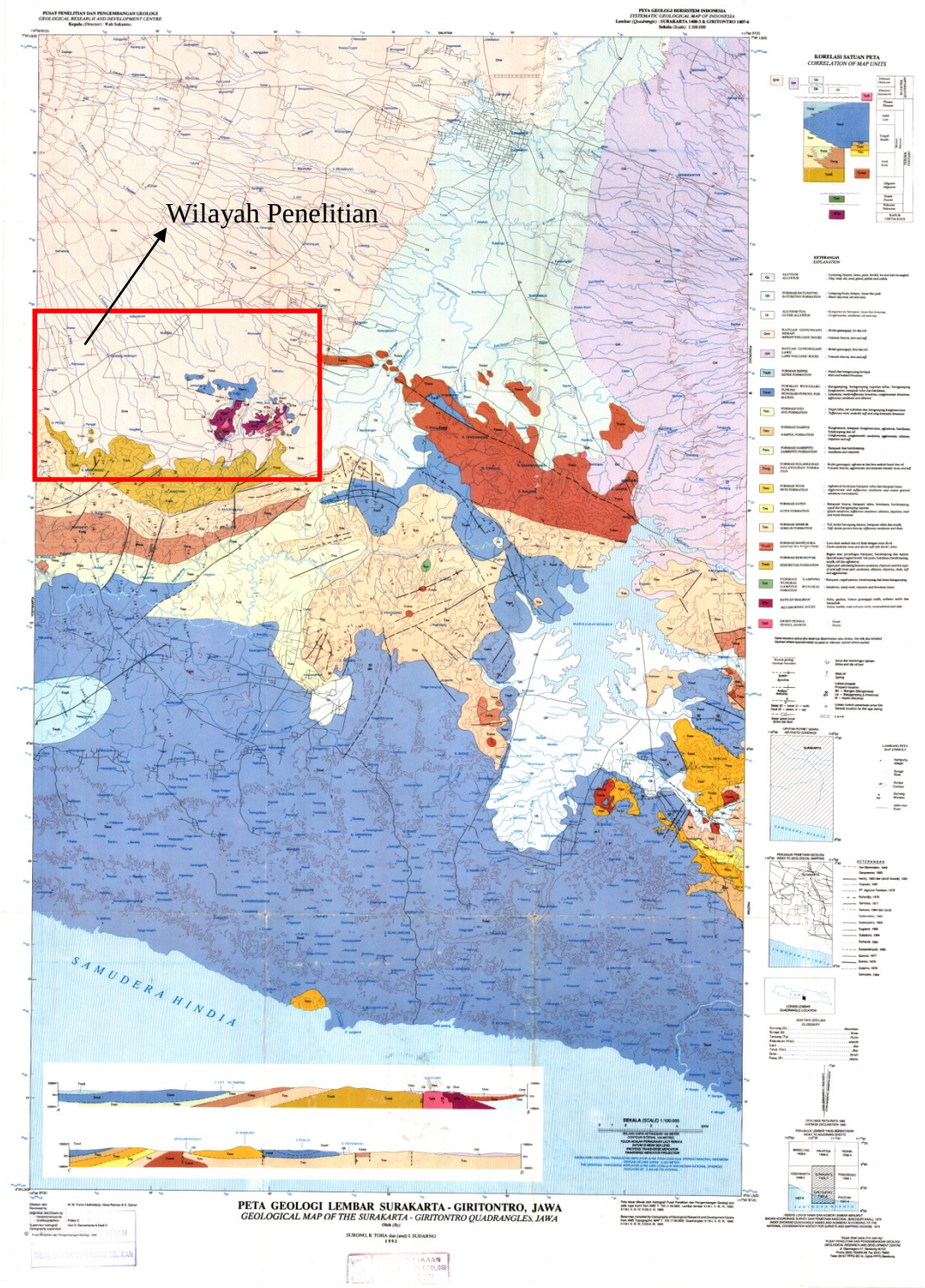
3.2 KONDISI GEOLOGI DAN KEGEMPAAN

3.2.1 Kondisi Geologi Klaten

Daerah penelitian merupakan bagian dari zona kaki gunung Merapi, yang terdiri dari deposit *fluviovulcanic Kuarter*. Menurut peta geologi lembar Surakarta dan Giritontro (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi), batuan yang menyusun wilayah Kabupaten Klaten secara umum termasuk jenis batuan berumur kuarter dan tersier. Batuan kuarter tersebut penyusunnya adalah batuan gunung api merapi (Qvm), dan batuan alvium tua (Qt). Batuan tersier pada daerah penelitian adalah batuan formasi wonosari-punung (Tmwl), batuan malihan (KTm), batuan formasi gamping wungkal (Tew), batuan Diorit pendul (Tpdi), dan batuan formasi kebobutak (Tomk).

Di kecamatan Prambanan, Jogonalan, Klaten Selatan, Klaten Tengah, Gantiwarno, Wedi, dan Trucuk sebagian besar tersusun dari batuan gunung api merapi (Qvm). Wilayah kecamatan Bayat bagian utara yang terdapat Gunung Kebo dan Gunung Tugu tersusun dari batuan malihan (KTm), batuan diorit pendul (Tpdi), dan batuan gamping wungkal (Tew). Wilayah kecamatan Cawas bagian barat yang terdapat Gunung Konang tersusun dari batuan malihan (KTm), batuan diorit pendul (Tpdi), dan batuan gamping wungkal (Tew). Susunan batuan formasi wonosari-punung (Tmwl) terletak di wilayah sekitar Rowo Jombor dan Jimbung. Wilayah Gedangsari Gunung Kidul yang menjadi batas selatan Kabupaten Klaten tersusun dari batuan formasi kebobutak (Tomk). Untuk melihat persebaran batuan dapat dilihat pada **Gambar 3.2**.

Daerah kerusakan gempa bumi umumnya terkonsentrasi pada daerah-daerah yang disusun oleh sedimen gunung api merapi yang berumur Kuarter. Selain itu daerah kerusakan dapat pula dijumpai di daerah – daerah yang disusun oleh batuan Holosen berupa endapan dan gosong sungai. Sungai besar yang terdapat di daerah penelitian adalah Sungai Dengkeng, yang melewati wilayah kecamatan Bayat dan Cawas.



Gambar 3.2 Peta Geologi Lembar Surakarta-Giritontro dan Wilayah Penelitian (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi)

3.2.2 Sejarah Kegempaan Klaten

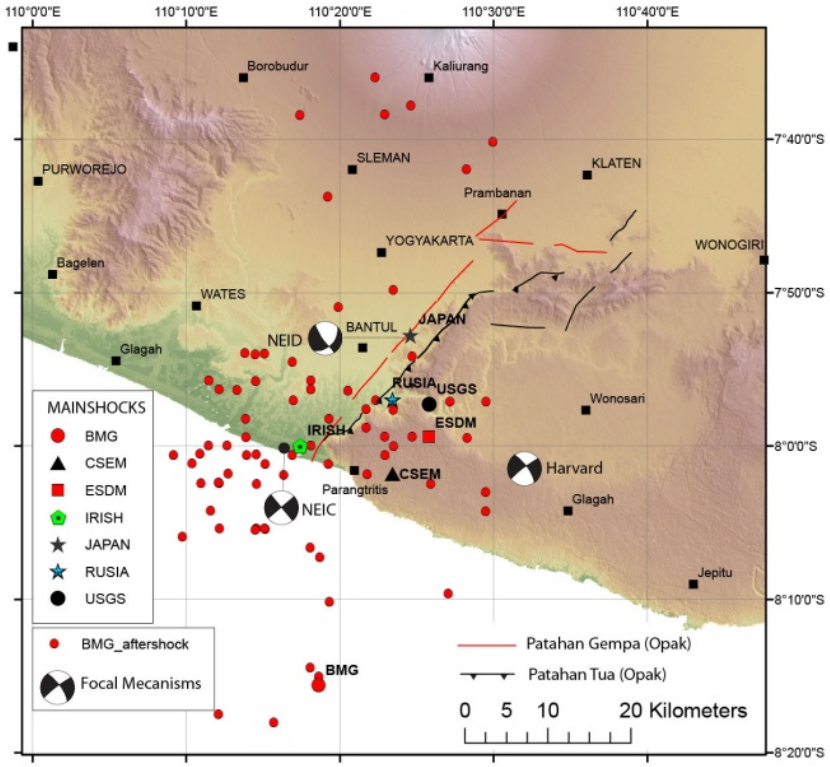
Sejarah kegempaan Jawa antara tahun 1840 hingga 2006 mencatat bahwa daerah Yogyakarta sudah beberapa kali mengalami gempabumi merusak. Gempabumi yang pertamakali tercatat adalah Gempabumi Purworejo (1840). Menurut Newcomb & McCann (1987) gempabumi ini terjadi pada tanggal 4 Januari 1840. Daerah yang mengalami kerusakan meliputi Kebumen, Purworejo, Bantul, Salatiga, Demak, Semarang, Kendal, dan Banjarnegara. Selanjutnya adalah gempabumi besar pada tanggal 10 Juni 1867 menyebabkan 2.200 rumah di Klaten roboh, 326 rumah roboh di Prambanan, dan juga menyebabkan pipa dalam tanah terputus. 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). Gempa selanjutnya terjadi pada tahun 1981 yang terbilang ringan dengan kekuatan 5,6 skala richter, tidak banyak dampak yang dirasakan hanya laporan retak-retak di beberapa rumah. 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). Secara lengkap sejarah gempa yang merusak di Yogyakarta dan Klaten dapat dilihat pada **Tabel 3.2**.

Tabel 3.2 Sejarah Gempa Merusak di Yogyakarta dan Klaten

Tanggal	Episenter		Hiposenter (km)	Magnitude	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, 15275 rumah rusak
12-10-1957	8,3	110,3	-	6,4	Dirasakan pada VI MMI
14-03-1981	7,2	109,3	33	6	Dirasakan pada VII MMI
09-06-1992	8,47	111,10	56	6,5	Dirasakan pada IV MMI
25-05-2001	8,62	110,1	50	6,2	Dirasakan pada IV MMI
19-08-2004	9,22	109,5	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), Elnashai et al. (2006), dan Walter et al. (2007)

Dampak gempa Yogyakarta 2006 sampai di Kabupaten Klaten dikarenakan patahan gempa memanjang ke utara sejajar sesar Opak dan berlanjut ke Timur arah Klaten bagian selatan, seperti terlihat pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Data lokasi episenter, mainshock, aftershock, dan patahan gempa

3.3 SEISMOGRAF

Seismograf merupakan alat yang digunakan untuk mendeteksi dan mencatat getaran tanah beserta informasi waktu yang tepat. Hasil rekaman seismograf disebut seismogram. Seismograf terdiri dari beberapa bagian, antara lain: sensor (seismometer), *amplifier* atau pengkondisi sinyal, ADC *(Analog to Digital Converter*), sistem pewaktu (*time system*), *recorder* dan *power supply* (Havskov, 2002). Seismometer merupakan alat yang digunakan untuk merespon getaran tanah dan menangkap sinyal yang terekam oleh seismograf. Seismometer memiliki tiga detektor yang dapat mendeteksi getaran tanah. Pada penelitian ini seismograf yang digunakan adalah *Digital Portable Seismograph* yang terdiri dari seismometer tipe DS-4A dan *digitizer* tipe TDL-303S yang ditunjukkan pada **Gambar 3.4** dan **Gambar 3.5**.



Gambar 3.4 Seismometer tipe DS-4A

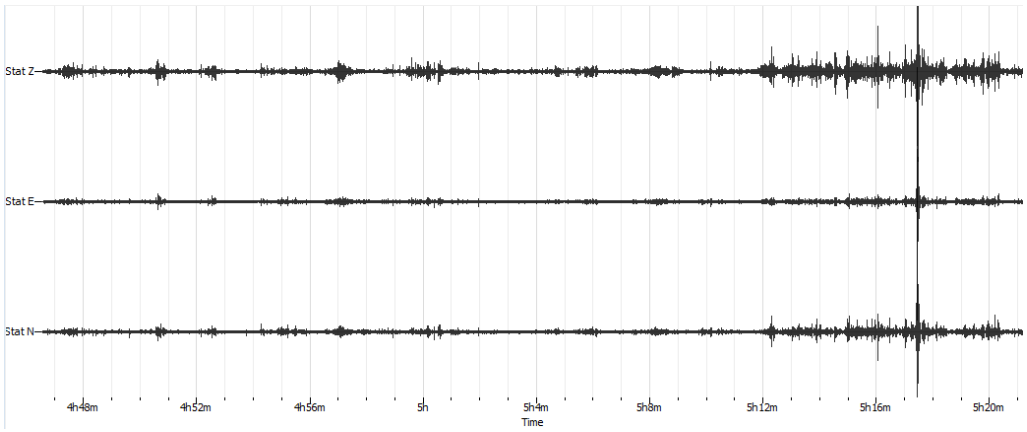


Gambar 3.5 Digitizer tipe TDL-303S

3.4 MIKROTREMOR

Mikrotremor (*ambient vibration*) merupakan getaran tanah yang kecil dan terus menerus yang berasal dari dua sumber utama, yaitu alam dan aktivitas manusia (Kanai,1983). Mikrotremor dapat diartikan sebagai getaran alami tanah yang terjadi secara terus menerus, serta terjebak pada lapisan permukaan sedimen dan terpantulkan oleh adanya bidang batas lapisan dengan frekuensi tetap (Arifin *et. al*., 2014). Mikrotremor terjadi karena getaran akibat orang berjalan, getaran mobil, getaran mesin-mesin pabrik, getaran angin, getaran laut dan getaran alamiah tanah.

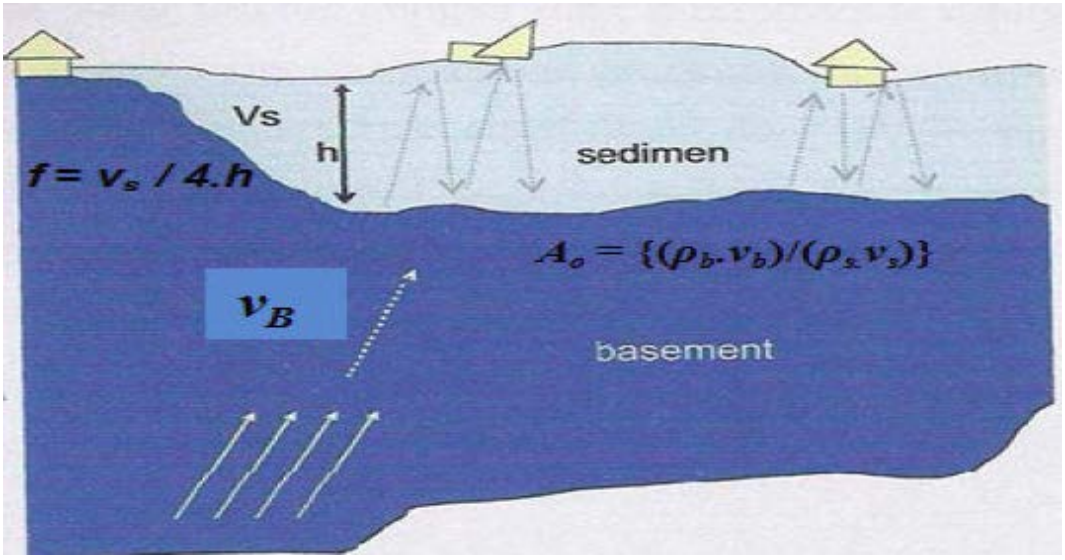
Menurut Mirzaoglu *et. al*. (2003), mikrotremor merupakan getaran tanah yang memiliki amplitudo pergeseran sekitar 0,1-1 μm. Terdapat dua jenis mikrotremor berdasarkan periodenya, yaitu mikrotremor periode pendek (kurang dari 1 detik) dan keadaan ini terkait dengan struktur bawah permukaanyang dangkal dengan ketebalan beberapa puluh meter. Jenis kedua adalah mikrotremor dengan periode panjang (lebih dari 1 detik), keadaan ini terkait dengan struktur tanah yang lebih dalam, menunjukkan dasar dari batuan keras. Contoh sinyal mikrotremor hasil pembacaan dengan seismograf dapat dilihat pada **Gambar 3.6**.



Gambar 3.6 Contoh data Mikrotremor Kecamatan Gantiwarno (Titik 10)

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 3.7**.



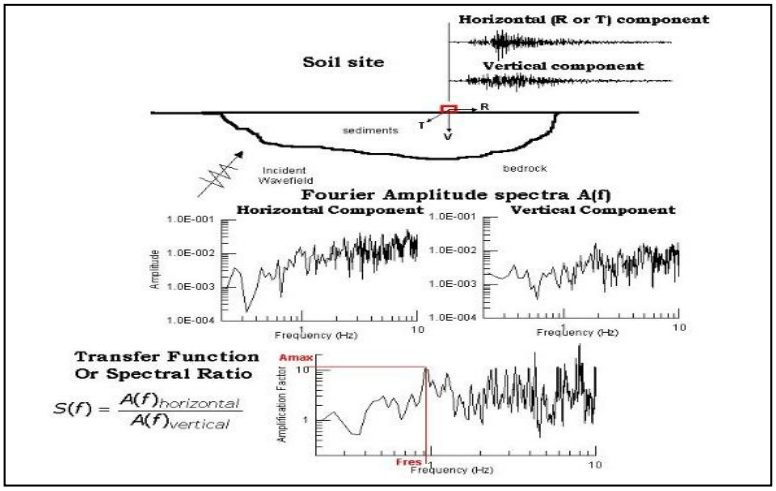
Gambar 3.7 Karakteristik Seismogram Mikrotremor

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).

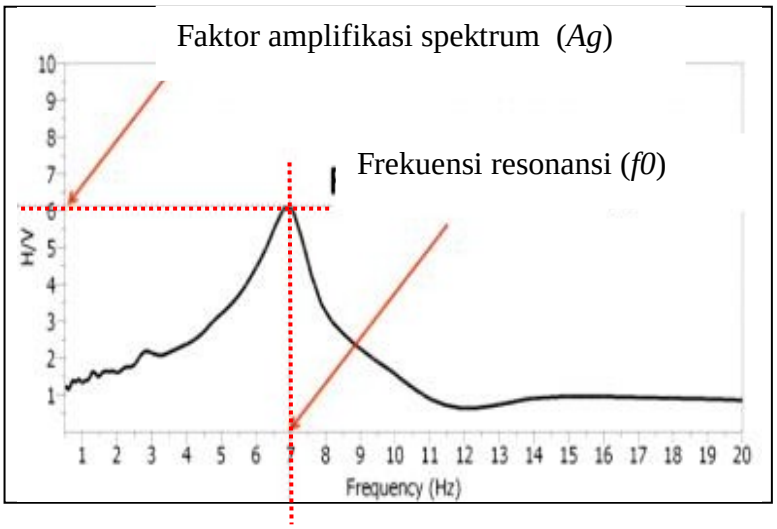
3.5 METODE HORIZONTAL TO VERTICAL SPECTRAL RATIO (HVSR)

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 (Ari Sungkowo, 2016). Prinsip metode HVSR diilustrasikan pada **Gambar 3.8**.

Hasil analisis HVSR menghasilkan sebuah spektrum HVSR dengan puncak spektrum pada frekuensi resonansinya. Frekuensi resonansi (*fo*) dan puncak spektrum mikrotremor (*A*) merupakan parameter yang mencerminkan karakteristik dinamika lapisan tanah permukaan, diilustrasikan **Gambar 3.9**.



Gambar 3.8 Ilustrasi prinsip metode HVSR mikrotremor

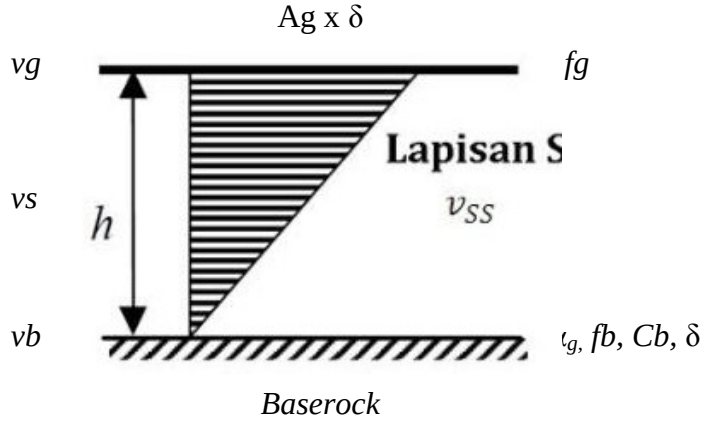


Gambar 3.9 Frekuensi resonansi f0 dan puncak spektrum Ag

Metode HVSR berguna untuk mengidentifikasi respon resonansi pada cekungan yang berisi material sedimen. Fenomena resonansi dalam lapisan sedimen yakni terjebaknya 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.

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*). Ilustrasi regangan geser tanah dapat dilihat pada **Gambar 3.10** Shear deformation of surface layer



Gambar 3.10 Shear deformation of surface layer

Jika $T = \frac{4h}{vs}$, $\frac{1}{T} = \frac{vs}{4h}$, dan $f = \frac{C}{4h}$, dengan f frekuensi dominan tanah, T periode dominan tanah, dan *h* ketebalan sedimen, maka frekuensi *baserock* (*fb*) dapat dirumuskan sebagai :

$$fb = \frac{Cb}{4h} \tag{3.1}$$

Jika *Ag* adalah faktor amplifikasi spektrum, maka frekuensi *surface ground* (*fg*) dapat dirumuskan sebagai :

$$fb = \frac{Cg}{4h\,Ag} \tag{3.2}$$

Dari Persamaan (3.1) bisa didapatkan rumus untuk mencari ketebalan sedimen (*h*), seperti di bawah ini :

$$fg = \frac{Cb}{4h}$$

$$h = \frac{Cb}{4\,fg} \tag{3.3}$$

Jika pergeseran di basement dinotasikan (δ), maka percepatan di batuan dasar (α_g) dirumuskan sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \alpha_g &= \left(\frac{2\pi}{T_g}\right)^2 \delta \\ &= \left(2\pi f_g\right)^2 \delta \end{aligned} \tag{3.4}$$

Dari Persamaan (3.4) didapatkan rumus pergeseran di basement (δ) sebagai berikut,

$$\delta = \frac{\alpha_g}{\left(2\pi f_g\right)^2} \tag{3.5}$$

Regangan geser tanah (γ) didapatkan dari penggabungan Persamaan (3.4) dan Persamaan (3.5), sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{A_g\,\delta}{h} \\ &= \frac{A_g\,\alpha_g}{4\,\pi^2\,{f_g}^2}\,\frac{4\,f_g\,A_g}{C_b} \\ &= \frac{{A_g}^2\,\alpha_g}{\pi^2\,f_g\,C_b} \end{aligned} \tag{3.6}$$

3.6 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*). (Ari Sungkowo, 2016)

Pada umumya *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, *Go*, 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 Thomson and Silva (2013), mengembangkan faktor amplifikasi dari rekaman mikroseismik 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 (T_{SITE}) pada lapisan sedimen permukaan ditentukan dengan cara membandingkan faktor amplifikasi dari gerakan horizontal T_H dengan faktor amplifikasi dari gerakan vertikal T_V (Daryono *et. al.*, 2009).

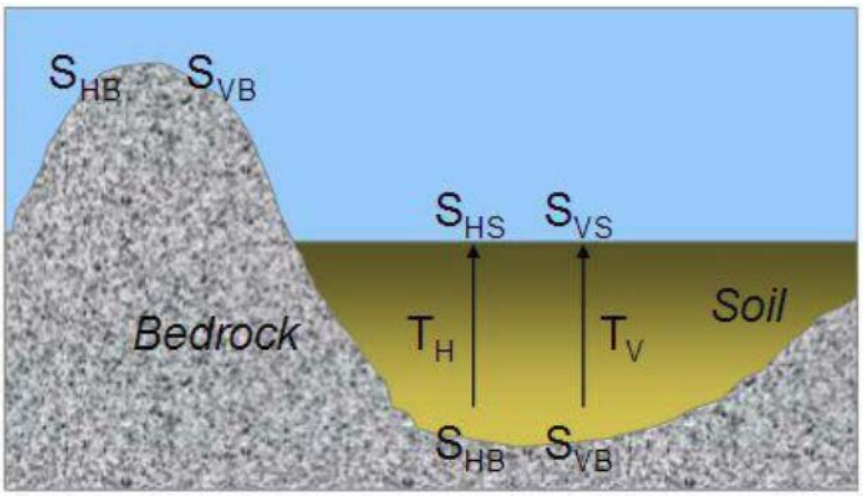
$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \tag{3.7}$$

Faktor amplifikasi T_H dan faktor amplifikasi T_V dirumuskan oleh Nakamura (2000) dengan

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \tag{3.8}$$

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \tag{3.9}$$

SHS adalah spektrum dari komponen horizontal sinyal mikrotremor di permukaan tanah, SHB adalah spektrum dari komponen horizontal sinyal mikrotremor pada dasar lapisan tanah, SVS adalah spektrum gerak vertikal sinyal mikrotremor di permukaan tanah, dan SVB merupakan spektrum dari komponen gerak vertikal sinyal mikrotremor pada dasar lapisan tanah (Nakamura, 2000). Asumsi yang digunakan dalam metode Nakamura ditunjukkan pada **Gambar 3.11.**



Gambar 3.11 Model cekungan yang berisi material sedimen (Nakamura, 2000)

Sinyal mikrotremor tersusun dari beberapa jenis gelombang, tetapi yang utama adalah gelombang Rayleigh yang merambat pada lapisan sedimen di atas batuan dasar. Komponen vertikal mikrotremor tidak teramplifikasikan oleh lapisan sedimen di dataran aluvial. Pengaruh gelombang Rayleigh pada rekaman sinyal mikrotremor mempunyai nilai yang sama untuk komponen vertikal dan horizontal saat rentang frekuensi 0,2 Hz sampai 20 Hz, sehingga rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati satu.

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \tag{3.10}$$

apabila dibulatkan menjadi

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} = 1 \text{ atau } \frac{S_{VB}}{S_{HB}} = 1 \tag{3.11}$$

Karena rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati nilai satu, maka gangguan yang terekam pada permukaan lapisan tanah akibat efek dari gelombang Rayleigh dapat dihilangkan, sehingga hanya ada pengaruh yang disebabkan oleh struktur geologi lokal atau *site effect*. Dengan substitusi persamaan (3.8), (3.9), dan (3.11) ke persamaan (3.7), maka diperoleh persamaan (3.12). Persamaan (3.12) menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya atau *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSR). Persamaan (3.12) dapat juga ditulis

$$HVSR = T_{SITE} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} = \frac{\sqrt{[(S_{Utara-Selatan})^2 + (S_{Barat-Timur})^2]}}{S_{Vertikal}} \tag{3.12}$$

3.7 FAKTOR AMPLIFIKASI SPEKTRUM TANAH (Ag)

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 (*Ag*) dapat diketahui dari tinggi puncak spektrum kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor yang telah diolah sehingga dihasilkan spektrum HVSR Persamaan (3.12). 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.

3.8 FREKUENSI DOMINAN TANAH (fg) DAN PERIODE DOMINAN (Tg)

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 gelomban 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 (*fg*) 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 spketrum 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 frekeunsi 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.

Periode predominan T_g merupakan salah satu parameter yang mempengaruhi nilai percepatan getaran tanah maksimum. Periode predominan diperoleh dari frekuensi predominan (f_g) yang dapat mengindikasikan karakter lapisan batuan yang ada di suatu wilayah (Arifin *et. al*., 2014). Periode predominan tanah akan mempengaruni besarnya percepatan batuan pada lapisan batuan dasar (*base rock*) dan pada permukaan (*ground surface*).

Berdasarkan besarnya periode predominan (T_g), dapat diketahui perbedaan karakteristik tanah dan geologi di daerah penelitian seperti pada **Tabel 3.3.**

Tabel 3.3 Klasifikasi tanah konversi Kanai & Tanaka dengan Omote-Nakajima (Gunawan dan Subardjo, 2005; Pitilakis *et. al*., 2004).

Klasifikasi Tanah		**Periode Predominan (s)**	**Frekuensi Predominan (Hz)**	**Keterangan**
Kanai	**Omete-Najima**			
Jenis I	Jenis A	0,05 – 0,15	6,7 - 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan pasir berkerikil keras (*hard sandy gravel*)
Jenis II	Jenis B	0,1 – 0,25	4 – 6,7	Batuan *alluvial* dengan ketebalan 5m. Terdiri dari pasir keriki (*sandy gravel*), lempung keras berpasir (*sandy hard clay*), lempung *(loam*), dan sebagainya.
Jenis III	Jenis C	0,25 – 0,4	2,5 - 4	Batuan *alluvial* yang hampir sama dengan tanah jenis II, hanya dibedakan oleh adanya formasi yang belum diketahui (*buff formation*).
Jenis IV	Jenis D	>0,4	1,4 – 2,5	Batuan *alluvial* yang terbentuk dari sedimentasi delta, *top soil*, lumpur, tanah lunak, humus, endapan delta atau endapan lumpur, yang tergolong ke dalam tanah lembek, dengan kedalaman 30m.

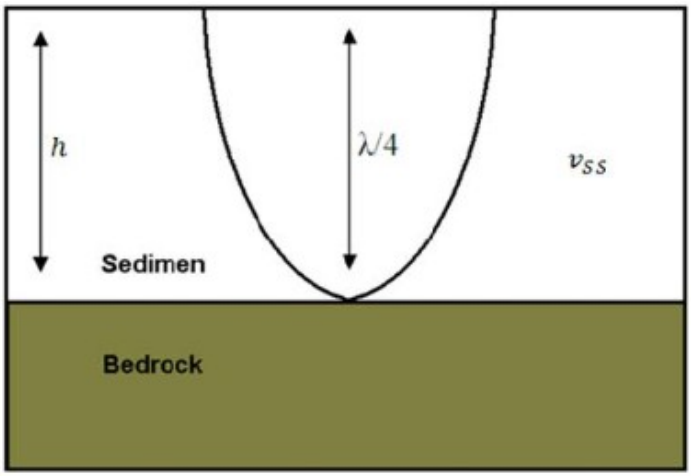
Sumber : Gunawan dan Subardjo, 2005; Pitilakis et. al., 2004

3.9 KETEBALAN SEDIMEN TANAH (h)

Frekuensi dominan mempunyai hubungan dengan ketebalan sedimen di suatu wilayah. Frekuensi dominan dari hasil pengukuran mikorotremor dilapangan dapat digunakan untuk mengestimasi ketebalan sedimen. Perbandingan antara frekuensi dominan observasi dan numerikjuga menunjukan adanya hhubungan 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) diatasnya memiliki ketebalan lapisan sedimen (*h*) dan kecepatan gelombang geser rata-rata (v_s) pada lapisan lunak (sedimen), dapat dilihat pada **Gambar 3.12**. Maka persamaan frekuensi dominannya yaitu :

$$fg = \frac{v_s}{4h} \tag{3.13}$$

Notasi untuk rumusan diatas adalah f_g frekuensi dominan, v_s kecepatan rata- rata gelombang geser, *h* ketebalan sedimen. Berdasar persamaan ini selain frekuensi dominan, kecepatan gelombang sekunder juga menentukan hasil perhitungan ketebalan sedimen.



Gambar 3.12 Model dua lapisan: *bedrock* dan sedimen (Ibs-von dan Jurgen, 1999)

3.10 INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg)

Indeks kerentanan seismik (*Kg*) merupakan indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi saat terjadi gempabumi. Indeks kerentanan seismik berkaitan dengan kondisi geomorfologis. Beberapa faktor yang mempengaruhi indeks kerentanan seismik di antaranya adalah sedimen berusia kuarter yang memiliki tingkat soliditas rendah sehingga sangat berpengaruh terhadap faktor amplifikasi saat terjadi gempabumi, sedangkan pada batuan berumur tersier cenderung lebih *solid* dan sangat stabil terhadap getaran gempabumi sehingga tidak menimbulkan amplifikasi (Fah *et. al*., 2006). Indeks kerentanan seismik dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.14) (Nakamura, 1997), yang didapatkan dari Persamaan (3.6), sebagai berikut :

$$Kg = \frac{Ag^2}{fg} \tag{3.14}$$

Notasi dalam persamaan (3.14) tersebut adalah: K_g (indeks kerentanan seismik), A_g (puncak spektrum HVSR), dan f_g (frekuensi resonansi tanah, Hz).

Nilai indek kerentanan seismik dapat memberikan informasi potensi tingkat goncangan akibat gempa bumi pada suatu daerah. Efek lokal yang menyebab kerusakan saat gempa bumi berkorelasi dengan parameter HVSR microtremor, yang dicirikan oleh frekuensi dominan tanah (*fg*) rendah (periode tinggi) dan faktor amplifikasi tanah (*Ag*) tinggi. Indek kerentanan siesmik (*Kg*) menunjukan korelasi hubungan antara amplifikasi spektrum tanah (*Ag*) dengan frekuensi dominan (*fg*).

3.11 PEAK GROUND ACCELERATION (PGA)

Percepatan adalah parameter yang menyatakan perubahan kecepatan mulai dari keadaan diam sampai kecepatan tertentu. Percepatan getaran tanah puncak atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) adalah nilai percepatan getaran tanah terbesar yang pernah terjadi di suatu tempat yang diakibatkan oleh gelombang gempabumi. Percepatan getaran tanah maksimum yang terjadi pada suatu titik tertentu dalam suatu kawasan dihitung dari akibat semua gempabumi

yang terjadi pada kurun waktu tertentu dengan memperhatikan besar magnitudo dan jarak hiposenternya, serta periode predominan tanah dimana titik tersebut berada (Kirbani, 2012).

Percepatan getaran tanah puncak 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. (Ari Sungkowo, 2016).

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 gempabumi. Faktor yang merupakan sumber kerusakan dinyatakan dalam parameter percepatan tanah sehingga data PGA akibat getaran gempabumi pada suatu lokasi menjadi penting untuk menggambarkan tingkat bahaya gempabumi di suatu lokasi tertentu.

Pengukuran percepatan tanah dilakukan dengan a*ccelerograph* 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 dipermuakaan 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 *peack 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 diwilayah yang lain. Karena tidak adanya cukup data untuk menurunkan suatu fungi 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 penetuan 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 Kanai yang menambahkan parameter periode dominan tanah dalam rumus atenuasi.

Metode Kanai merupakan salah satu metode pendekatan empiris yang dapat digunakan untuk menghitung nilai percepatan getaran tanah puncak. Metode ini memperhitungkan input parameter gempabumi seperti episenter,kedalaman dan magnitudo, serta periode predominan tanah sebagai input parameter hasil analisis mikrotremor. Rumus empiris untuk menghitung nilai percepatan getaran tanah menggunakan metode Kanai (1966) ditunjukkan oleh Persamaan (3.15). (Douglas, 2011):

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\sqrt{T_g}}\, 10^{\alpha_2 M - P\log_{10} R + Q} \tag{3.15}$$

dengan

$$P = \alpha_3 + {}^{\alpha_4}/_{R} \tag{3.16}$$

dan

$$Q = \alpha_5 + {}^{\alpha_6}/_{R} \tag{3.17}$$

Notasi dalam rumus di atas adalah :

a = percepatan tanah di titik pengukuran (gal)

T_g = periode predominan tanah (s)

M =magnitudo gempabumi (skala Richter)

R = jarak hiposenter (km)

dengan konstanta-konstanta a_1= 5, a_2= 0,61, a_3= 1,66, a_4 = 3,60, a_5=0,167, a_6= -1,83.

3.12 KECEPATAN GELOMBANG GESER (Vs)

Kecepatan gelombang geser (*shear wave*) adalah paramater yang penting untuk menentukan karakteristik dinamika tanah. Gelombang S di perlukan dalam analisa dan evaluasi *site effect* khususnya pada lapisan sedimen yang berada diatas batuan dasar. Vs ditentukan dari perambatan gelombang seismik yang tegak lurus terhadap arah rambatan gelombangnya. Nilai kecepatan gelombang geser dapat merupakan representasi dari sifat geser struktur tanah (Ari Sungkowo, 2016).

Beberapa metode dapat digunakan untuk menghitung kecepatan gelombang geser tanah, diantranya 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 Vs 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 :

$$V_s = 96.9\ N^{0.314}\ \text{(all sites)} \qquad (3.18)$$

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

Selain persamaaan empiris, nilai kecepatan gelombang sekunder dapat didekati dengan metode replikasi, yaitu dengan cara membuat persamaan dari kesesuain nilai N-SPT. Nilai N-SPT yang telah diketahui nilai Vs 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:

$$Vs = 40.083\ x\ (N)^{0.5562} \tag{3.19}$$

dengan v_s adalah kecepatan gelombang geser (m/s) dan N (ditentukan dari SPT). Karena terbatasnya data log bor, untuk estimasi kecepatan gelombang geser selain dilakukan dengan replikasi data *seismic down hole*, korelasi Vs dan N-SPT dengan rumusan Imai dan Tonouchi (1982), juga dilakukan dengan inversi kurva *Horisontal to Vertical Ratio* (HVSR) dari mikrotremor. Inversi ini dilakukan dengan metode yang di sampaikan oleh Herak (2008), prinsip metode ini adalah mencocokan 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 (Vs30). Inversi dilakukan pada lapisan kedalaman 30 m. Persamaan Vs30 diestimasi dengan persamaan berikut :

$$V_{s30} = \frac{h30}{\sum \frac{hi}{vsi}} \tag{3.20}$$

Untuk lapis i = 30 m

dengan

Vs30 : kecepatan gelombang geser sampai pada kedalaman 30 meter,

h_i : ketebalan lapisan tanah,

v_s : kecepatan gelombang geser pada titik pengukuran

3.13 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 , 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*).

Regangan geser tanah (γ) didapatkan dari penggabungan Persamaan (3.4) dan Persamaan (3.5), sebagai berikut,

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{A_g\,\delta}{h} \\ &= \frac{A_g\,\alpha_g}{4\,\pi^2\,{f_g}^2}\,\frac{4\,f_g\,A_g}{C_b} \\ &= \frac{{A_g}^2\,\alpha_g}{\pi^2\,f_g\,C_b} \end{aligned} \tag{3.21}$$

Nilai *ground shear-strain (γ)* diperoleh dengan mengalikan antara indeks kerentanan seismik berdasarkan mikrotremor dengan percepatan di batuan dasar. Nilai percepatan dibatuan 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.

3.14 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 dengan menggunakan *software* dinver dari geopsy. Dinver ini didasarkan pada medium homogen viscoelastisitas dengan gelombang vertikalnya diganti gelombang primer (secara teori gelombang SV). Sebagaimana dipaparkan oleh pengembang geopsy, dalam pengembangan *software* Dinver bahwa kurva HVSR dipengaruhi oleh 6 parameter, yaitu v_s,v_p, Q_s, Q_p, h dan ρ.

Dinver membandingkan antara kurva HVSR teoritis dengan kurva HVSR hasil pengukuran lapangan (HVSR Obsevasi). Dengan merubah parameter input Dinver di atas, maka kurva HVSR teoritis akan berubah. Dengan melakukan iterasi maka akan didapatkan kurva HVSR yang paling bagus (dengan ketidaksesuain terkecil) antara kurva HVSR teoritis dengan kurva HVSR hasil pengukuran, dirumuskan dengan Persamaan (3.22) dan (3.23).

$$m = \sum i\{[HVSR_{Obs}(fi) - HVSR_{THE}(fi)]Wi\}^2 \tag{3.22}$$

$$Wi = [HVSR_{Obs}(fi)]^E, E \geq 0 \tag{3.23}$$

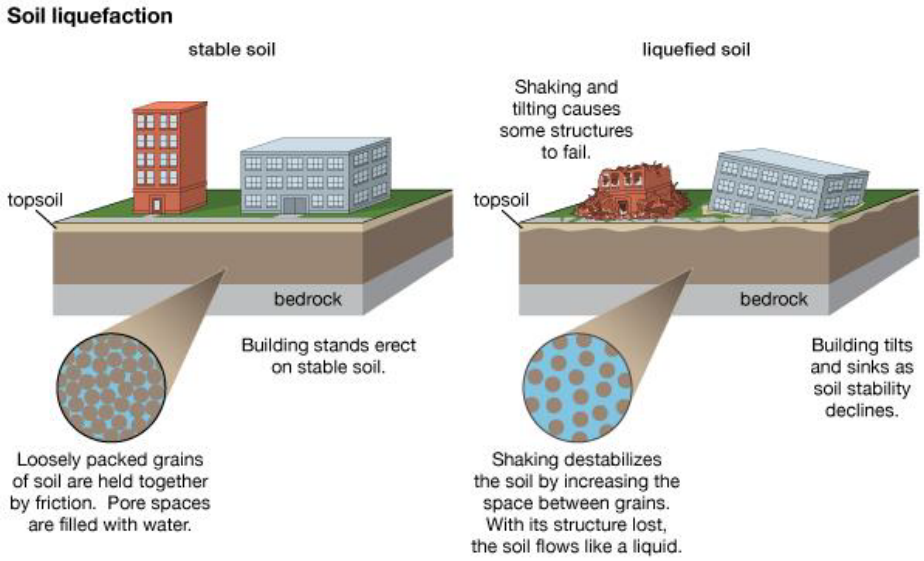
Notasi rumus di atas adalah $HVSR_{Obs}$ (HVSR observasi lapangan), $HVSR_{THE}$ (HVSR teori), dan *W* adalah pembobotan.

3.15 LIKUIFAKSI

Likuifaksi adalah fenomena hilangnya kekuatan tanah akibat getaran gempabumi. Likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas (tidak padat) dan jenuh air (Tohari *et. al*., 2015). Dikarenakan lapisan tanah dengan ukuran pasir merupakan lapisan yang memiliki porositas baik, sehingga memungkinkan lapisan ini menyimpan dan mengalirkan air. Lapisan yang memiliki porositas yang baik

memicu penyerapan air dalam lapisan yang menyebabkan lapisan tersebut jenuh air.

Seiring naiknya tekanan air yang diakibatkan oleh guncangan gempa, maka tegangan efektif menjadi berkurang. Modulus pasir menurun bersamaan dengan turunnya tegangan efektif. Dengan begitu tanah pasir menjadi melunak (mencair). Oleh karena itu tanah tidak mampu menopang beban di atasnya dan menyebabkan amblasnya bangunan, miring ataupun longsor (Muntohar, 2010). Ilustrasi terjadinya likuifaksi akibat guncangan gempa dapat dilihat pada **Gambar 3.13**.



Gambar 3.13 Ilustrasi terjadinya likuifaksiakibat gempa (Encyclopedia Britannica, 2012)

Potensi likuifaksi dapat diketahui melalui hubungan regangan dengan sifat dinamis tanah seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3.4**. Ketika suatu daerah memiliki nilai regangan tanah berkisar antar 10^{-1} - 10^{-2} maka diperkirakan daerah tersebut berpotensi mengalami likuifaksi ketika terjadi gempabumi.

Tabel 3.4 Hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah (Nakamura, 1997)

Nilai Regangan (γ)	**10^{-6} 10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1}**		
Fenomena	Gelombang, Getaran	Retak, Penurunan Tanah	Longsor, Penurunan Tanah, Likuifaksi
Sifat Dinamis	Elastis	Plastik Elastic	Keruntuhan
		Efek Ulangan, Efek Kelajuan dan Pemuatan	

BAB IV
METODOLOGI PENELITIAN

4.1 LOKASI PENELITIAN

Lokasi penelitian terletak di wilayah Kabupaten Klaten meliputi 9 kecamatan, yaitu : Kecamatan Gantiwarno, Wedi, Bayat, Kalikotes, Klaten Tengah, Klaten Selatan, Jogonalan, Prambanan, Trucuk dan sebagian wilayah Kabupaten Gunung Kidul yang berbatasan dengan Kabupaten Klaten.

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 ± 1,5 x 1,5 km. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan TDL 303s *Digital Portable Seismograph.*

4.2.1 Peralatan

Peralatan penelitian yang digunakan terdiri dari perangkat lunak dan perangkat keras.

1. Perangkat lunak (*Software*) :
    a. *DataPro* berfungsi untuk akuisisi data mikrotremor.
    b. *Google Earth* berfungsi untuk mengetahui gambaran lokasi penelitian dan menentukan titik pengambilan data.
    c. *Sessary Geopsy* versi 2.9.1 berfungsi untuk memilih sinyal tanpa *noise* dari data mikrotremor dengan proses *windowing* dan *cutting.*
    d. *Dinver* pada software *Sessaray-Geopsy* versi 2.9.1 dari geopsy.org untuk menganalisis kurva menganalisis kurva H/V menggunakan metode *Ellipticity curve.*
    e. *ArcGIS* berfungsi untuk membuat peta desain penelitian dan peta mikrozonasi.
    f. *Microsoft Word 2007* berfungsi untuk menyusun laporan.

g. *Microsoft Excel 2007* untuk mengolah data.

2. Perangkat keras (*Hardware*) :
   a. *Global Positioning System* (GPS) di Smartphone Xiaomi Redmi Note 3 digunakan untuk menentukan posisi setiap titik penelitian.
   b. *Seismometer* tipe DS-4A untuk mengukur getaran tanah pada setiap titik penelitian.
   c. *Digitizer* tipe TDL-303S untuk merekam getaran tanah yang diperoleh dari seismometer.
   d. Antena GPS terhubung dengan *digitizer* berfungsi untuk menentukan posisi pada setiap titik penelitian.
   e. Kabel untuk menghubungkan *digitizer* dengan seismometer.
   f. Kompas digunakan untuk menentukan arah utara saat pemasangan seismometer.
   g. *UPS (Uninterruptible Power Supply*) sebagai sumber daya listrik untuk menghidupkan *digitizer*.
   h. Laptop digunakan untuk akuisisi dan analisis data.
   i. Lembar *chek list* survei mikrotremor.

   Perangkat keras yang digunakan ditunjukkan pada **Gambar 4.1**.



Digitizer



Seismometer



Laptop



GPS Antena



UPS



Kompas

Gambar 4.1 Perangkat Keras Pengukuran Mikrotremor

4.2.2 Teknik Pengumpulan Data

Sebelum pengambilan data, dilakukan pra-survei dan survei lapangan.

1. Pra-Survei

   Tahapan yang dilakukan selama pra-survei yaitu penentuan lokasi penelitian, survei umum lokasi penelitian dan pembuatan desain survei. Penentuan lokasi penelitian didasarkan pada:

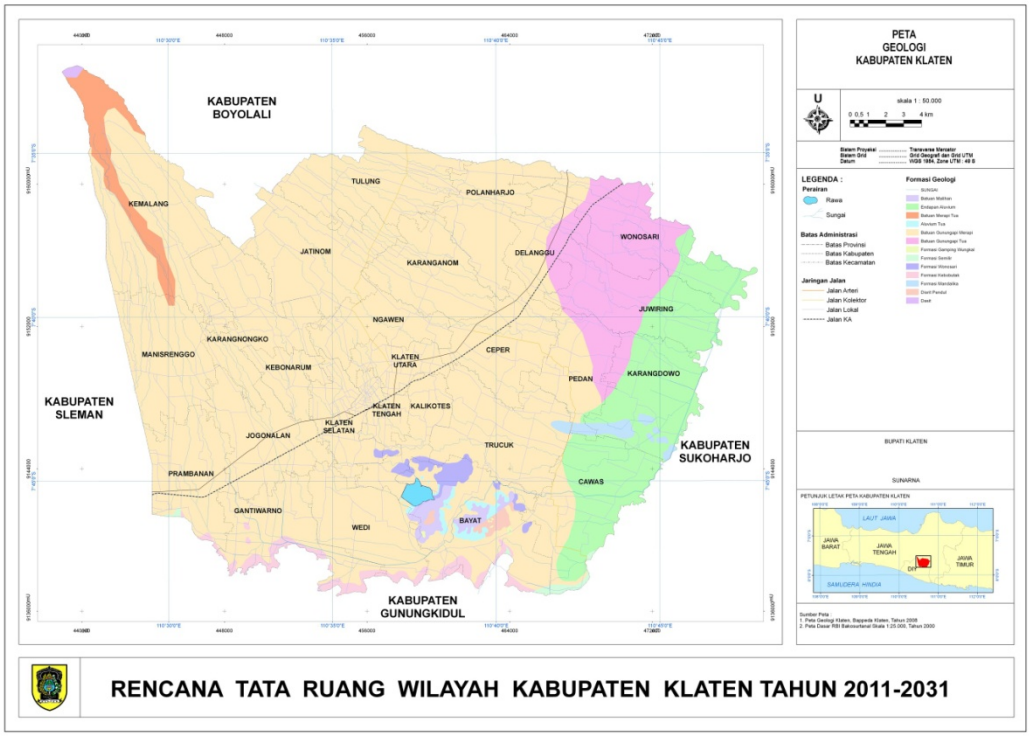
   a. Menurut IAGI (2006), gempa Yogyakarta tidak hanya mengguncang daerah yang berada di sepanjang jalur Sesar Opak, namun juga beberapa daerah di Kabupaten Klaten Jawa Tengah yang juga merasakan guncangan gempa yang cukup besar.

   b. Berdasarkan **Gambar 2.2**, daerah yang berada di kawasan Klaten bagian barat dan barat daya mengalami guncangan gempa dengan intensitas VII MMI yang diakibatkan oleh Gempabumi Yogyakarta 2006 (PVMBG dalam Supartoyo *et. al.*, 2016).

   Tahapan kedua yaitu survei umum lokasi penelitian, bertujuan untuk mengetahui secara langsung daerah penelitan baik dari segi kepadatan

penduduk, lingkungan sekitar juga kondisi topografi. Secara umum wilayah penelitian berada pada wilayah yang datar, banyak area pesawahan serta padat penduduk, dan wilayah pegunungan di Kecamatan Bayat serta perbatasan Gunung Kidul.

Tahapan ketiga yaitu pembuatan desain survei lokasi penelitian yang dibuat secara grid sebanyak 111 titik dengan spasi antar titik 1,5 km. Hal ini bertujuan supaya dapat mewakili setiap formasi geologi yang ada di lokasi penelitian. Pembuatan desain survei mengacu pada peta geologi Kabupaten Klaten seperti ditunjukkan pada **Gambar 4.2.**

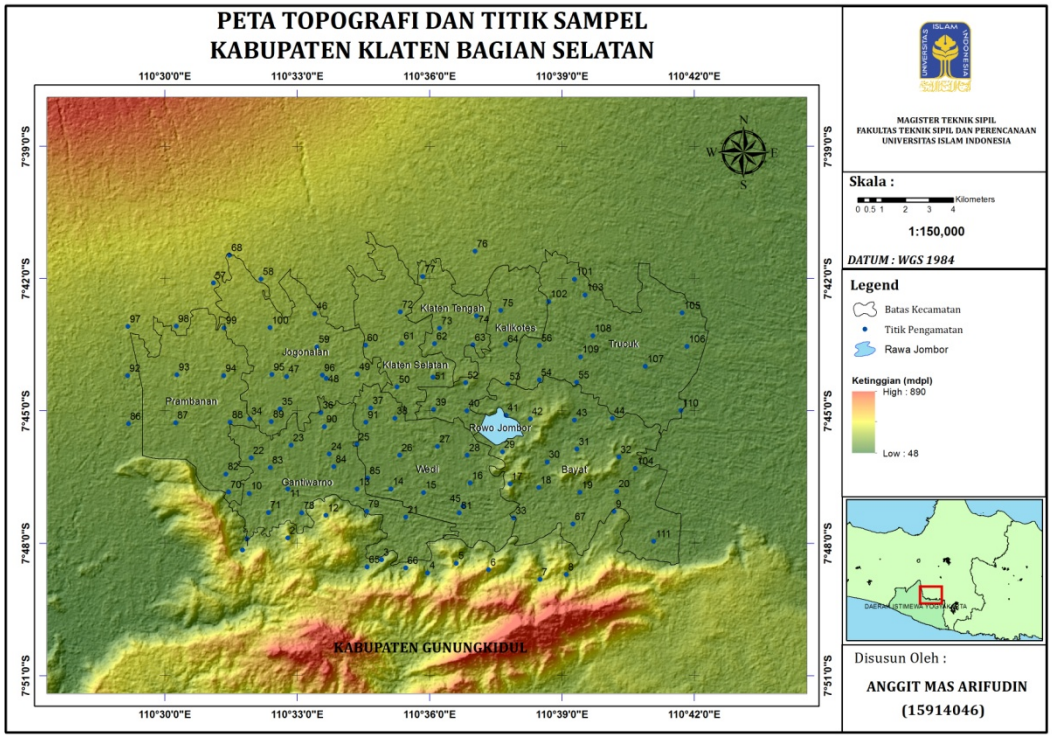


Gambar 4.2 Peta Geologi Kabupaten Klaten

2. Survei Lapangan

Survei lapangan bertujuan untuk menemukan lokasi titik penelitian yang telah dibuat pada desain survei, menentukan lokasi penempatan sensor sesuai dengan aturan *SESAME European Research Project* pada **Tabel 4.1** , sehingga mempermudah pengambilan data. Hasil dari survei lapangan ditetapkan 111 titik. Lokasi titik pengambilan data mengalami pergeseran beberapa meter dikarenakan lokasi awal berada di tengah sawah, di dalam

kandang ternak, di pinggiran parit, di tengah selokan, di dalam rumah warga, dan di samping jalan raya. Titik pengukuran mikrotremor setelah dilakukan survei lapangan ditetapkan sebanyak 111 titik dan 1 titik bor seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4.3** dan **Gambar 4.4**.



Gambar 4.3 Rencana titik perekaman mikrotremor berdasarkan topografi



Gambar 4.4 Rencana titik pengukuran mikrotremor dan bor

3. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan selama ±30 menit setiap titik penelitian dengan frekuensi *sampling* 100 Hz. Pemilihan frekuensi sampling harus memenuhi syarat Nyquis yaitu frekuensi *sampling* minimal dua kali lipat dari frekuensi maksimum sinyal informasi yang akan di sampel supaya tidak menimbulkan efek aliasing (frekuensi tertentu terlihat seperti frekuensi yang lain) (Yulisun, 2016). Pengambilan data dilakukan sesuai dengan syarat yang ditetapkan oleh *SESAME European Research Project* pada **Tabel 4.1**. Ada adua macam data yang digunakan pada penelitian ini, yaitu :

a. 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, timurbarat, dan vertikal dalam bentuk *soft file*. Data ini dikumpulkan melalui survei mikrotremor di lapangan. Durasi rekaman kurang lebih 30 menit.

b. Data Sekunder.

Data sekunder diperoleh dari studi pustaka berupa laporan hasil penelitian maupun data dari instansi terkait dengan data yang diperlukan. Data *borlog*, data hasil uji tanah, data mikrotremor, peta-peta pendukung lainnya.

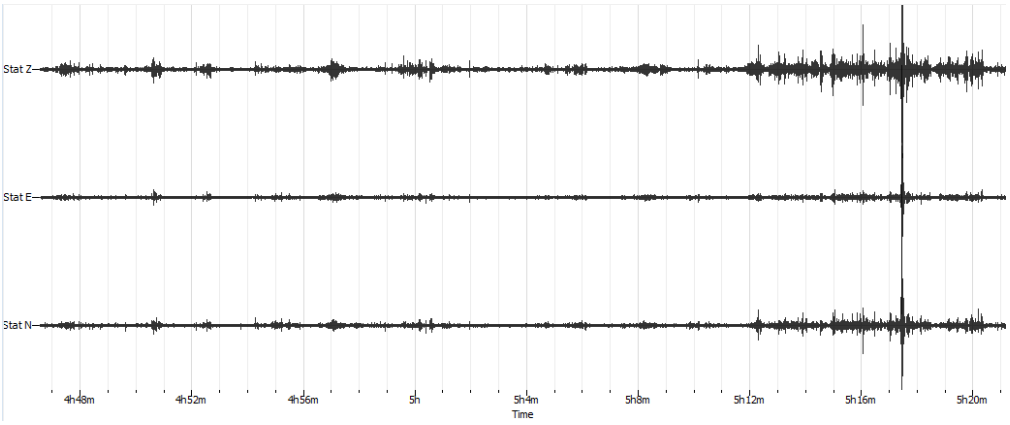
Tabel 4.1 Syarat pengukuran mikrotremor (SESAME, 2004)

Jenis Parameter	**Saran yang dianjurkan**	
Durasi Pencatatan	*fg* minimum yang diharapkan (Hz)	Durasi pencatatan minimum yang disarankan (menit)
	0.2	30
	0.5	20
	1	10
	2	5
	5	3
	10	2
Coupling soil-sensor alami (*in situ*)	1. Atur sensor langsung pada permukaan tanah 2. Hindari menempatkan sensor seismograf pada permukaan tanah lunak (lumpur, semak-semak) atau tanah lunak setelah hujan.	
Coupling soil-sensor buatan atau *artificial*	1. Hindari lempengan yang terbuat dari material lunak seperti karet atau busa. 2. Pada kemiringan yang curam di mana sulit mendapatkan kedataran sensor yang baik, pasang sensor dalam timbunan pasir atau wadah yang diisi pasir	
Keberadaan bangunan atau pohon	1. Hindari pengukuran dekat dengan bangunan, gedung bertingkat, dan pohon yang tinggi, jika tiupan angin di atas ±5 m/detik. Kondisi ini sangat mempengaruhi hasil analisa HVSR. 2. Hindari pengukuran di lokasi tempat parkiran, pipa air dan gorong-gorong.	
Kondisi cuaca	1. Angin : Lindungi sensor dari angin (lebih cepat dari 5 m/s). 2. Hujan : Hindari pengukuran pada saat hujan lebat. Hujan ringan tidak memberikan gangguan berarti. 3. Suhu : Mengecek kondisi sensor dan mengikuti instruksi pabrik.	
Gangguan	1. Sumber monokromatik : hindari pengukuran mikrotremor dekat dengan mesin, industri, pompa air, generator yang sedang beroperasi. 2. Sumber sementara : jika terdapat sumber getar *transient* (jejak langkah kaki, mobil lewat, motor lewat) tingkatkan durasi pengukuran untuk memberikan jendela yang cukup untuk analisis setelah gangguan tersebut hilang.	

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 tiga 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 (.MSD) menggunakan perangkat lunak DATAPRO dan menghasilkan empat file, yaitu file komponen vertikal, utara-selatan, barat-timur, dan *file header*. Dapat dilihat pada **Gambar 4.5**.



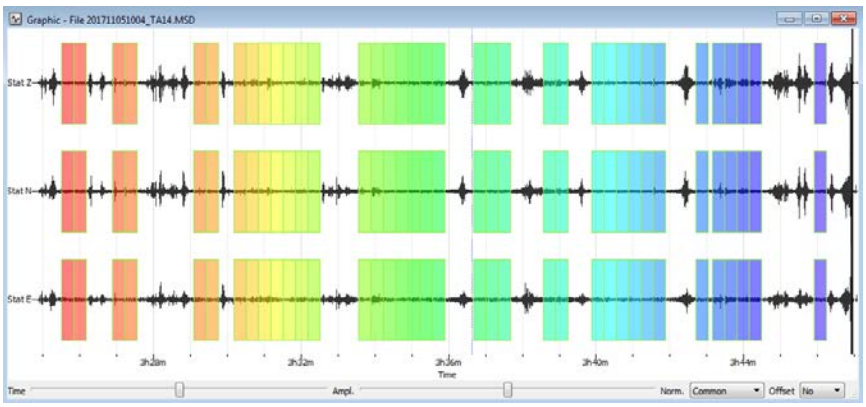
Gambar 4.5 Sinyal mikrotremor tiga komponen di Kecamatan Gantiwarno

4.3.2 Perhitungan Frekuensi Dominan (f_0), Faktor Amplifiksi (*Ag*), dan Periode Dominan (*Tg*)

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 (*fg*) dan puncak kurva HVSR (faktor amplifikasi tanah, *Ag*). Secara ringkas tahap pengolahan metode HVSR dengan perangkat *geopsy* di sajikan dalam **Gambar 4.7**.

Pengolahan dengan GEOPSY ini dimulai dengan :

1. input data (file rekaman mikrotremor yang telah dirubah formatnya menjadi a*scii* atau *miniseed*) ke dalam geopsy.
2. *filtering* sinyal, sinyal mikrotremor mentah diambil dengan band pass 0,5 Hz – 25 Hz saja, dengan demikian sinyal yang dipakai adalah sinyal dengan frekuensi rendah sesuai dengan karakteristik sinyal mikrotremor.
3. *windowing* sinyal, sinyal akan dibagi menjadi beberapa kotak (*window*). Pemilahan *window* dilakukan secara manual. 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*. Contoh *windowing* sinyal dapat dilihat pada **Gambar 4.6**.



Gambar 4.6 Contoh windowing sinyal pada titik 14

4. 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 koeffisien *bandwith*. Untuk meminimalkan efek perbatasan karena *windowing* amplitudo dari spektrum digunakan kosinus lancip.

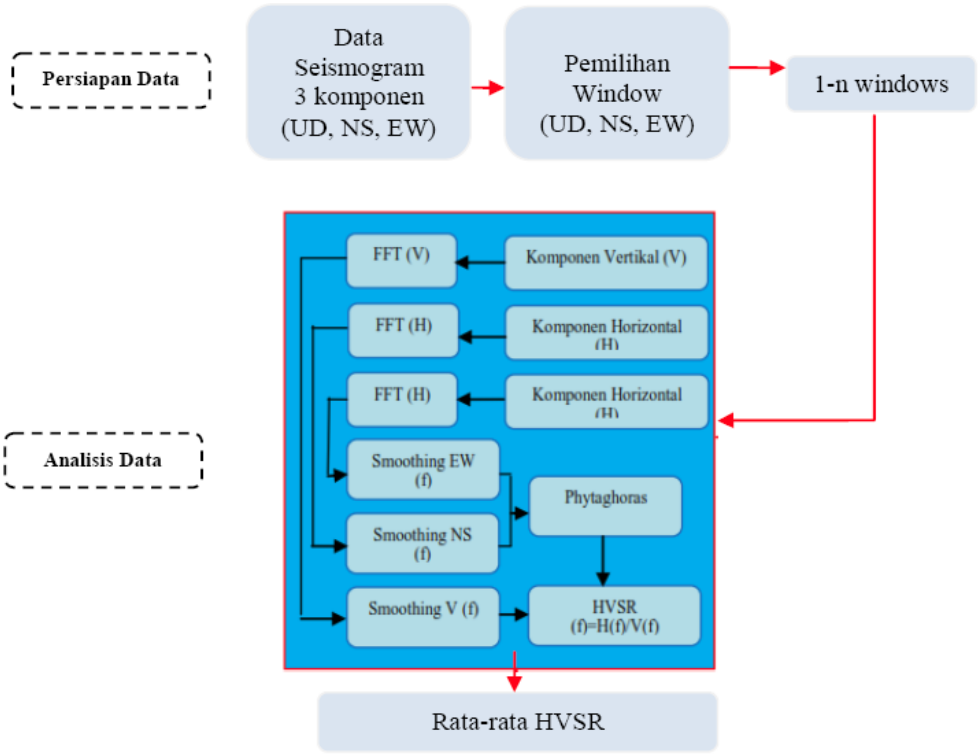
Spektrum Fourier komponen horisontal dirata-rata dengan akar rerata kuadrat dan dibagi dengan spektrum fourier komponen vertikal dalam kawasan frekuensi hingga didapatkan rata-rata spektrum H/V, dari rata-rata spektrum H/V ini dapat ditentukan frekuensi dominan (f_o) serta puncak spektrum HVSR yang merupakan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

Kriteria untuk kurva H/V yang dapat dipercaya (*reliable*) meliputi tiga hal yang penting (SESAME, 2004). Ketiga kriteria itu adalah :

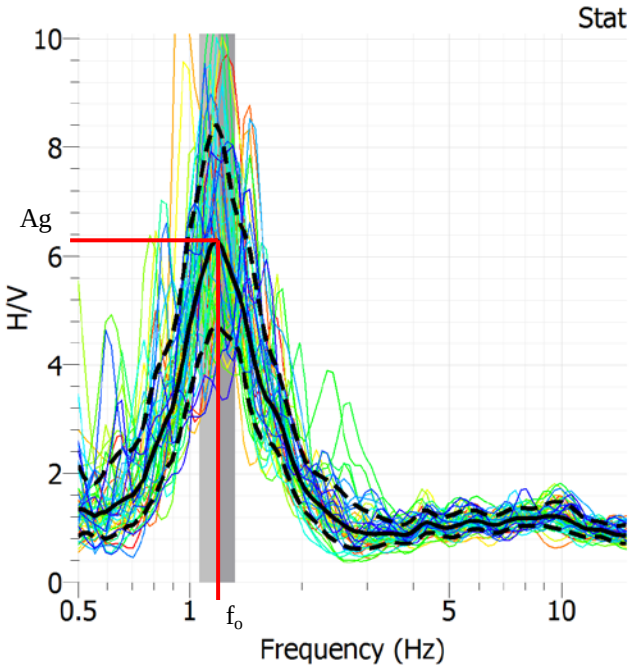
1. $f_0 > 10/l_w$
2. $n_c(f_0) > 200$
3. $\sigma_A(f) < 2 \; for \; 0.5 < f < 2(f_0) \; if \; f_0 > 0.5 \; Hz$ dan
   $\sigma_A(f) < 3 \; for \; 0.5 < f < 2(f_0) \; if \; f_0 > 0.5 \; Hz$

dengan frekuensi f_0 pada puncak H/V, l_w panjang window dan $n_c = l_w \, . n_w \, . f_0 \, . \sigma_A(f)$ deviasi standar dari $A_{H/V}(f)$.

Berdasarkan hubungan $T = \frac{1}{f_0}$, dari pengolahan data dengan metode f_0 HVSR maka akan didapatkan nilai periode dominan tanah (T_g) di lokasi pengukuran, karena yang terukur dari kurva adalah *fo*, dapat dilihat pada **Gambar 4.8**. Dari nilai-niai yang terukur dari semua titik pengukuran kemudian dibuat peta frekuensi dominan tanah (*fg*) dan peta faktor amplifikasi spektrun (A_g) daerah penelitian.



Gambar 4.7 Tahap-tahap Metode HVSR (Ari Sungkowo, 2016)



Gambar 4.8 Kurva HSR Titik 22

4.3.3 Perhitungan Ketebalan Sedimen (*h*)

Nilai ketebalan sedimen dihitung dengan menggunakan Persamaan (3.13). Nilai kecepatan gelombang geser (v_s) yang digunakan pada penelitian ini

adalah digunakan nilai inversi kurva HVSR setiap titik pengukuran. 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.

4.3.4 Perhitungan Indeks Kerentanan Seismik (*Kg*)

Sedangkan nilai indeks kerentanan seismik (K_g) di semua titik ukur diperoleh dengan menggunakan Persamaan (3.14) dengan mengkuadratkan faktor amplifikasi spektrum tanah (A_g) dibagi dengan frekuensi dominan (f_g). Nilai-nilai indek kerentanan seismik yang diperoleh kemudian dipetakan untuk mengetahui distribusi nilai indeks kerentanan seismik di daerah penelitian.

4.3.5 Perhitungan Nilai Percepatan Tanah Puncak (PGA)

Pengukuran *Peack Ground Acceleration* (PGA) daerah penelitian dilakukan dengan penentuan PGA dari hasil survei mikrotremor menggunakan persamaan atenuasi Kanai (1966) Persamaan (3.15) , yang mempertimbangkan hubungan PGA dengan periode dominan tanah, magnitudo gempa dan jarak epicenter Gempa Jogja 2006.

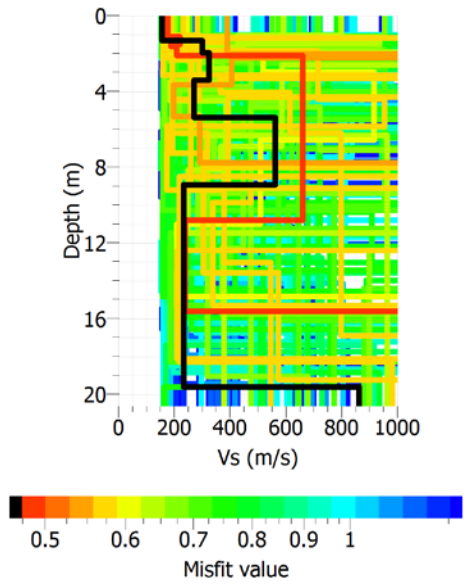
4.3.6 Perhitungan Nilai Kecepatan Gelombang Geser (*Vs*)

Perhitungan nilai kecepatan gelombang geser (*vs*) dalam penelitian ini dilakukan dengan metode pemodelan/inversi menggunakan perangkat lunak *Dinver* dan inversi dengan *ModelHVSR*.

1. Inversi dengan *Dinver*

Parameter kecepatan gelombang geser pada lapisan *bedrock* (v_b) pada persamaan indeks kerentanan seismik (K_g), diperoleh dari analisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve* (invers) pada program *Dinver*. Hasil analisis nilai kecepatan gelombang geser menggunakan program *Dinver* ditunjukkan pada **Gambar 4.9**. Hasil dari metode tersebut yaitu *ground profiles* kecepatan gelombang geser (v_s). Garis hitam pada *ground profiles* menunjukkan

model dengan nilai *misfit* terbaik. Nilai kecepatan gelombang geser pada lapisan *bedrock* (v_b) merupakan hasil interpretasi *ground profiles* v_s dengan nilai lebih dari 350 m/s.



Gambar 4.9 Analisis Nilai Vs dengan Dinver

4.3.7 Perhitungan Nilai Vs30

Perhitungan nilai Vs30 dilakukan menggunakan data v_s hasil inversi kurva HVSR. Setelah didapat kecepatan gelombang geser perlapisan, maka dapat ditentukan kecepatan sampai kedalaman 30 meter (Vs30). Perhitungan berdasar Persamaan (3.20) . Semua titik dilakukan inversi kemudian diinterpolasikan untuk melihat sebaran nilai Vs30.

4.3.8 Perhitungan *Ground Shear Strain* (GGS) atau Regangan Geser Tanah

Nilai regangan geser (γ) di semua titik ukur diperoleh dengan mengalikan nilai indek kerentanan seismik (*Kg*) dengan nilai percepatan tanah di batauan dasar Persamaan (3.21). Nilai percepatan tanah yang digunakan dalam perhitungan regangan geser didapat dari persamaan atenuasi Kanai seperti tertulis pada Persamaan (3.15). Nilai-nilai regangan geser yang diperoleh kemudian

dipetakan untuk mengetahui distribusi regangan geser yang selanjutnya dikorelasikan dengan potensi likuifaksi di daerah penelitian.

4.3.9 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 diperkiraan dari nilai parameter properti tanah lainnya, seperti densitas dan kecepatan gelombang geser yang dilakukan pada titik-titik di wilayah penelitian.

4.3.10 Analisis Likuifaksi

Potensi likuifaksi di daerah penelitian didasarkan dari nilai regangan geser tanah (γ) diprediksi dari tabel hubungan antara regangan dengan sifat dinamis tanah yang telah ditunjukkan pada **Tabel 3.4** pada bab sebelumnya dan hubungan dengan kedalaman muka air tanah hasil survey.

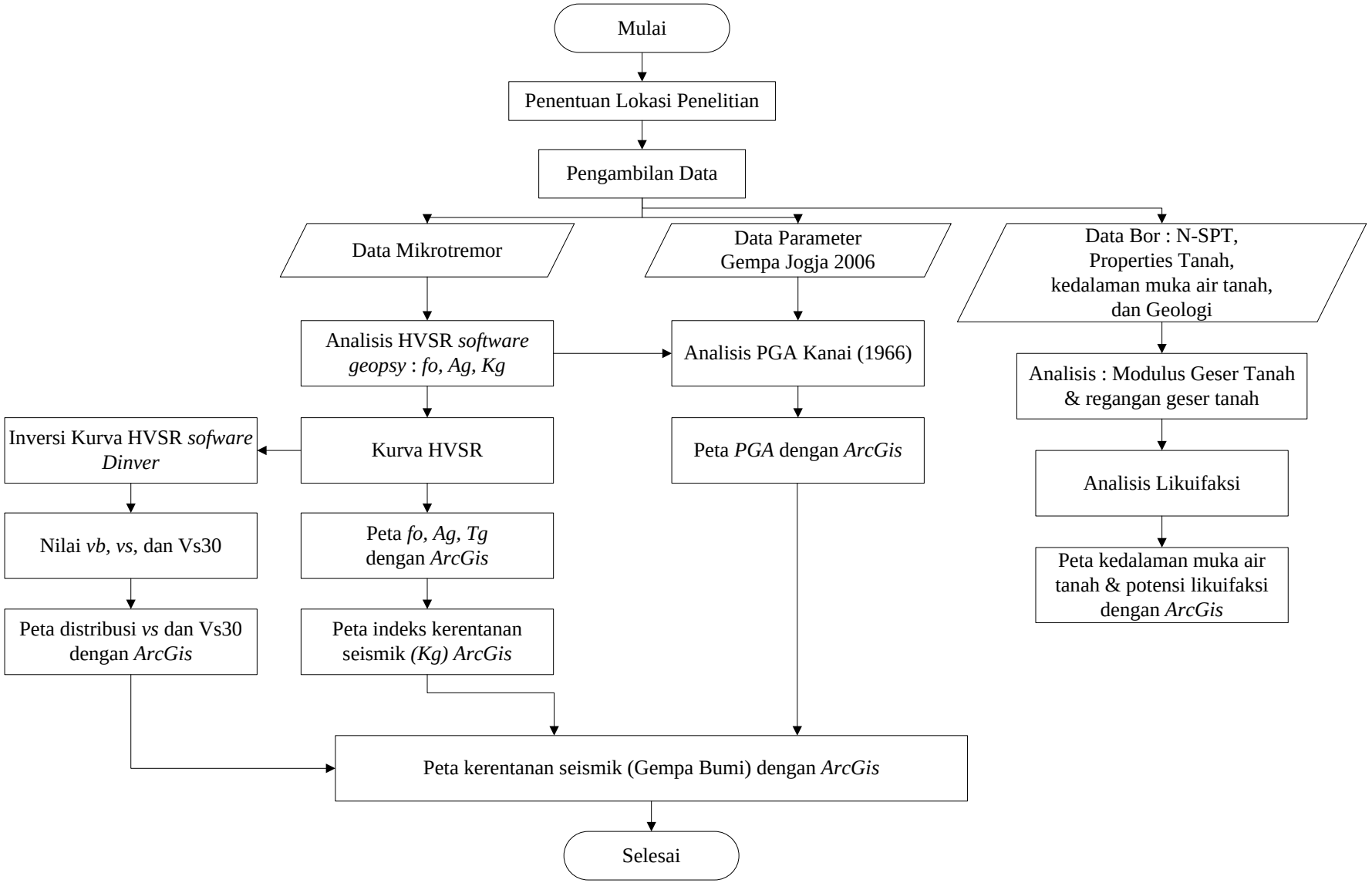
4.3.11 Peta Kerentanan Seismik

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 (*Kg*), percepatan puncak tanah (PGA), regangan geser tanah dan kecepatan gelombang geser tanah sampai kedalaman 30 meter (Vs30).

4.4 DIAGRAM ALUR PENELITIAN

Diagram alur penelitian ditunjukkan pada **Gambar 4.10**.

.



Gambar 4.10 Diagram Alur Penelitian

BAB V
ANALISIS DAN PEMBAHASAN

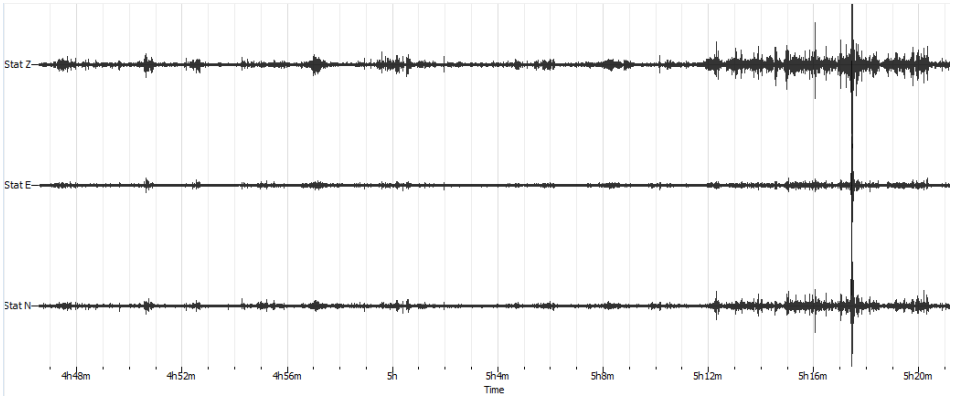
5.1 PENGOLAHAN DATA

5.1.1 Pengolahan Data Mikrotremor

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 (*fg*) dan faktor amplifikasi spektrum tanah (*Ag*) 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 (*fg*) dan faktor amplifikasi spektrum tanah (*Ag*). Pengambilan data mikrotremor ini meliputi 111 titik ukur yang berada di wilayah Kabupaten Klaten bagian selatan yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Gunungkidul.

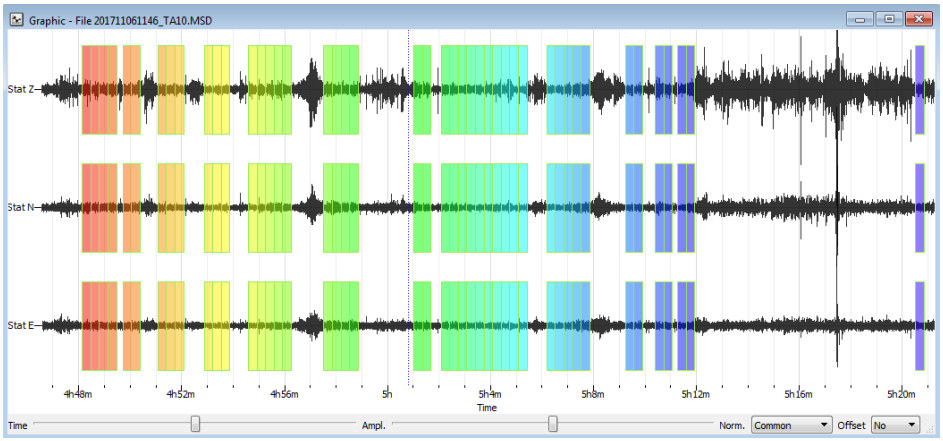
Hasil pengukuran di titik-titik ukur berupa data rekaman mikrotremor dalam interval waktu (durasi) tertentu, dalam pengukuran ini durasi perekaman antara 30 menit. Contoh seismogram mikrotremor hasil rekaman di Kabupaten Klaten seperti di perlihatkan pada **Gambar 5.1**. Komponen Vertikal (*Up-Down*), 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 Titik 10 (UD, EW dan NS)

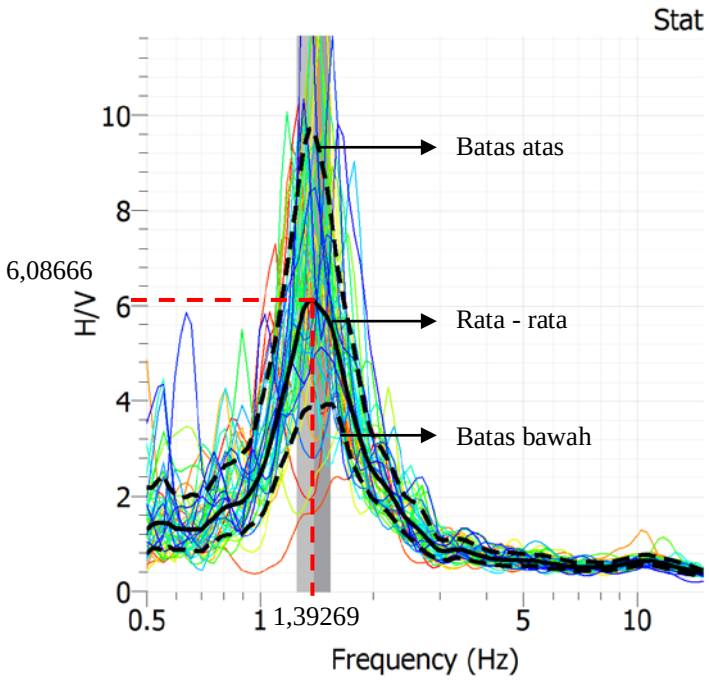
Tahapan selanjutnya adalah melakukan *windowing* pada rekaman mikrotremor, adalah terbaginya *seismogram* mikrotremor menjadi beberapa jendela (*window*) berupa kotak-kotak berwarna, untuk memilih sinyal-sinyal yang bebas dari *noise*. Satu warna mewakili satu *window* dengan lebar kotak dalam satuan detik. Pada penelitian ini digunakan lebar kotak 20 detik, dengan pemilihan *window* secara manual. Contoh *windowing* seperti ditunjukkan pada **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 Titik 10

Kurva HVSR yang terbentuk dari hasil dari *windowing* ditampilkan dari semua *window* sesuai dengan warna *window* (kotaknya). Kurva dengan warna hitam menunjukan kurva rata-rata HVSR, sedangkan garis hitam putus-putus menunjukan simpangan kurva HVSR. Contoh kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor di Kota Yogyakarta seperti ditunjukan pada **Gambar 5.3**. Kurva HVSR selengkapnya ada pada Lampiran 1.



Gambar 5.3 Kurva HVSR Titik 10

Pada kurva HVSR di atas nilai faktor amplifikasi tanah rata – rata (*Ag*) yakni 6,08666 dan nilai frekuensi dominannya (*fg*) yakni 1,39269. Perhitungan selanjutnya yaitu menghitung indeks kerentanan seismik dengan menggunakan Persamaan (3.14).

Nilai indeks kerentanan seismik (*Kg*) dipengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi tanah serta frekuensi dominan. Menurut Persamaan **(3.14)** untuk indeks kerentanan seismik Titik 10 dihitung sebagai berikut :

$$Kg = \frac{Ag^2}{fg}$$
$$= \frac{6{,}0866^2}{1{,}39268}$$
$$= 26{,}6013$$

Pengolahan selanjutnya yakni menghitung percepatan tanah di permukaan (α_g) dengan menggunakan rumus atenuasi Kanai 1966 pada Persamaan (3.15). Dalam penelitian ini resonansi ($T = T_0$) maka harga perbesaran percepatan tanah ke permukaan *G(T)* akan mencapai maksimum, sehingga percepatan di *base rock* (α_0) sama dengan percepatan di permukaan (α_g). Gelombang yang melalui lapisan sedimen akan menimbulkan resonansi yang disebabkan karena gelombang gempa mempunyai spektrum yang lebar sehingga hanya gelombang gempa yang sama dengan periode dominan tanah dari lapisan sedimen yang akan diperkuat. Perhitungan nilai PGA ditinjau dari Gempa Jogja Mei 2006 seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.1**.

Tabel 5.1 Data Gempa Jogja 26 Mei 2006 dari USGS

Referensi	Koordinat X	Koordinat Y	Skala (Ms)	Depth (m)	Vs (m/s)
Jogja 2006	440266	9119864	6,3	17100	340

Jarak episenter

$$Episenter = \sqrt{(Xdata - Xgempa)^2 + (Ydata - Ygempa)^2}$$
$$= \sqrt{(448380.36 - 440266)^2 + (9139858.277 - 9119864)^2}$$
$$= 21578{,}09\ m$$

Jarak hiposenter (R)

$$R = \sqrt{(Jarak\ episenter)^2 + (kedalaman\ gempa)^2}$$
$$= \sqrt{(21578{,}09)^2 + (17100)^2}$$
$$= 27532{,}235\ m = 25{,}532\ km$$

Periode dominan (Tg)

$$Tg = \frac{1}{fg}$$
$$= \frac{1}{1{,}39268}$$
$$= 0{,}71803\ dtk$$

PGA Kanai 1966

$$\alpha_g = \frac{\alpha_1}{\sqrt{T_g}}\ 10^{\alpha_2 M - P log_{10} R + Q}$$
$$= \frac{5}{\sqrt{0{,}71803}}\ 10^{\left\{0{,}61(6{,}3) - \left(1{,}66 + \frac{3{,}6}{27{,}532} log_{10} 27{,}532\right) + \left(0{,}167 - \frac{1{,}83}{27{,}532}\right)\right\}}$$
$$= 273{,}5616 \text{ gal}$$

Konversi ke satuan PGA (g)

$$\alpha_g = PGA\ (gal)\ x\ 0{,}0010197$$
$$= 273{,}5616 \text{ x } 0{,}0010197 = 0{,}28 \text{ g}$$

Konversi ke satuan MMI, menurut Wald (1999)

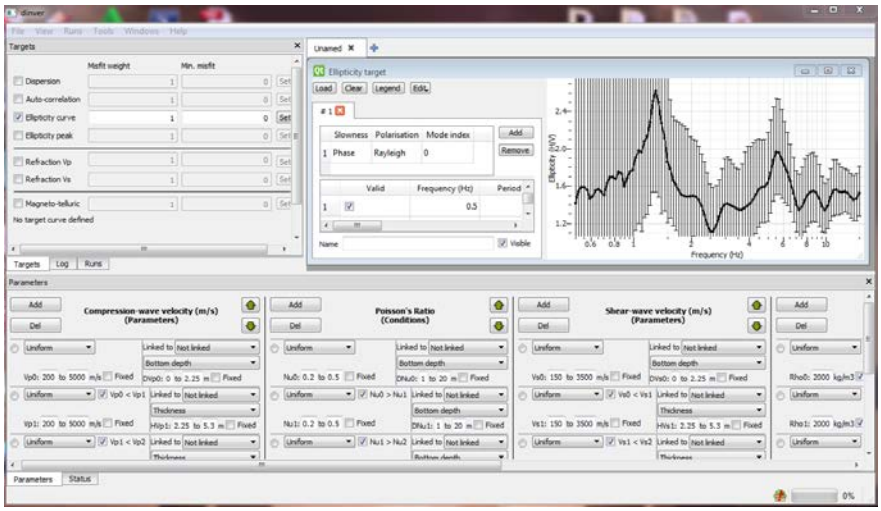
$$\alpha_g = 3{,}66\ x \log\left(PGA\ (gal)\right) - 1{,}66$$
$$= 3{,}66\ x \log(273{,}5616) - 1{,}66 = 7{,}3$$

Setelah mendapatkan PGA di permukaan selanjutnya menghitung *ground shear strain* (γ). Perhitungan ini menggunakan Persamaan (3.21).

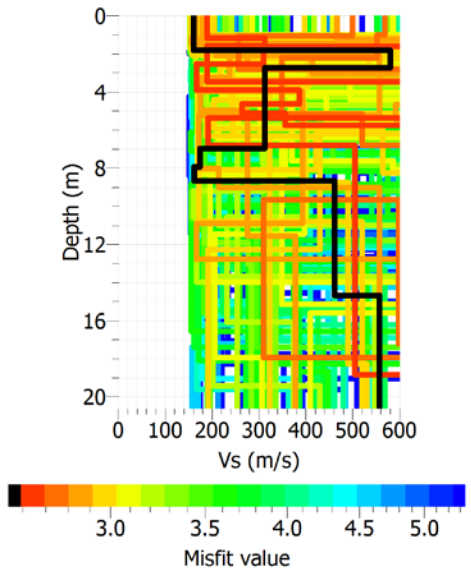
$$\gamma = \frac{{A_g}^2\ \alpha_g}{\pi^2\ f_g\ C_b}$$
$$= \frac{6{,}0866^2\ x\ 273{,}5616}{\pi^2\ x\ 1{,}39268\ x\ 10^5}$$
$$= 0{,}007373 = 7{,}3\ x\ 10^{-3}$$

Penentuan kecepatan gelombang geser (*vs*) dalam penelitian ini digunakan pendekatan metode *elipcity curve* inversi kurva HVSR, dengan

software Dinver pada *geopsy*. *S*oftware 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 ketidakcocokkannya (*misfit*) dengan kurva HVSR hasil pengukuran. Model awal metode dibuat dengan memasukkan parameter-parameter tanah yang akan ditinjau, yaitu v_p, $v_{s,}$ *poisson ratio*, v_s, dan *density*. Parameter tersebut diasumsikan sama untuk semua titik pengukuran, dikarenakan terbatasnya data tentang properties tanah di lokasi penelitain. Dalam pemodelan *ground profile* diambil acuan dari data sekunder *borlog* di Gereja Wedi, dengan kedalaman 20 m dan terdiri dari 6 lapisan tanah. Sebagai contoh tampilan software dinver dapat dilihat pada **Gambar 5.4**, sebagai hasil dari inversi kurva HVSR pada titik 10 dapat dilihat pada **Gambar 5.5**, dengan garis hitam merupakan model terbaik dengan *misfit* terkecil. Kecepatan gelombang sekunder perlapisan hasil pemodelan *ground profile* dari kurva HVSR selengkapnya di Lampiran 5.



Gambar 5.4 Tampilan Inversi kurva HVSR Dinver



Gambar 5.5 Hasil Akhir *ground profile* Titik 10

Pada **Gambar 5.5** di atas didapatkan nilai *vs* setiap lapisan, ketebalan setiap lapisan, dan nilai *vs* rata-rata, seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.2**.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Nilai vs Titik 10

Tebal Lapisan (m)	Vs (m/s)	Vs rata-rata (m/s)
1,8	160	290
1	540	
4,2	280	
0,6	160	
1,4	150	
6,6	450	

Dari hasil *vs* rata-rata di atas kemudian dapat digunakan untuk menghitung ketebalan sedimen (h) setiap titik ukur, menggunakan Persamaan (3.13) sebagai berikut,

$$fg = \frac{v_s}{4h}$$

$$h = \frac{v_s}{4\,fg}$$

$$= \frac{290}{4\,x\,1{,}39268}$$

$$= 52{,}06\,m$$

Kemudian dihitung nilai *vs* sampai kedalaman 30 m (Vs30), dengan Persamaan (3.20).

$$V_{s30} = \frac{h30}{\sum \frac{hi}{vsi}}$$

$$= \frac{30}{\frac{1{,}8}{160} + \frac{1}{540} + \frac{4{,}2}{280} + \frac{0{,}6}{160} + \frac{1{,}4}{150} + \frac{6{,}6}{450}}$$

$$= 537{,}135 \text{ m/s}$$

Untuk memvalidasi nilai Vs30 mikrotremor, maka akan dibandingkan dengan Vs30 dari situs USGS di lokasi penelitian yang sama. Selanjutnya akan diketahui rasio perbandingan Vs30 mikrotremor dengan Vs30 USGS, yang akan dibahas lebih lanjut pada subbab 5.3.2.

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 (Sungkowo, 2016).

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

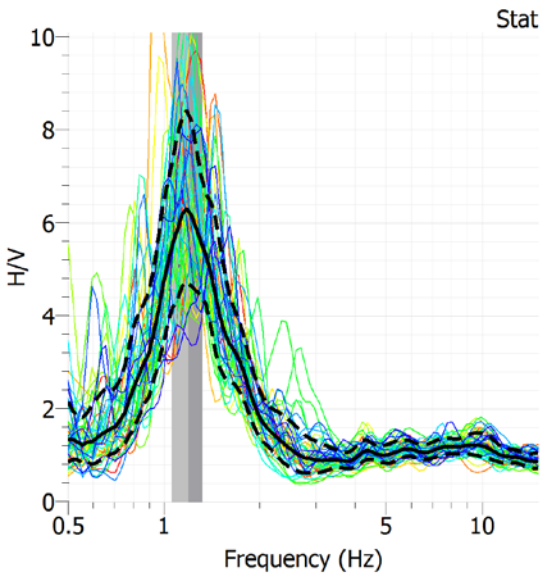
a. $A_0 > 2$ (nilai puncak kurva lebih dari dua)

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 Ao (*SESAME*, 2004).

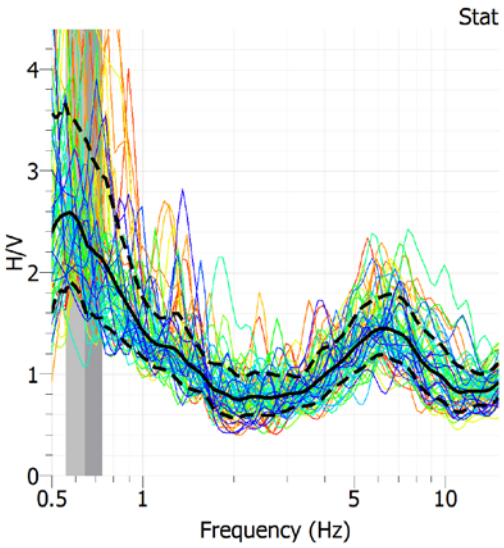
Kurva HVSR dengan satu puncak pada titik ukur mikrotremor dalam penelitian ini salah satunya ditunjukkan pada **Gambar 5.6**. Dari gambar kurva tersebut nilai amplifikasi kurva pada *fo* adalah 1,19266, dan kurva menurun dengan *slope* ke kanan dan kiri yang curam dan signifikan, sehingga didapatkan nilai amplifikasi pada *fo=3* jatuh pada nilai amplifikasi disekitar 1,5 yang nilainya kurang dari $A0/2 = 3{,}132$.



Gambar 5.6 Kurva HVSR dengan satu puncak jelas (Titik 22)

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

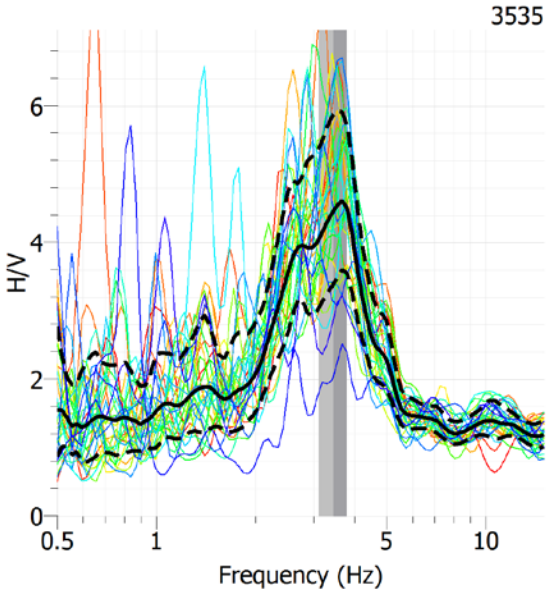
Kurva HVSR yang memiliki dua buah puncak menunjukan karaktristik tertentu, diasumsikan adanya kontras impedansi pada kedalaman yang berbeda, yaitu kedalaman dangkal dan kedalaman yang lebih dalam. Kurva seperti ini kemungkinan disebabkan oleh keadaan geologi di suatu daerah yang berupa sedimen tidak 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 pada **Gambar 5.7**.



Gambar 5.7 Kurva dengan dua puncak *(double peak)* Titik 25

3. Kurva HVSR dengan puncak lebar

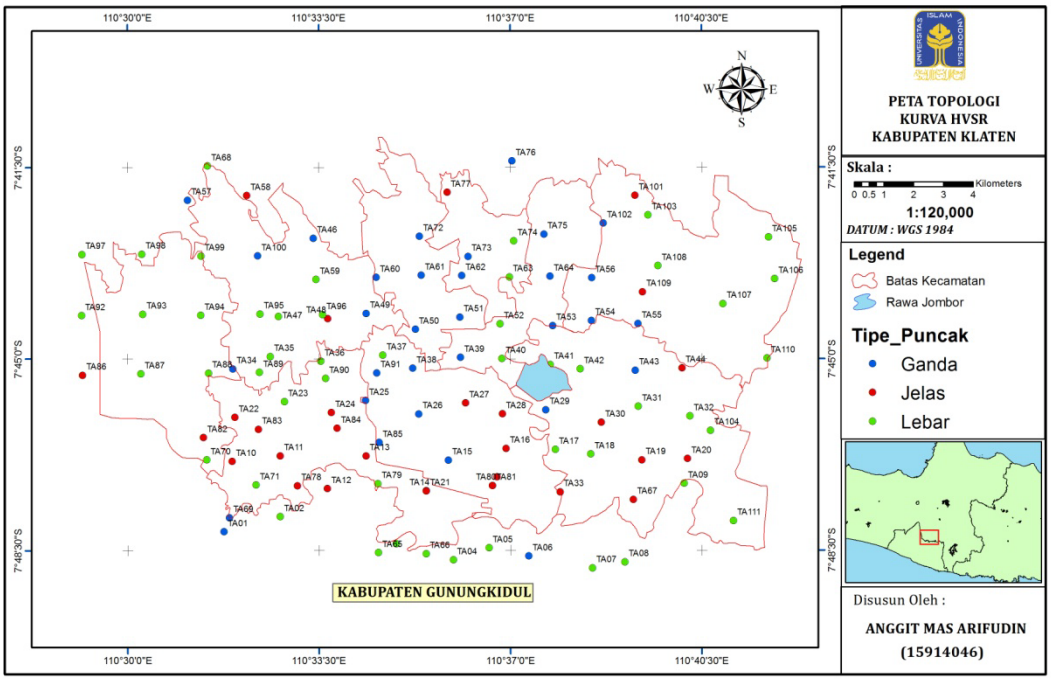
Kurva HVSR yang memiliki puncak yang lebar dimungkinkan berkaitan dengan keadaan geologi lokal atau geometri yang berhubungan dengan cekungan suatu lembah atau *bedrock* yang miring, kemungkinan juga karena adanya variasi struktur sedimen-*bedrock*. Kurva HVSR dengan puncak lebar seperti yang ditunjukan pada **Gambar 5.8.**



Gambar 5.8 Kurva dengan puncak lebar

Sebaran tipologi kurva HVSR di daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 5.9**. Titik merah untuk bentuk kurva dengan satu puncak jelas (*single peak*), titik hijau untuk kurva dengan puncak lebar (*broad peak*) dan titik biru untuk bentuk kurva puncak ganda (*double peak*). Peta topologi memperlihatkan kurva *single peak* dominan berada di daerah Selatan , kurva *double peak* dominan di wilayah Utara sedangkan kurva *broad peak* dominan berada di Barat dan Timur dari wilayah 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 (*vp*), kecepatan gelombang geser (*vs*), ketebalan lapisan (h), densitas lapisan (ρ), faktor kuasi gelombang (Qp dan Qs).



Gambar 5.9 Distribusi Tipe 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 sedimen (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

menunjukan bahwa, ketebalan lapisan berpengaruh pada frekuensi dominan dan nilai amplifikasi (Sungkowo, 2016).

Pengaruh densitas lapisan tanah (ρ) 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.

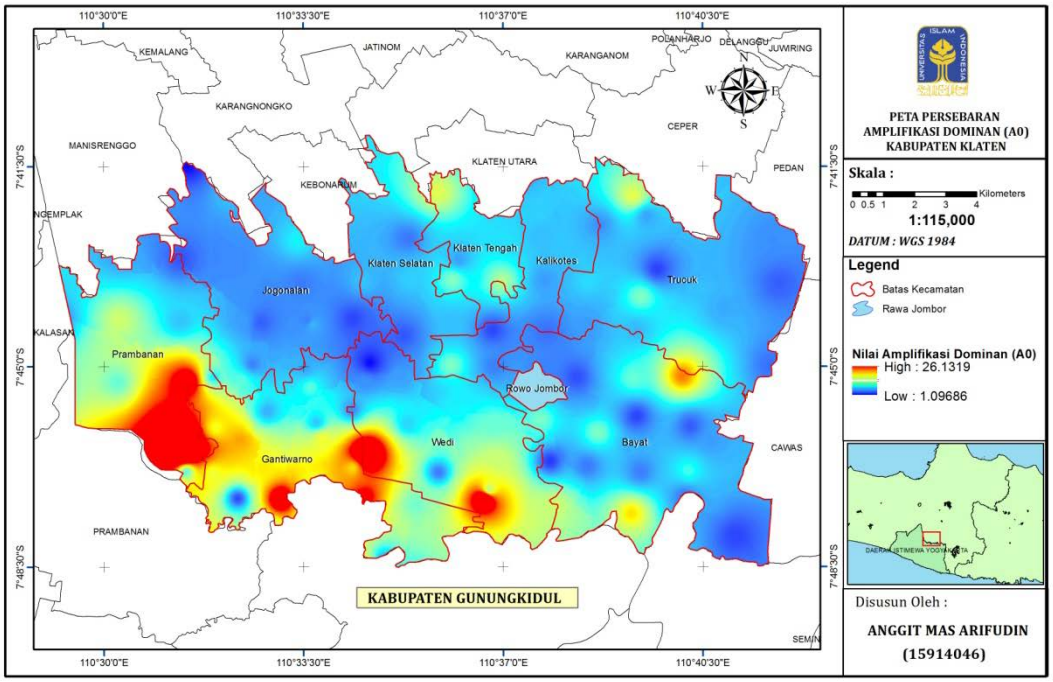
5.1.3 Mikrozonasi Nilai Faktor Amplifikasi Tanah (Ag)

Kerusakan bangunan akibat gempa selain dipengaruhi kekuatan gempa itu sendiri sangat dipengaruhi oleh amplifikasi dari *bedrock* sampai permukaan tanah. 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, perbedaan antara lapisan sedimen dan *bedrock* besar.

Sebaran nilai faktor amplifikasi tanah di Kabupaten Klaten ditunjukkan pada **Gambar 5.10**. Nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 1,0968 sampai dengan 26,1338. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan pada Lampiran 2. Menurut Seiawan (2008) nilai faktor amplikasi tanah yang dihasilkan dari pengukuran mikrotremor terbagi menjadi 4 zona yaitu :

1. Zona amplikasi rendah : $A_g < 3$
2. Zona amplikasi sedang : $3 \leq A_g < 6$
3. Zona amplifikasi tinggi : $6 \leq A_g < 9$
4. Zona amplifikasi sangat tinggi : $A_g \geq 9$



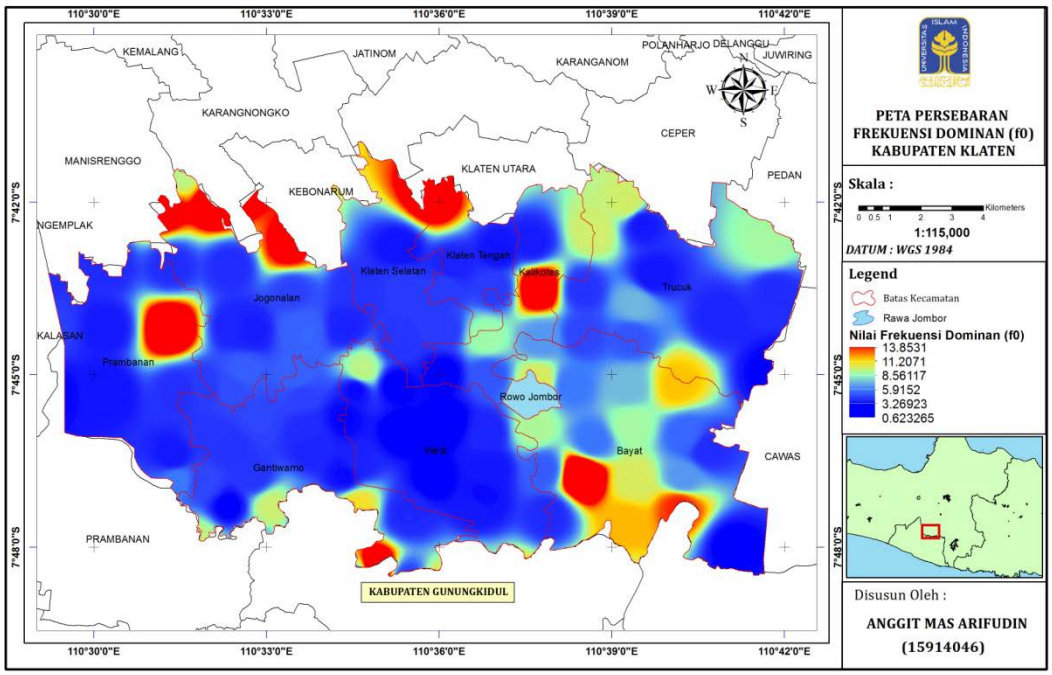
Gambar 5.10 Peta faktor amplifikasi tanah (A_g)

Berdasar klasifikasi tersebut nilai amplifikasi tanah di wilayah penelitian berkisar dari zona dengan nilai relatif rendah sampai sangat tinggi. Daerah dengan nilai amplifikasi spektrum tanah (*Ag*) rendah meliputi Kecamatan Jogonalan, Kecamatan Klaten Selatan, Kecamatan Klaten Tengah, Kecamatan Kalikotes, Kecamatan Trucuk (kecuali Kelurahan Kalikebo dan Gaden yang masuk sedang), dan Kecamatan Bayat (kecuali Kelurahan Wiro dan Jarum yang masuk sedang) dengan nilai A_g kurang dari 3. Zona wilayah yang mempunyai nilai faktor amplifikasi spektrum tanah relatif sedang meliputi Kecamatan Wedi bagian utara (Kelurahan Kadibolo, Sukorejo, Sembung, Jiwo Wetan), Kecamatan Prambanan bagian Tengah dan Barat (Kelurahan Bugisan, Taji, Tlogo) dengan nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 3 sampai dengan 6. Zona wilayah yang mempunyai nilai amplifikasi spektrum tanah relatif tinggi meliputi Kecamatan Wedi bagian Tenggara (Kelurahan Kaligayam, Karangturi), Kecamatan Gantiwarno bagian Tengah (Kelurahan Mlese, Mutihan) dengan nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya berkisar antara 6 sampai dengan 9. Sedangkan wilayah yang mempunyai nilai amplifikasi spektrum tanah relatif sangat tinggi, meliputi wilayah Kecamatan Gantiwarno bagian selatan (Kelurahan

Kragilan, Jogoprayan, Ngerut), Kecamatan Wedi bagian selatan (Kelurahan Gesikan, Pesu, Gentan), Kecamatan Prambanan bagian selatan (Kelurahan Sengon, Cucukan, Kotesan) dengan nilai faktor amplifikasi spektrum tanahnya lebih besar dari 9. Nilai - nilai puncak kurva HVSR yang juga merupakan nilai faktor amplifikasi tanah A_g menunjukkan adanya perubahan impedansi dari perlapisan, 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 goncangan gempa bumi.

5.1.4 Mikrozonasi Nilai Frekuensi Dominan Tanah (fg)

Frekuensi menunjukkan banyaknya gelombang yang terjadi dalam satuan waktu. Frekuensi dominan adalah frekuensi saat dimana nilai puncak kurva HVSR terjadi. Peta sebaran frekuensi dominan tanah di Kabupaten Klaten, ditunjukan pada **Gambar 5.11**. Nilai frekuensi dominan di wilayah penelitian berkisar antara 0.6232 Hz sampai dengan 13,853 Hz. Dari peta frekuensi dominan dapat dilihat daerah yang mempunyai nilai frekuensi tanah tinggi berada di daerah Kecamatan Jogonalan bagian utara (Kelurahan Tambakan, Gumul, Joton), Kecamatan Klaten Tengah bagian utara (Kelurahan Sekarsuli, Semangkak, Bareng, Gayamprit), Kecamatan Prambanan bagian timur (Kelurahan Brajan, Kemudo), dan Kecamatan Bayat bagian barat (Kelurahan Paseban, Krikilan). Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 2.



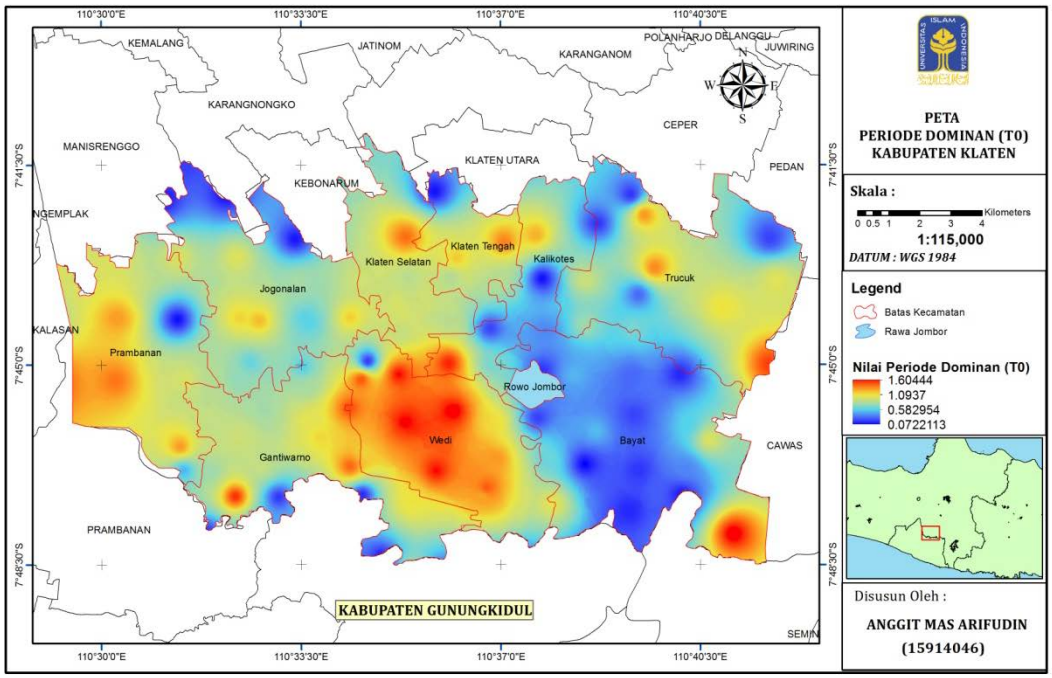
Gambar 5.11 Peta frekuensi dominan tanah (*fg*)

Daerah yang mempunyai frekuensi rendah berada di hampir semua wilayah Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, dan Kecamatan Prambanan bagian selatan. 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. Dengan demikian 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 Mikrozonasi Nilai Periode Dominan Tanah (Tg)

Periode gelombang adalah waktu yang dibutuhkan untuk menempuh satu gelombang dalam satuan detik. Periode dominan (Tg) berbanding terbalik dengan frekuensi dominan dan periode dominan memiliki keterkaitan yang sangat dekat dengan kedalaman lapisan sedimen (h). Peta sebaran periode dominan tanah di

Kabupaten Klaten, ditunjukan pada **Gambar 5.12.** Nilai periode dominan di wilayah penelitian berkisar antara 0,072 Hz sampai dengan 1,604 Hz. Dari peta periode dominan dapat dilihat daerah yang mempunyai nilai periode tanah tinggi berada di daerah Kecamatan Wedi, Kecmatan Gantiwarno, dan Kecamatan Prambanan. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 2.



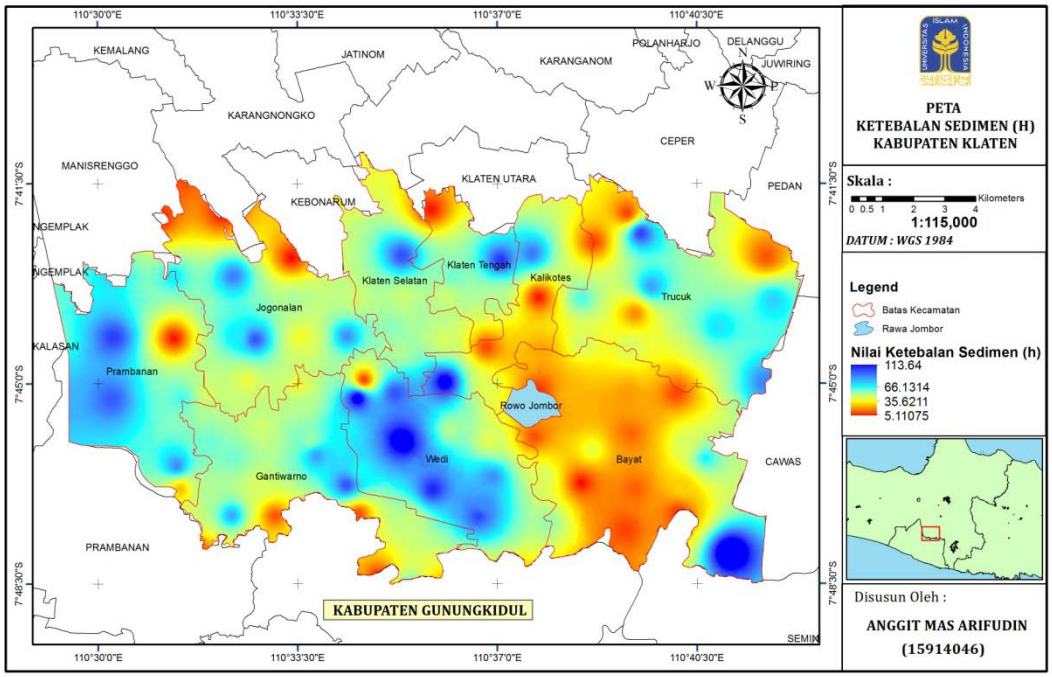
Gambar 5.12 Peta periode dominan tanah (T*g*)

Daerah yang mempunyai periode rendah berada di wilayah Kecamatan Bayat, Kecamatan Jogonalan bagian utara, dan Kecamatan Kalikotes bagian utara. Periode dominan yang tinggi menunjukan jenis lapisan sedimen dengan struktur yang lunak dan tebal. Sebaliknya periode dominan yang rendah menunjukan jenis lapisan sedimen yang lunak dan tipis. Daerah yang memiliki periode dominan tinggi umumnya memiliki kerentanan untuk mengalami kerusakan. Hal ini dikarenakan periode dominan berbanding lurus dengan nilai amplifikasi. Menurut Kanai dari nilai periode dominan dapat diklasifikasikan susunan jenis tanah wilayah tersebut. Wilayah kecamatan Wedi dan sebagian Gantiwarno memiliki nilai periode >0,4 yang menunjukkan wilayah tersebut tersusun oleh batuan alluvial dan tanah lunak. Sedangkan nilai periode 0,072 – 0,15 terletak di wilayah

kecamatan Bayat yang menunjukkan bahwa wilayah tersebut tersusun oleh jenis batuan tersier yang lebih tua atau terdiri dari batuan pasir berkerikil keras.

5.1.6 Mikrozonasi Ketebalan Sedimen (h)

Ketebalan sedimen dihitung dengan menggunakan rumusan seperti dalam persamaan (3.13). Selain frekuensi dominan, kecepatan gelombang sekunder juga menentukan hasil perhitungan ketebalan sedimen. Ketebalan sedimen dalam penelitian ini dihitung dengan menggunakan kecepatan gelombang sekunder dari hasil inversi kurva HVSR, yang dimodelkan berdasarkan data *borlog* di Gereja Wedi, disamakan untuk semua titik pengukuran. Secara umum daerah penelitian mempunyai ketebalan berkisar antara 5,105 m sampai dengan 113,648 m, ditunjukkan pada **Gambar 5.13**. Daerah dengan ketebalan relatif tinggi berada di sebagian wilayah Kecamatan Wedi dengan ketebalan mencapai 110 m. Daerah dengan ketebalan sedang (sekitar 60 sampai dengan 90 m) berada di wilayah Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Prambanan, dan bagian selatan Kecamatan Jogonalan. Di wilayah Kecamatan Bayat memiliki ketebalan rendah (sekitar 5 sampai dengan 30 m) terletak di perbuktian dan pegunungan daerah Paseban dan makam Sunan Pandanaran. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 3.

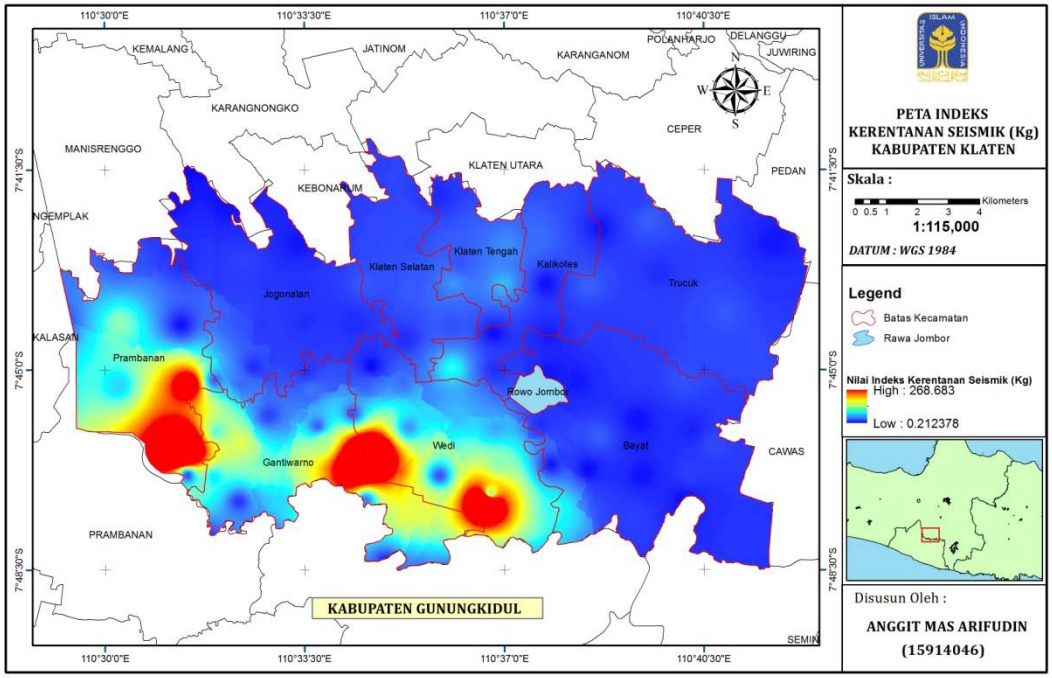


Gambar 5.13 Peta ketebalan sedimen (H)

5.1.7 Mikrozonasi Nilai Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Nilai indek kerentanan seismik diperoleh dari perhitungan dengan persamaan (3.14). Besarnya nilai indek kerentanan seismik dipengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi tanah dan periode dominan tanah. Nilai indeks kerentanan sesimik yang tinggi diperoleh pada daerah dengan nilai amplifikasi tinggi dan nilai f_g rendah. Nilai amplifikasi tinggi berkait dengan daerah dengan nilai f_g kecil berkait dengan daerah dengan ketebalan besar dengan kekompakan tinggi. Nilai indek 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 Kabupaten Klaten terdapat perbuktian yaitu di Kecamatan Bayat, Kelurahan Paseban daerah bukit barisan Makam Sunan Pandanaran, dan perbatasan Klaten dengan Gunung Kidul bagian Selatan. Kontras impedansi mempunyai pengaruh yang lebih besar terhadap nilai faktor amplifikasi tanah (A_g), sehingga memberikan nilai indeks kerentanan yang tinggi.

Hasil penelitian indeks kerentanan seismik dalam penelitian ini, ditunjukan pada **Gambar 5.14**. Nilai indeks kerentanan seismik tanah berkisar antara 0,212 sampai dengan 270,184. Nilai indeks kerentanan seismik relatif tinggi berada di daerah bagian selatan dari Kabupaten Klaten, yaitu Kecamatan Gantiwarno bagian selatan, Kecamatan Wedi bagian selatan, dan Kecamatan Prambanan bagian selatan. Nilai indeks kerentanan seismik relatif rendah meliputi wilayah Kecamatan Jogonalan, Kecamatan Klaten Selatan, Kecamatan Klaten Tengah, Kecamatan Kalikotes, Kecamatan Trucuk, dan Kecamatan Bayat. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 2.



Gambar 5.14 Peta Indeks Kerentanan Sesimik (Kg)

5.2 PGA BERDASARKAN SURVEI MIKROTREMOR (PGA KANAI)

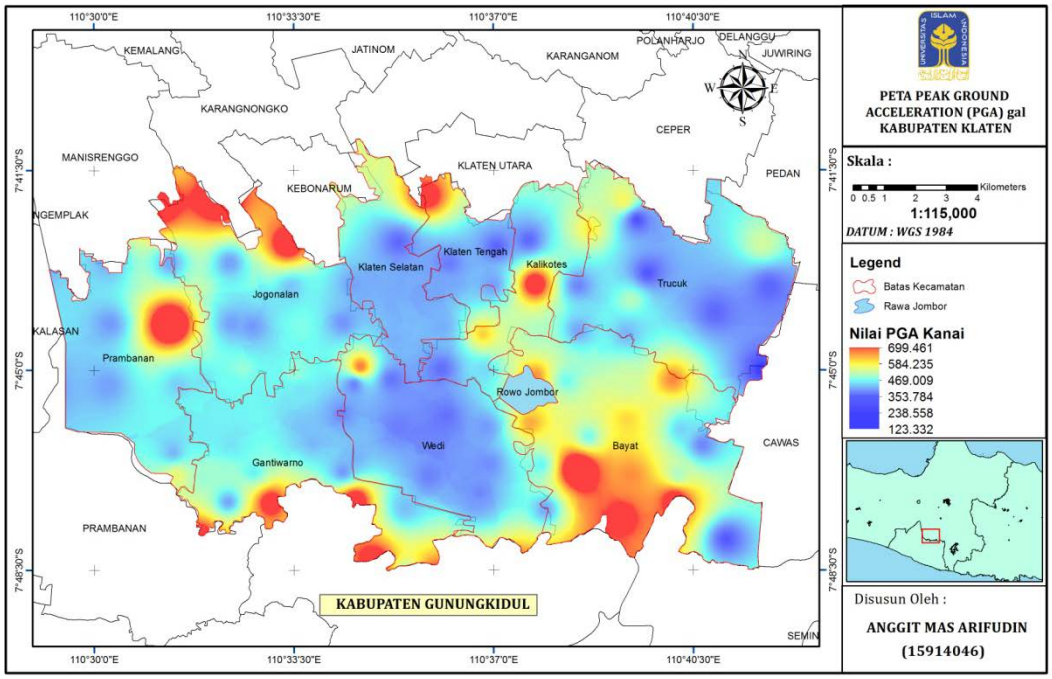
Persamaan atenuasi Kanai (1966) seperti tersebut dalam persamaan (3.15), atenuasi ini menunjukan nilai percepatan puncak tanah (PGA) berkaitan dengan kondisi tanah setempat, dalam hal ini periode dominan tanah disamping besar magnitudo dan jarak sumber gempa.

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 selengkapnya bisa dilihat pada Lampiran 4.

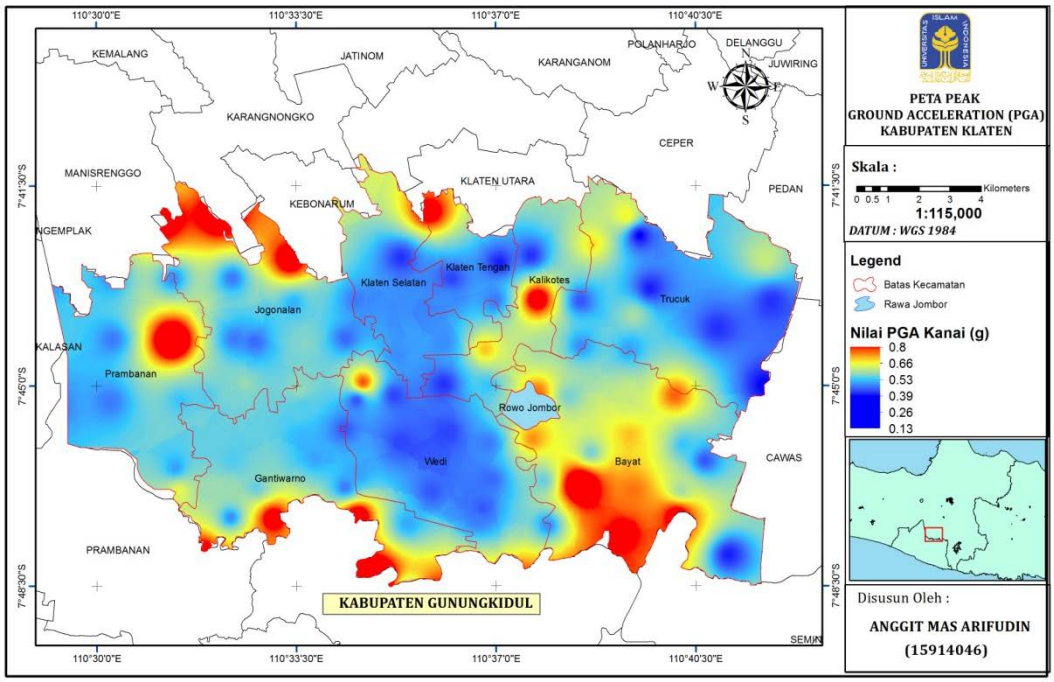
Hasil perhitungan PGA *(peak ground acceleration)* dengan rumusan atenuasi Kanai dengan parameter gempa bumi Bantul 27 Mei 2006 (Mw 6,3), di wilayah Kota Yogyakarta mengalami PGA dipermukaan berkisar antara 123,324 gal sampai dengan 819,353 gal. Nilai PGA terbesar selain ditentukan oleh jarak dan magnitudo gempanya, terkait pula dengan kondisi tanah setempat. Nilai rata-rata PGA Kanai di Kabupaten Klaten 293,872 gal. Daerah dengan nilai PGA

relatif tinggi berada di daerah Kecamatan Jogonalan bagian utara (Kelurahan Tambakan, Gumul, Joton), Kecamatan Klaten Tengah bagian utara (Kelurahan Sekarsuli, Semangkak, Bareng, Gayamprit), Kecamatan Prambanan bagian timur (Kelurahan Brajan, Kemudo), dan Kecamatan Bayat bagian barat (Kelurahan Paseban, Krikilan). Nilai PGA relatif rendah berada di Kecamatan Wedi, Kecamatan Gantiwarno, dan Kecmatan Prambanan bagian selatan. Peta persebaran PGA Kanai di tunjukkan pada **Gambar 5.15** dan **Gambar 5.16.**

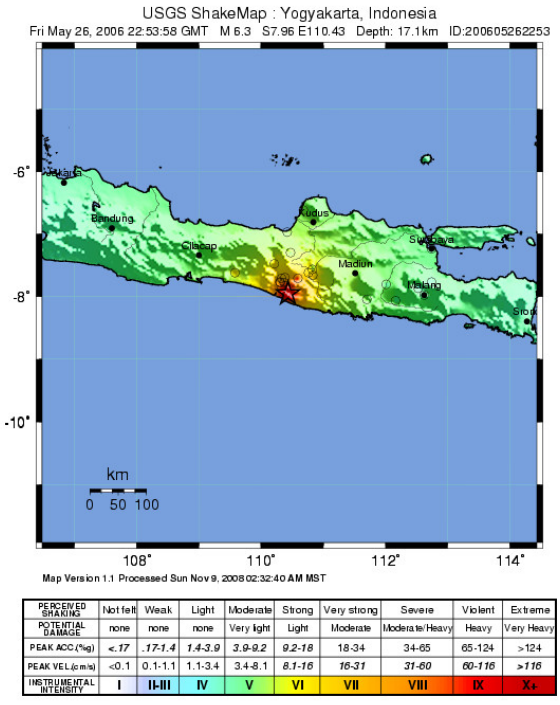
Jika dibandingkan dengan sebaran peta *shakemap* yang dihasilkan USGS terdapat perbedaan nilai dari keduanya. PGA Kanai memperhitungkan pengaruh dari kondisi site yang di cerminkan dari nilai periode dominan tanah setempat. Peta *shakemap* USGS pada saat gempa 26 mei 2006, pada **Gambar 5.17**. Estimasi besarnya intensitas gempa wilayah Kabupaten Klaten sekitar VII MMI dengan rentang besarnya PGA adalah 18-34% g atau sekitar 176,52 sampai 333,43 gal, menunjukkan hasil perhitungan PGA Kanai mendekati, perbedaan hasil dikarenakan rumus yang digunakan dalam perhitungan PGA.



Gambar 5.15 Peta nilai PGA Kanai (gal)



Gambar 5.16 Peta nilai PGA Kanai (g)



Gambar 5.17 Peta distribusi getaran (*shakemap*) USGS gempa Jogja 27 Mei 2006

5.3 PARAMETER DINAMIK TANAH

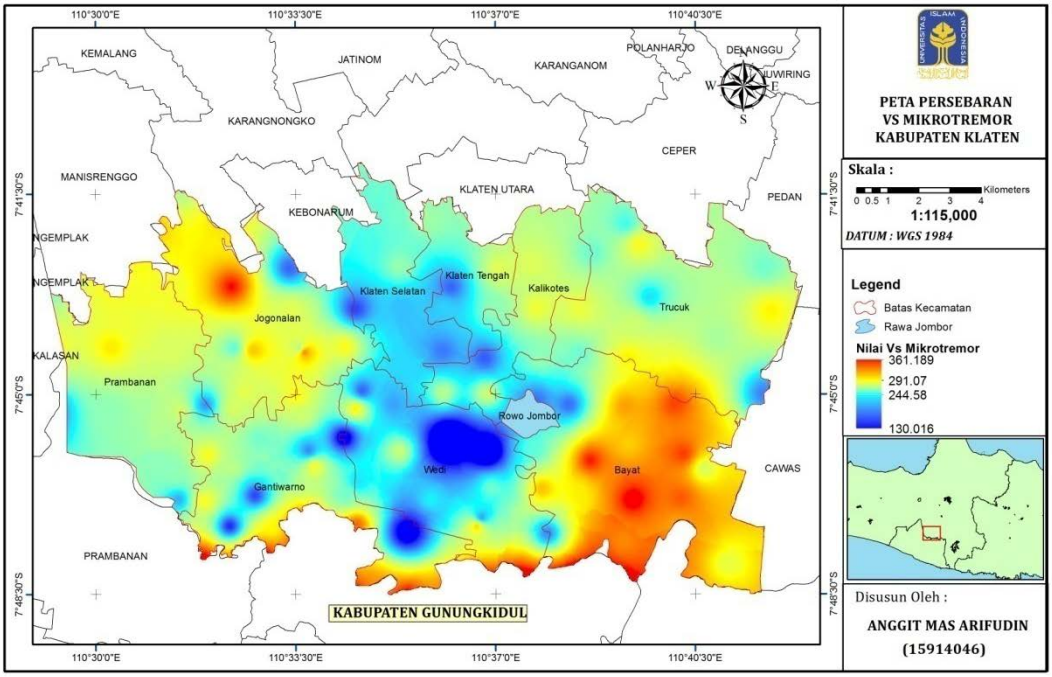
Selain parameter dinamik tanah tersebut di atas beberapa parameter dinamik tanah lainnya yang dilakukan penelitian di daerah Kabupaten Klaten. Parameter dinamik tanah yang dianalisis meliputi kecepatan gelombang geser (v_s), dan regangan geser tanah (γ).

5.3.1 Kecepatan Gelombang Sekunder (vs) Inversi Kurva HVSR Mikrotremor

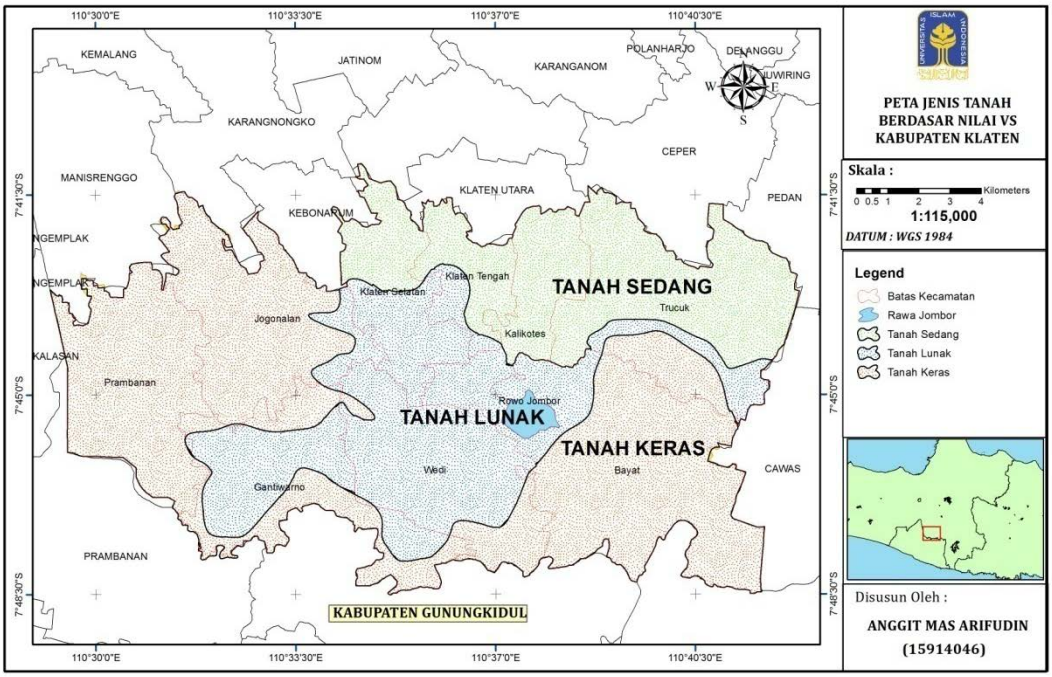
Kecepatan gelombang geser pada umumnya ditentukan dengan melakukan survei lapangan. Beberapa teknik yang digunakan antara lain dengan teknik *borehole*, semisal *crosshole*, *downhole*, dan *suspension logger survey*. Metode-metode tersebut bersifat aktif *invasif* dan biaya mahal. Kemudian berkembang metode estimasi v_s menggunakan mikrotremor. Metode ini relatif murah dan bersifat pasif dan *uninfasif.* Pada penelitian ini metode estimasi Kecepatan gelombang geser (v_s) menggunakan mikrotremor diperoleh dari analisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve* dengan s*oftware Dinver,* dengan parameter *vp, vs, poisson ratio, density* diasumsikan sama setiap titik ukur. Pemodelan ditentukan 6 lapisan dengan kedalaman yang ditinjau 20 m, sama semua untuk semua titik, berdasarkan data sekunder *borlog* Gereja Wedi. Hasil dari model tersebut berupa *ground profiles* dari *vs.* Model dengan *misfit* terendah akan digunakan sebagai model terbaik. Hasil selengkapnya bisa dilihat pada Lampiran 5.

Variasi kecepatan gelombang geser utamanya tergantung dari keras lunaknya lapisan tanah. Sebaran nilai kecepatan gelombang sampai pada kedalaman 30 meter (Vs30) rata-rata hasil inversi kurva HVSR ditunjukan pada **Gambar 5.20** . Nilai *vs* di daerah penelitian dari hasil inversi kurva HVSR berkisar antara 130 m/s sampai dengan 570,83 m/s, *vs* rata-rata 275,68 m/s. Dapat dilihat pada **Gambar 5.18**. Dari nilai Vs berdasarkan SNI 1726-2012 tentang Perencanaan Bangunan Tahan Gempa dapat diklasifikasikan jenis tanah pada daerah penelitian. Peta Persebaran Jenis Tanah Kabupaten Klaten dapat dilihat pada **Gambar 5.19**. Nilai Vs30 berkisar antara 199,256 m/s sampai dengan 997,693 m/s. Daerah dengan Vs30 relatif tinggi berada di bagian selatan

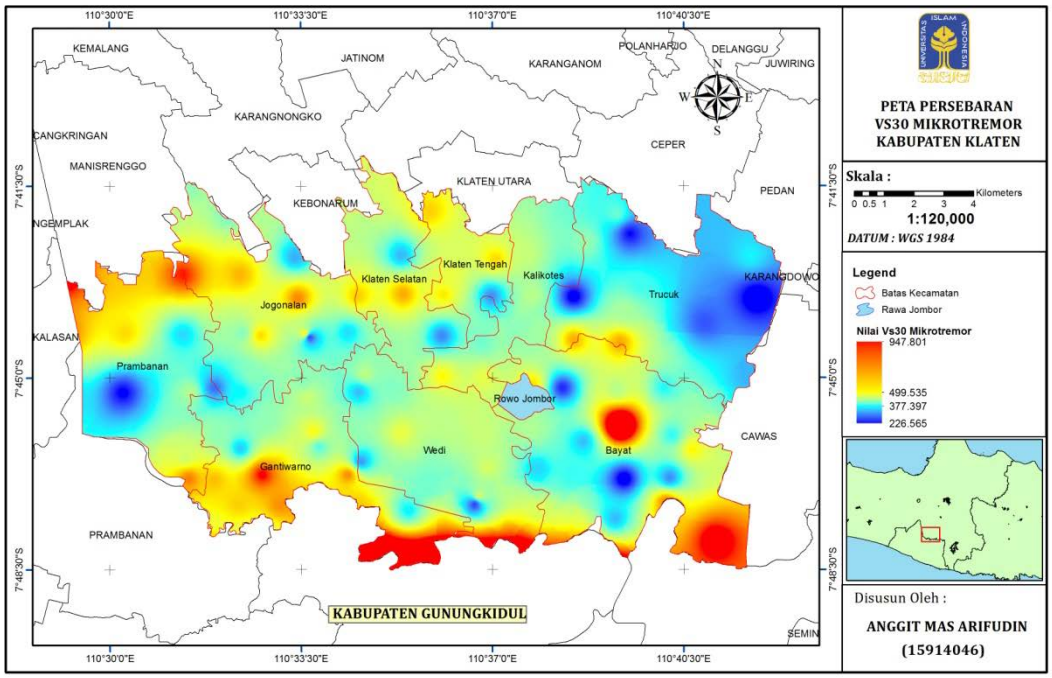
Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, dan Kecamatan Bayat yang berbatasan langsung dengan perbukitan Gunung Kidul. Wilayah dengan Vs30 bernilai relatif rendah berada di wilayah Kecamatan Prambanan, Kecamatan Wedi bagian utara, Kecamatan Trucuk, Kecamatan Jogonalan, Kecamatan Klaten Selatan, Kecamatan Klaten Tengah, dan Kecamatan Kalikotes.



Gambar 5.18 Peta distribusi Nilai Vs Mikrotremor



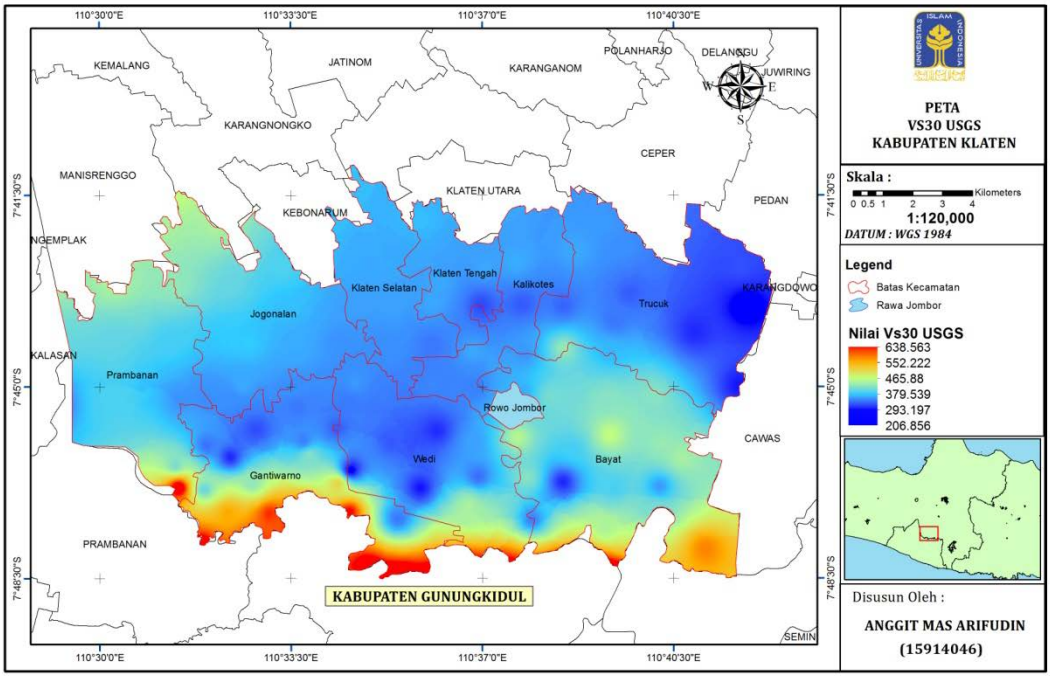
Gambar 5.19 Peta Jenis Tanah berdasarkan Nilai Vs



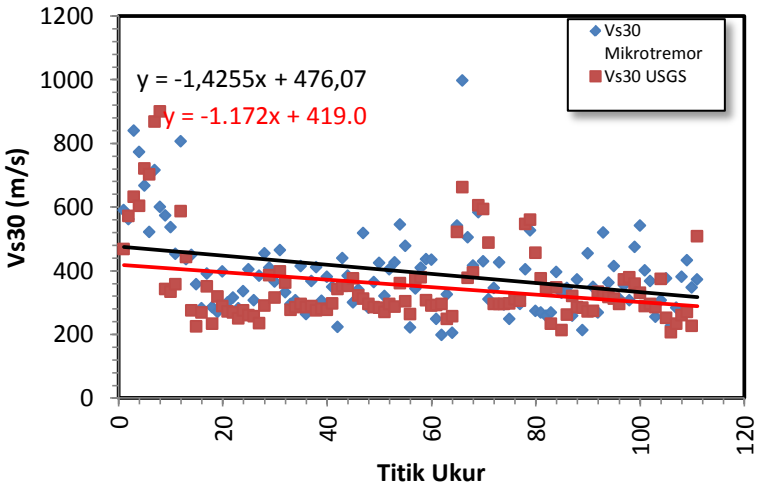
Gambar 5.20 Peta distribusi Nilai Vs30 Mikrotremor

5.3.2 Perbandingan Vs30 Mikrotremor dan Vs30 USGS

Untuk memvalidasi reliabilitas hasil inversi dibuat rasio antara Vs30 hasil inversi kurva HVSR dengan Vs30 USGS. Data Vs30 UGS diperoleh dengan mendownload data di alamat https://earthquake.usgs.gov/data/vs30/ sesuai dengan daerah penelitian. Data yang diperoleh berupa peta raster Vs30. Untuk mengetahui nilai Vs30 setiap titik ukur maka diekstrak dengan software *ArcGis* sesuai dengan titik ukur pada penelitian ini. Nilai Vs30 USGS hasil ekstraksi daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 5.21**. Pola distribusi Vs30 USGS memiliki pola yang sama dengan Vs30 mikrotremor. Rasio Vs30 dihitung dengan membangi nilai Vs30 mikrotremor dengan Vs30 USGS. Rasio Vs30 rata-rata yaitu 1,371, hal ini menunjukkan bahwa berdasarkan nilai rasionya perbedaan antara hasil pengukuran mikrotremor dan model topografi tidak berbeda signifikan. Nilai rasio tertinggi terdapat pada titik 31 yaitu 1,765 dan rasio terendah terdapat pada titik 80 yaitu 0,601. Rasio Vs30 Mikrotremor dengan USGS dapat dilihat pada **Gambar 5.22**. Dari *trendline* kedua nilai Vs30 menunjukkan bahwa nilai Vs30 mendekati dan tidak berbeda jauh. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 6.



Gambar 5.21 Peta distribusi Nilai Vs30 USGS

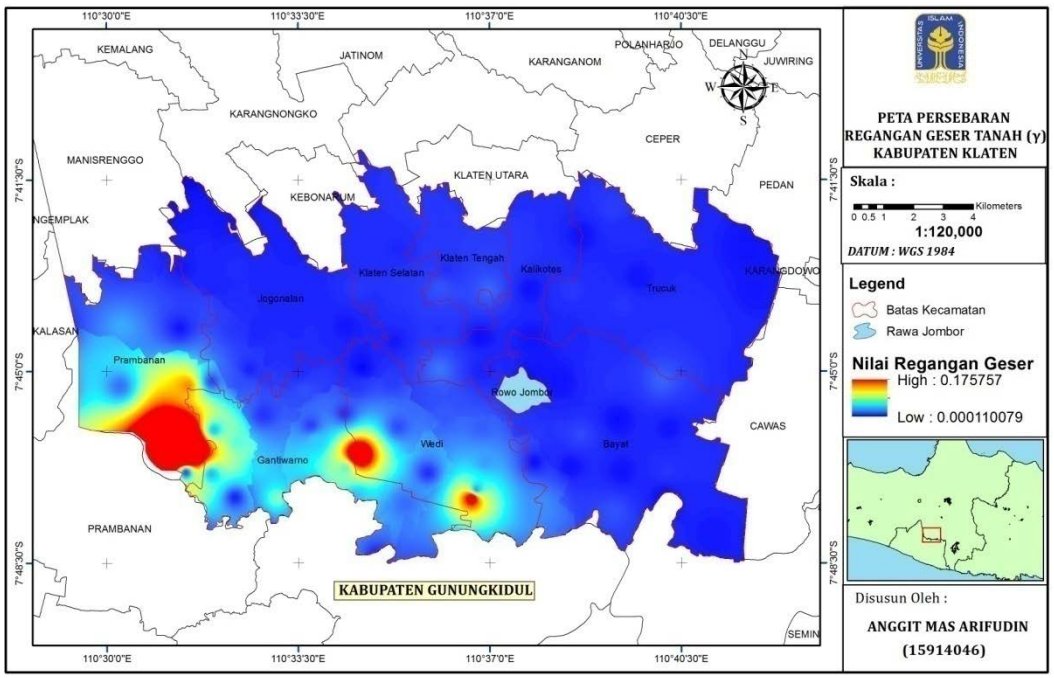


Gambar 5.22 Perbandingan Secara Visual Hasil Vs30 Mikrotremor dengan Vs30 USGS

5.3.3 Regangan Geser Tanah (γ)

Nilai regangan geser yang terukur di wilayah penelitian menunjukan 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 (*Kg*) 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. Nilai indeks kerentanan seismk (K_g) dan nilai PGA memberikan sumbangan terbesar terhadap nilai regangan tanah di suatu tempat.

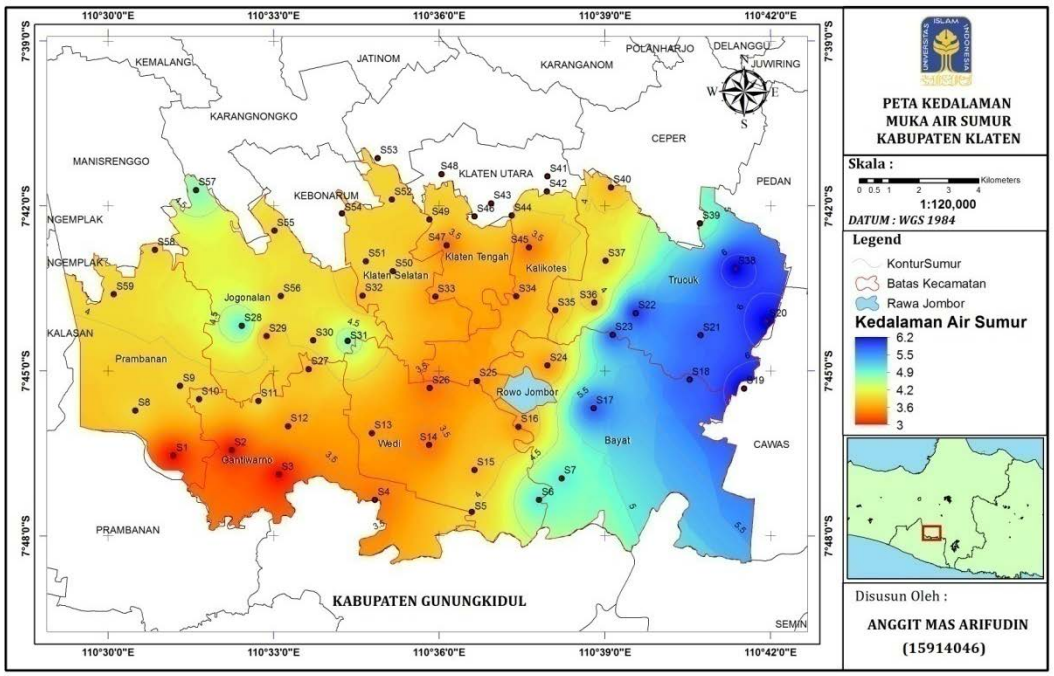
Pada penelitian ini menggunakan atenuasi Kanai 1966 untuk menentukan nilai PGA. Nilai regangan geser yang diperoleh dalam penelitian ini di sajikan peta distribusi regangan geser tanah **Gambar 5.23**. Nilai regangan geser tanah permukaan akibat gempa 27 Mei 2006 di wilayah Kabupaten Klaten bernilai sekitar 0,00011 sampai dengan 0,1758. Wilayah bernilai tinggi berada di wilayah selatan meliputi Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, dan bagian selatan Kecamatan Prambanan.



Gambar 5.23 Peta distribusi regangan geser tanah (γ)

5.4 HUBUNGAN REGANGAN GESER TANAH (γ), KEDALAMAN MUKA AIR TANAH, DAN POTENSI LIKUIFAKSI

Likuifaksi dapat diprediksi dari hubungan antara regangan geser dengan fenomena akibat yang terjadi akibat gempa bumi, salah satunya ditunjukkan tabel yang dibuat Nakamura, 1997 pada **Tabel 3.4**, semakin besar regangan geser menyebabkan lapisan tanah mengalami longsoran, rekahan dan likuifaksi. Pada *strain* 10^{-6} kondisi tanah hanya mengalami getaran, tetapi pada *strain* 10^{-2} lapisan tanah mengalami longsoran dan likuifaksi. Likuifaksi diakibatkan juga ketinggian muka air tanah, daerah dengan muka air tanah dangkal akan memiliki resiko likuifaksi lebih tinggi bila terjadi guncangan gempa. Dalam penelitian ini untuk mengetahui potensi likuifaksi selain berdasarkan fenomena tabel Nakamura tersebut juga dihubungkan dengan kedalaman air sumur wilayah penelitian dan jenis tanah yang berpasir lembut. Kedalaman air sumur dapat dilihat pada **Gambar 5.24**. Hubungan antara regangan geser tanah, fenomena, dan kedalaman air sumur ditunjukkan pada **Tabel 5.3**.



Gambar 5.24 Peta distribusi kedalaman air sumur

Kedalaman air sumur diukur langsung di lapangan pada saat wilayah penelitian musim penghujan, yaitu bulan Maret 2018, dengan anggapan bahwa pada saat pengukuran adalah muka air sumur tertinggi. Kedalaman air sumur di Kabupaten Klaten berkisar antara 3 m – 6,2 m. Muka air dangkal (3 – 4 m) tersebar di bagian selatan daerah penelitian yaitu Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, Kecamatan Prambanan. Muka air relatif sedang tersebar di bagian timur dan tenggara daerah penelitian yaitu Kecamatan Bayat dan Kecamatan Trucuk.

Tabel 5.3 Hubungan regangan geser, fenomena, dan kedalaman air sumur

Titik	Regangan geser	Fenomena	Kedalaman air sumur (m)
78	$1{,}3 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,18
80	$5{,}3 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,21
81	$3{,}8 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,1
82	$1{,}7 \times 10^{-1}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,15
83	$1{,}1 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,15
85	$5{,}4 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,12
88	$2{,}6 \times 10^{-2}$	Penurunan Tanah, Likuifaksi	3,12

Dari 111 titik pengukuran, ada 7 titik yang mempunyai nilai regangan tanah 10^{-1} - 10^{-2} , dan pada titik tersebut termasuk zona kedalaman air sumur dangkal. Lima titik tersebut berpotensi terjadi likuifaksi jika ada guncangan gempa. Wilayah yang berpotensi terjadi likuifaksi yaitu di Kelurahan Gesikan, Karangturi, Gentan (Kecamatan Wedi), Kelurahan Kragilan (Kecamatan Gantiwarno), dan Kelurahan Sengon, Cucukan (Kecamatan Prambanan).

5.5 TINGKAT KERENTANAN SEISMIK DI WILAYAH KABUPATEN KLATEN

Tingkat kerentanan dalam penelitian ini secara sederhana ditentukan dari pembobotan (*scoring*) parameter-parameter yang diperoleh dari pengukuran di daerah penelitian yaitu nilai *Kg*, PGA Kanai, regangan geser tanah dan Vs30. Hasil pengukuran tersebut diklasifikasi dengan cara membagi menjadi tiga klasifikasi level nilai hasil ukur yaitu level tinggi, menengah dan rendah, level ini hanya untuk daerah penelitian, tidak berlaku secara umum. Dari empat nilai ukur

maka diperoleh empat klasifikasi level di daerah penelitian seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.4**, **Tabel 5.5**, **Tabel 5.6**, **Tabel 5.7**, **Tabel 5.8**.

Tabel 5.4 Klasifikasi Kg

No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	0.21 - 90.2	rendah	1
2	90.2 - 180.19	menengah	2
3	180.19 - 270.18	tinggi	3

Tabel 5.5 Klasifikasi PGA Kanai

No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	123.324 - 355.334	rendah	1
2	355.334 - 587.344	menengah	2
3	587.344 - 819.01	tinggi	3

Tabel 5.6 Klasifikasi regangan geser

No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	0.00011 - 0.058692	rendah	1
2	0.058692 - 0.117274	menengah	2
3	0.117274 - 0.175856	tinggi	3

Tabel 5.7 Klasifikasi Vs30

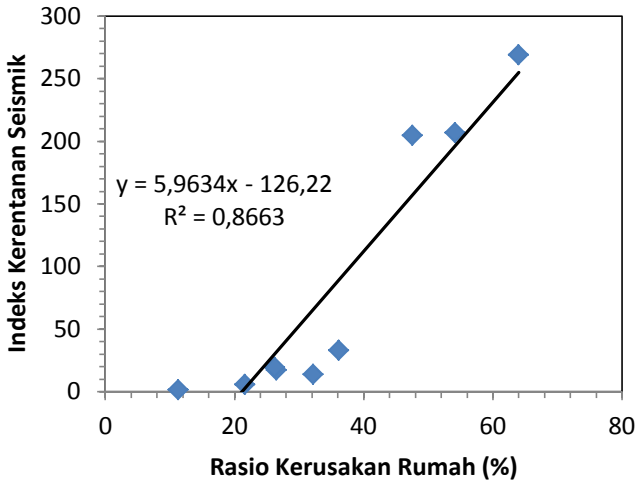
No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	199.256 - 465.4014	rendah	3
2	465.4014 - 731.5468	menengah	2
3	731.5468 - 997.693	tinggi	1

Tabel 5.8 Klasifikasi kedalaman air sumur

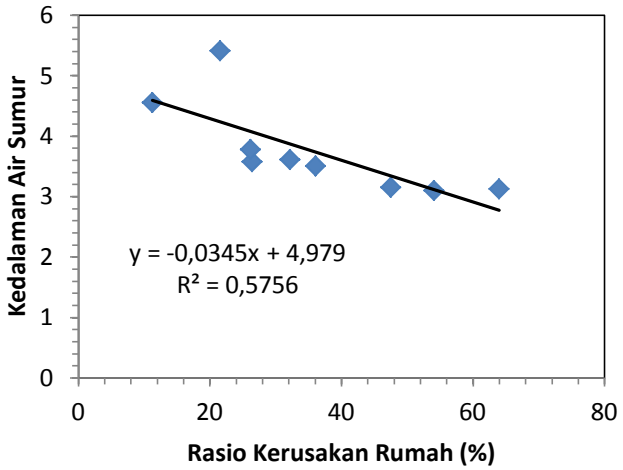
No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	3 - 4,06667	rendah	3
2	4,06667 - 5,13333	menengah	2
3	5,13333 - 6,2	tinggi	1

Setiap parameter mempunyai bobot terhadap tingkat kerentanan seismik yang berbeda, yaitu berdasarkan nilai R^2 *trendline* hubungan setiap parameter dengan rasio kerusakan rumah. Dapat dilihat pada **Gambar 5.25, Gambar 5.26, Gambar 5.27, Gambar 5.28, Gambar 5.29**. Bobot Nilai PGA = 25 %, Vs30 =

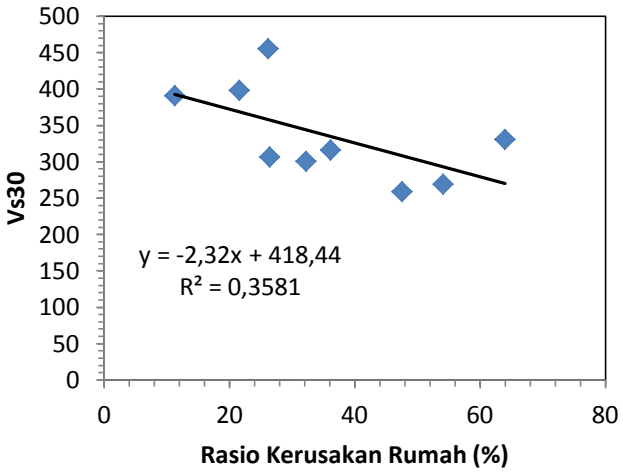
10 %, Kg = 35 %, Regangan geser = 10 %, dan kedalaman muka air sumur = 20 %. Dapat dilihat pada **Tabel 5.9**.



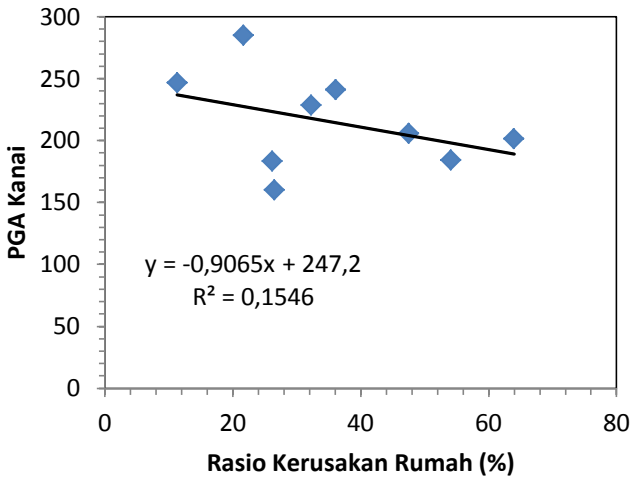
Gambar 5.25 Grafik Hubungan Kg dengan Rasio Kerusakan Rumah



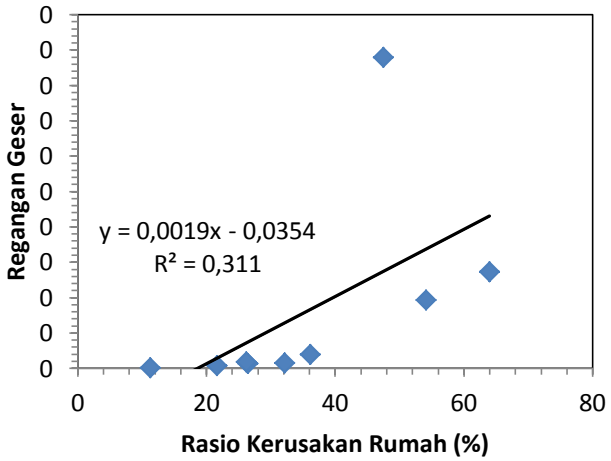
Gambar 5.26 Grafik Hubungan Kedalaman Muka Air Sumur dengan Rasio Kerusakan Rumah



Gambar 5.27 Grafik Hubungan Vs30 dengan Rasio Kerusakan Rumah



Gambar 5.28 Grafik Hubungan PGA Kanai dengan Rasio Kerusakan Rumah



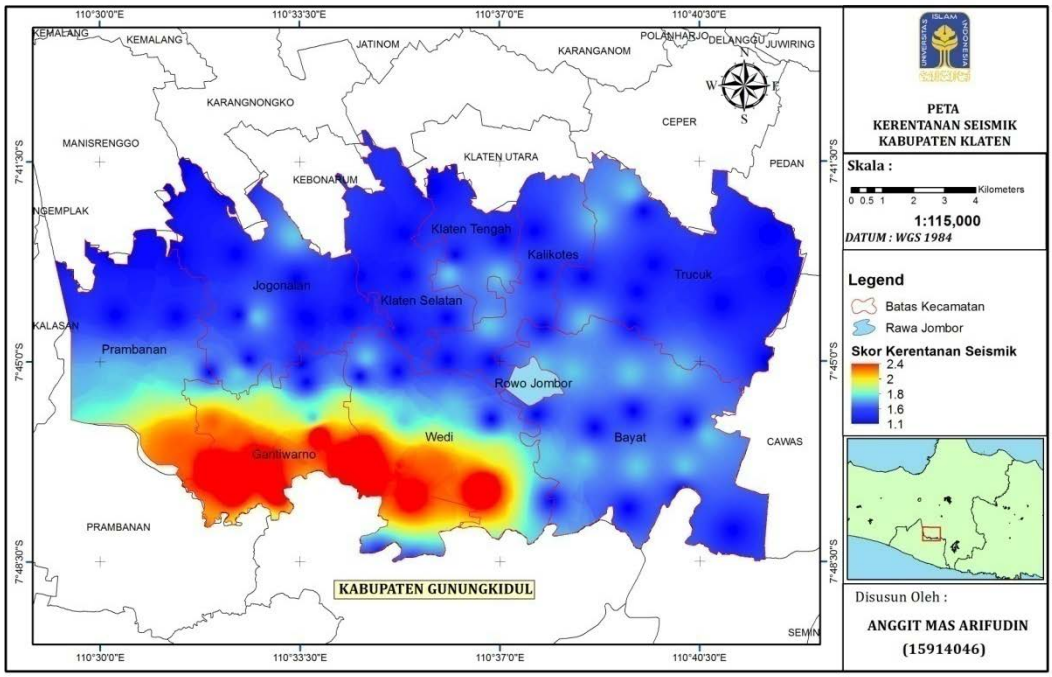
Gambar 5.29 Grafik Hubungan Regangan Geser dengan Rasio Kerusakan Rumah

Tabel 5.9 Nilai R2 dan Pembobotan Parameter Kerentanan Seismik

Kec	Kerusakan Rumah (%)	Kg	Ked. Muka Air	Vs30	PGA Kanai	Reg. Geser
WEDI	64.0	268.684	3.120	330.629	201.216	0.05478
GANTIWARNO	54.1	206.564	3.100	269.055	184.126	0.03854
PRAMBANAN	47.5	204.460	3.149	258.521	205.532	0.17586
JOGONALAN	36.1	32.900	3.502	316.303	241.212	0.00804
BAYAT	32.2	13.410	3.607	300.319	228.479	0.00310
TRUCUK	21.6	5.684	5.405	397.828	284.863	0.00164
KALIKOTES	26.5	17.194	3.574	306.542	159.846	0.00278
KLATEN SELATAN	26.2	19.084	3.780	455.033	183.323	0.00354
KLATEN TENGAH	11.3	1.395	4.551	390.467	246.557	0.00035
Nilai R^2		**0.866**	**0.575**	**0.358**	**0.654**	**0.311**
Bobot Nilai		35	20	10	25	10

Skor akhir setiap parameter setelah pembobotan kemudian dijumlahkan sehingga diperoleh nilai untuk pembuatan peta yang menunjukkan nilai kerentanan seismik berdasar semua nilai ukur. Penggabungan dilakukan dengan melakukan penjumlahan skor yang diperoleh masing-masing parameter. Nilai gabungan dari kelima parameter tersebut selanjutnya digunakan untuk membuat peta kerentanan seismik. Peta kerentanan seismik yang diperoleh dapat dilihat pada **Gambar 5.30.**

Peta kerentanan juga menunjukkan wilayah Kabupaten Klaten bagian selatan mempunyai nilai amplifikasi, indek kerentanan seismik, PGA dan regangan geser bernilai relatif lebih tinggi dari bagian wilayah Kabupaten Klaten, 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 goncangan gempa bumi atau tingkat kerentanan seismiknya tinggi.



Gambar 5.30 Peta tingkat kerentanan seismik Kabupaten Klaten

Daerah dengan kerentanan seismik tinggi meliputi Kecamatan Wedi bagian Selatan tersebar di Kelurahan Kaligayam, Gentan, dan Karangturi, Kecamatan Gantiwarno bagian selatan tersebar di Kelurahan Jogoprayan, Kragilan, Ngandong, Kerten, Ngerut, Katekan, Sawit, Mutihan, dan Mlese, serta Kecamatan Prambanan bagian tenggara yaitu Kelurahan Sengon dan Sambirejo.

5.6 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg), REGANGAN GESER (γ), DAN PERCEPATAN TANAH (α)

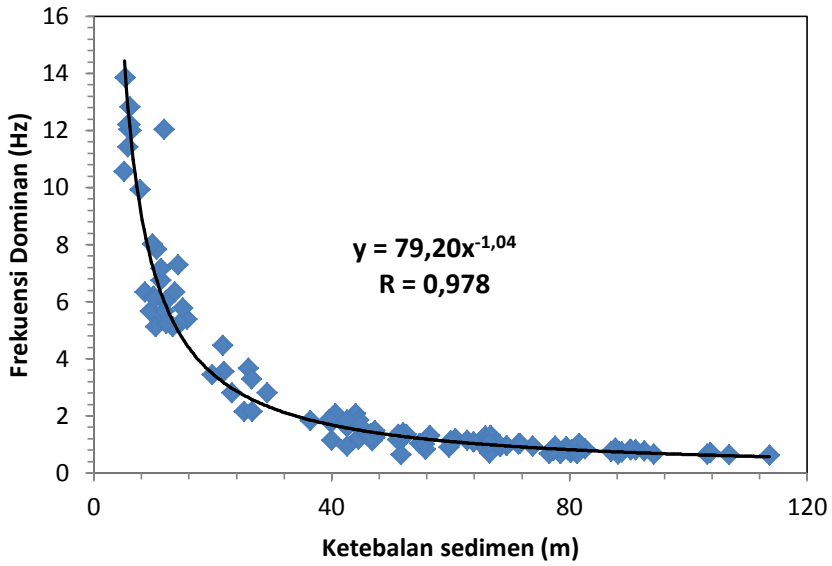
Indeks kerentanan seismik, regangan geser dan percepatan tanah menurut Nakamura seperti dirumuskan dalam persamaan (3.6), terlihat bahwa besarnya regangan geser tanah dipengaruhi oleh besarnya nilai indeks kerentanan seismik dan besarnya PGA di batuan dasar dititik tertentu. Regangan geser berbanding lurus dengan nilai indeks kerentanan seismik dan nilai PGA di batuan dasar. Semakin besar nilai *Kg* maka semakin besar nilai regangan geser. Demikian pula 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

Gantiwarno bagian selatan, Kecamatan Wedi bagian selatan, dan Kecamatan Prambanan bagian tenggara. Hal ini berkaitan dengan nilai indeks kerentanan seismik yang relatif lebih besar dibanding daerah lainnya. Menunjukkan wilayah bagian selatan Kabupaten Klaten mempuyai material penyusun relatif lebih tidak kompak dari bagian yang lain, ditunjukan nilai regangan gesernya yg lebih besar sehingga relatif lebih rawan.

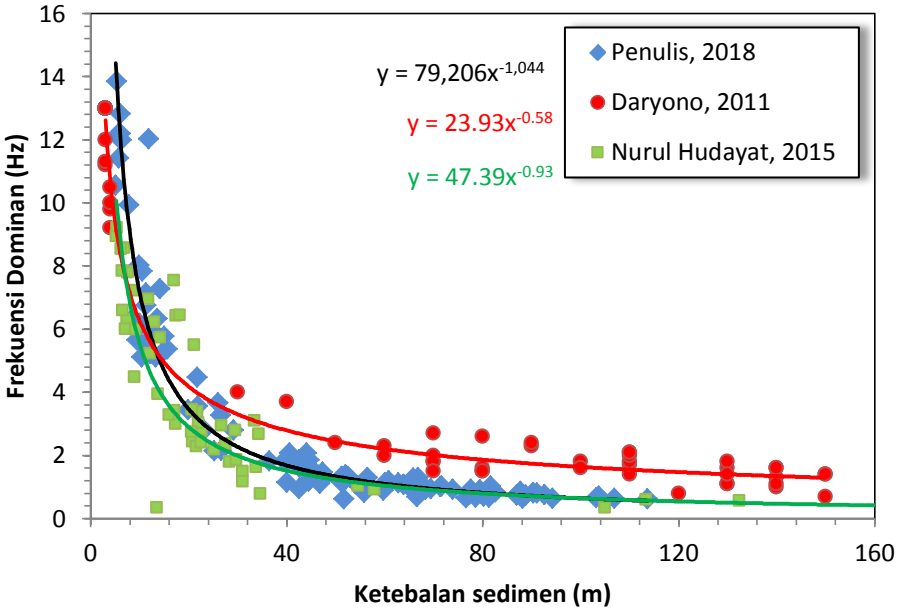
5.7 HUBUNGAN FREKUENSI DOMINAN (fg), DAN KETEBALAN SEDIMEN TANAH (h)

Frekuensi dominan tanah memiliki hubungan dengan ketebalan sedimen (Petermans *et al.* , 2006). Seperti halnya dikemukakan oleh Parolai et al., 2001, bahwa semakin dalam batuan dasar maka frekuensi resonansinya semakin rendah, sebaliknya semakin dangkal batuan dasar maka frekuensi resonansinya semakin tinggi. Hubungan antara frekuensi resonansi dengan ketebalan sedimen membentuk sebuah hubungan berbanding terbalik. Hubungan antara frekuensi resonansi dengan ketebalan sedimen dinyatakan dalam Persamaan (3.1). Analisis statistik untuk mengetahui hubungan antara frekuensi resonansi dengan ketebalan sedimen menunjukkan bahwa frekuensi resonansi memiliki korelasi signifikan dengan ketebalan sedimen dengan nilai korelasi sebesar 0,978. Hubungan frekuensi resonansi dengan ketebalan sedimen ditunjukkan pada **Gambar 5.31**.



Gambar 5.31 Grafik Hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen

Sebagai perbandingan hubungan frekuensi dominan dan ketebalan sedimen di titik penelitian ditunjukkan hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan hasil pengukuran oleh (Daryono, 2011) dan (Nurul Hudayat, 2015) . Nilai data hubungan frekuensi dengan ketebalan sedimen hampir sama tidak menyebar. Hal ini menunjukkan kedua data relevan, ditunjukkan pada **Gambar 5.32**.

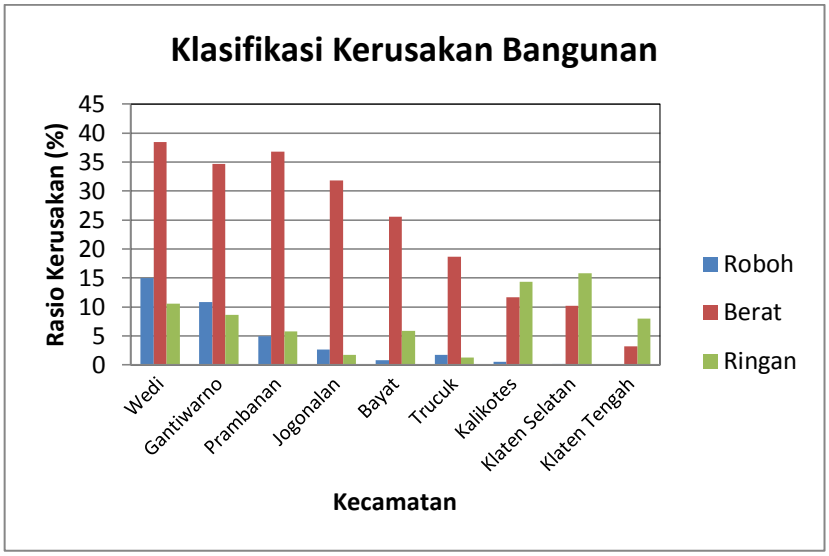


Gambar 5.32 Grafik Hubungan frekuensi dominan dengan ketebalan sedimen dari data penelitian Daryono (2011), Nurul Hudayat (2015), dan penulis

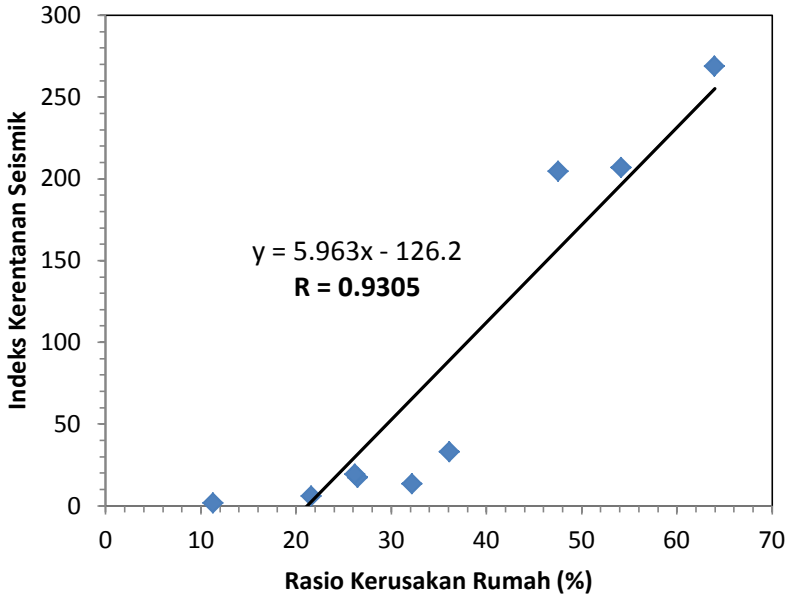
5.8 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK DENGAN RASIO KERUSAKAN RUMAH

Hasil perhitungan pada penelitian ini menunjukkan bahwa, semakin tinggi indeks kerentanan seismik, semakin besar rasio kerusakan rumah. Rasio kerusakan rumah akibat gempa Jogja Mei 2006 dapat dilihat pada **Gambar 5.33**, didapatkan dari data BAPPEDA Klaten, 2006. Menunjukkan bahwa di Kecamatan Gantiwarno, Wedi, Prambanan, Jogonalan, Bayat, Trucuk lebih banyak rumah yang rusak berat, sedangkan di Kecamatan Kalikotes, Klaten Selatan, Klaten Tengah lebih banyak rumah yang rusak ringan. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa indeks kerentanan seismik 268,684 berhubungan dengan rasio kerusakan rumah sebesar 64 %, indeks kerentanan seismik 1,395 berhubungan dengan rasio

kerusakan rumah sebesar 11,3 %. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa rasio kerusakan rumah memiliki korelasi signifikan dengan indeks kerentanan seismik, dengan nilai korelasi sebesar 0,9305. Hubungan antara indeks kerentanan seismik dengan rasio kerusakan rumah dapat dilihat pada **Gambar 5.34**.



Gambar 5.33 Rasio Kerusakan Rumah kabupaten Klaten



Gambar 5.34 Hubungan indeks kerentanan seismik dengan rasio kerusakan rumah

5.9 HUBUNGAN TINGKAT KERENTANAN SEISMIK DAN RASIO KERUSAKAN RUMAH

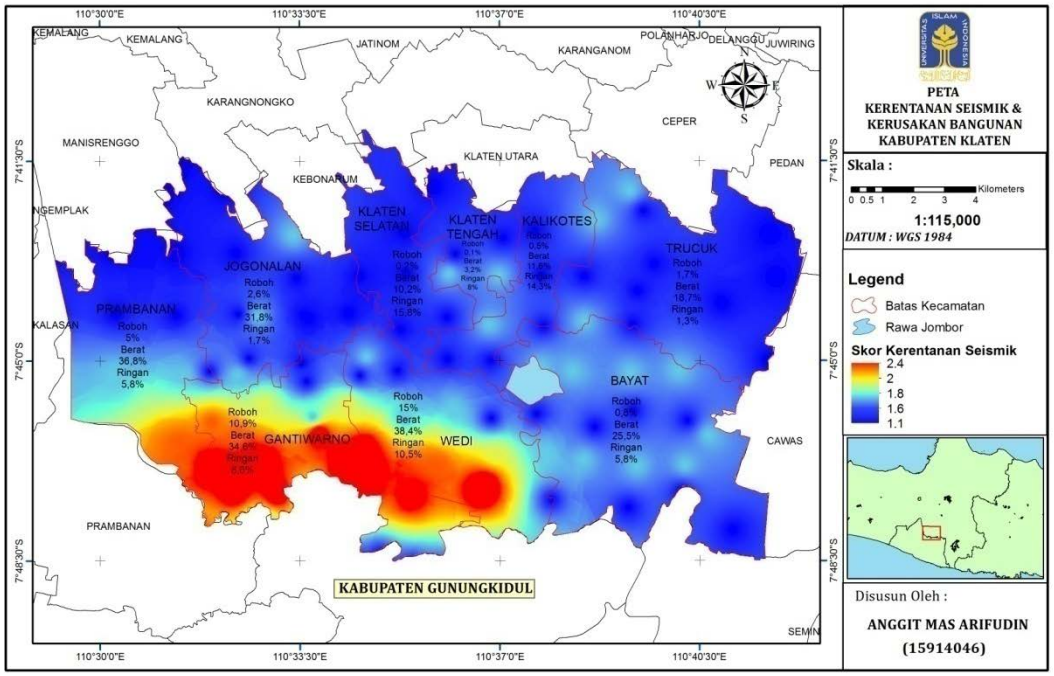
Persebaran tingkat kerusakan akibat gempa bumi 27 mei 2006 wilayah bagian selatan Kabupaten Klaten berkorelasi dengan tingkat kerentanan seismik hasil penelitian, dimana bagian selatan relatif lebih rentan berkesusaian dengan kerusakan bangunannya lebih parah. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.10.**

Tabel 5.10 Jumlah Rumah rusak di Kabupaten Klaten (Bappeda Klaten, 2006)

Kecamatan	Roboh	Rusak Berat	Ringan
Wedi	3265	8366	2290
Gantiwarno	2367	7540	1876
Prambanan	1086	8000	1256
Jogonalan	569	6924	367
Bayat	183	5556	1270
Trucuk	367	4060	279
Kalikotes	110	2531	3118
Klaten Selatan	35	2221	3442
Klaten Tengah	13	707	1733

Daerah dengan kerentanan seismik tinggi meliputi Kecamatan Wedi bagian Selatan tersebar di Kelurahan Kaligayam, Gentan, dan Karangturi, Kecamatan Gantiwarno bagian selatan tersebar di Kelurahan Jogoprayan, Kragilan, Ngandong, Kerten, Ngerut, Katekan, Sawit, Mutihan, dan Mlese, serta Kecamatan Prambanan bagian tenggara yaitu Kelurahan Sengon dan Sambirejo. Daerah yang tingkat kerentanannya tinggi menunjukkan jumlah rumah yang rusak tinggi, seperti terlihat pada tabel untuk Kecamatan Gantiwarno jumlah kerusakan bangunan dengan kategori berat sekitar 8.366 bangunan (34,6%), Kecamatan Wedi mencapai sekitar 7.540 bangunan rusak berat (38,4%), sedangkan kecamatan Prambanan sekitar 8.000 bangunan rusak berat (36,8%).

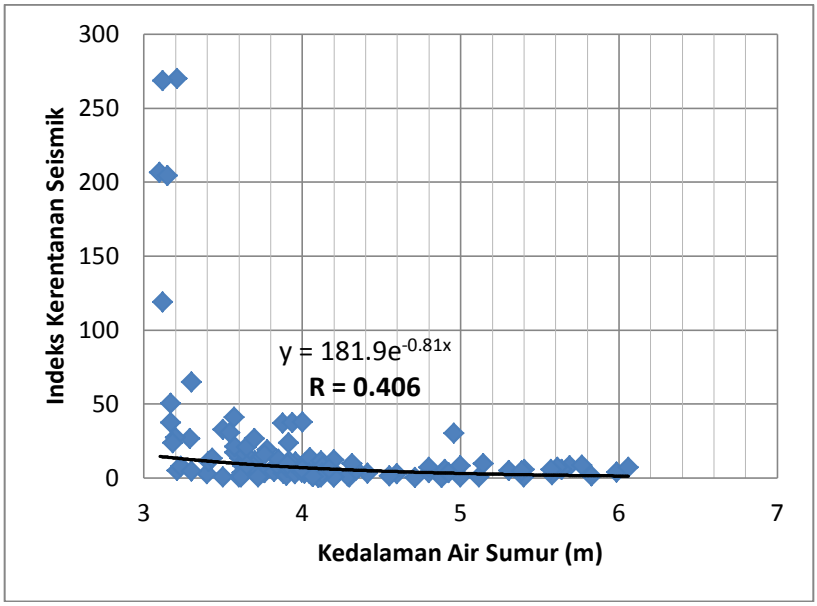
Hubungan antara rasio kerusakan rumah dalam persen dengan tingkat kerentanan seismik dapat dilihat pada **Gambar 5.35**.



Gambar 5.35 Peta tingkat kerentanan seismik dengan rasio kerusakan bangunan

5.10 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK (Kg) DAN KEDALAMAN MUKA AIR SUMUR

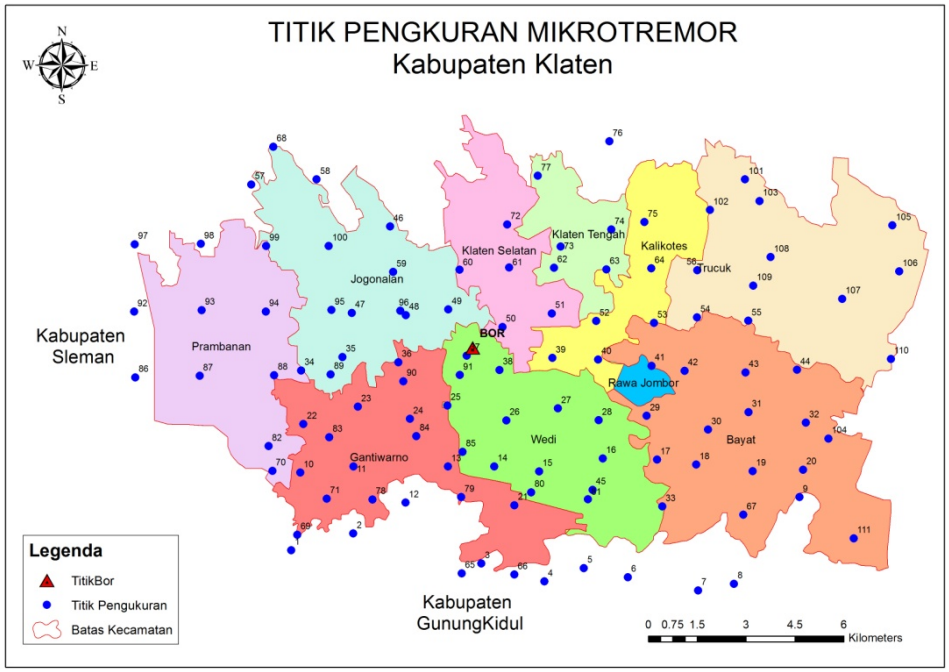
Kedalaman muka air tanah berhubungan dengan indeks kerentanan seismik. Daryono, (2011) berpendapat bahwa muka air tanah dangkal memiliki bobot tinggi dalam penyusunan zonasi bahaya gempa bumi. Muka air tanah dangkal menyebabkan tingginya indeks kerentanan seismik sebaliknya muka air dalam memilki indeks kerentanan seismik rendah. Lapisan jenuh air tidak memungkinkan terjadinya proses pemadatan, hal ini disebabkan lapisan jenuh air biasanya tersusun oleh material pasir dan kerikil lepas sehingga mudah mengalami deformasi, seperti rekahan dan likuifaksi. Hasil analisis statistik menunjukkan bahwa kedalaman muka air tanah memiliki korelasi signifikan dengan indeks kerentanan seismik, dengan nilai korelasi sebesar 0,406. Hubungan indeks kerentanan seismik dengan kedalaman muka air tanah ditunjukkan pada **Gambar 5.36.**



Gambar 5.36 Hubungan antara kedalaman air sumur dengan indeks kerentanan seismik

5.11 PGA DAN REGANGAN GESER *(GROUND SHEAR STRAIN)* PERLAPISAN

Nilai PGA dan regangan geser tanah pada penelitian ini dilakukan pada titik bor Gereja Wedi, seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.37** , dimana pada titik tersebut terdapat data N-SPT dan lapisan tanah yang dapat digunakan sebagai input perhitungan PGA dan regangan geser tanah. Data bor Gereja Wedi ini didapatkan dari data sekunder. Analisis PGA dan regangan geser tanah pada penelitian ini menggunakan *software* NERA (*Non Liniear Earthquake Site Response Analysis*).



Gambar 5.37 Lokasi Titik Bor Gereja Wedi

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 2 rekaman gempa yang nilai PSA nya mendekati Spektral Target di Wedi, yaitu :

1. Trinidad (Agustus 1983) dengan M = 6,7
2. Hollister USA (April 1961) dengan M = 5,6

Penggunaan dua *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, 2017) dengan probabilitas terlampui 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 Gereja Wedi.

5.11.1 Analisis *Spectral Matching* untuk daerah Kabupaten Klaten

Untuk pengolahan dengan *sofware* NERA dibutuhkan data *time history* percepatan. Karena data percepatan gempa Yogyakarta 2006 tidak ada maka digunakan *time history* percepatan desain. *Time history* desian 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 mencocokan spektra gempa original dengan spektra gempa target. Spektra original yang digunakan dalam penelitian ini spektra dari gempa El Centro, Kobe 1995 dan Buchares. Spektra gempa target **Gambar 5.38** diperoleh dengan menggunakan persamaan atenuasi Boore et.al dari John Douglas, 2017 seperti ditunjukkan pada Persamaan (5.1) dan hasil perhitungan ditunjukkan pada **Tabel 5.11**. 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 original di *matching* dengan spektra target yang dilakukan dengan bantuan *software* SeismoMatch, hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 5.39**.

$$lnY = b_1 + b_2\,(M-6) + b_3(M-6)^2 + b_5\,lnR + b_v \ln\frac{vs}{va} \qquad (5.1)$$

Notasi dalam persamaan ini adalah :

R_2 = r_{jb2}+h_2

B_1 = r_{b1ss} untuk strike slip

= r_{b11RS} untuk reverse slip

= r_{1ALL} untuk mekanisme yang tidak ditentukan

M = Momen magnitude (Mw)

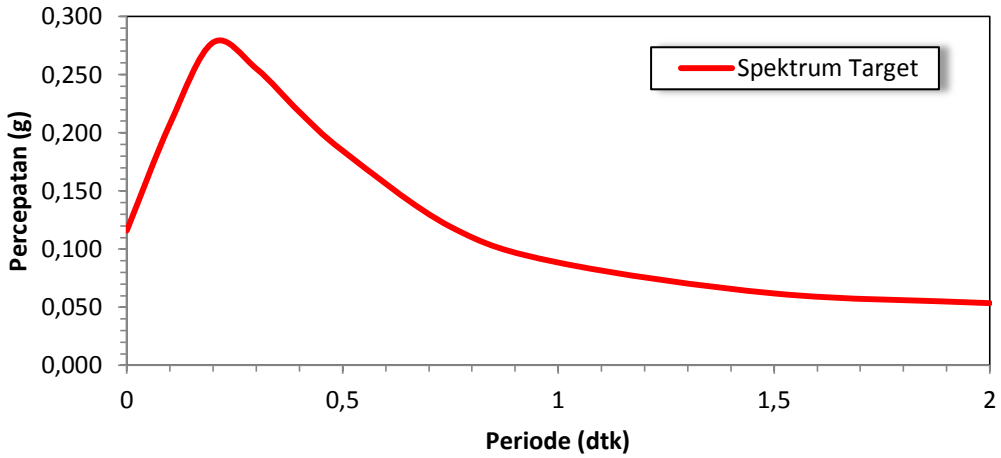
r_{jb} = jarak terdekat dengan bidang patahan (km)

Vs = kecepatan gelombang geser (m/s)

Y = nilai PGA dalam g

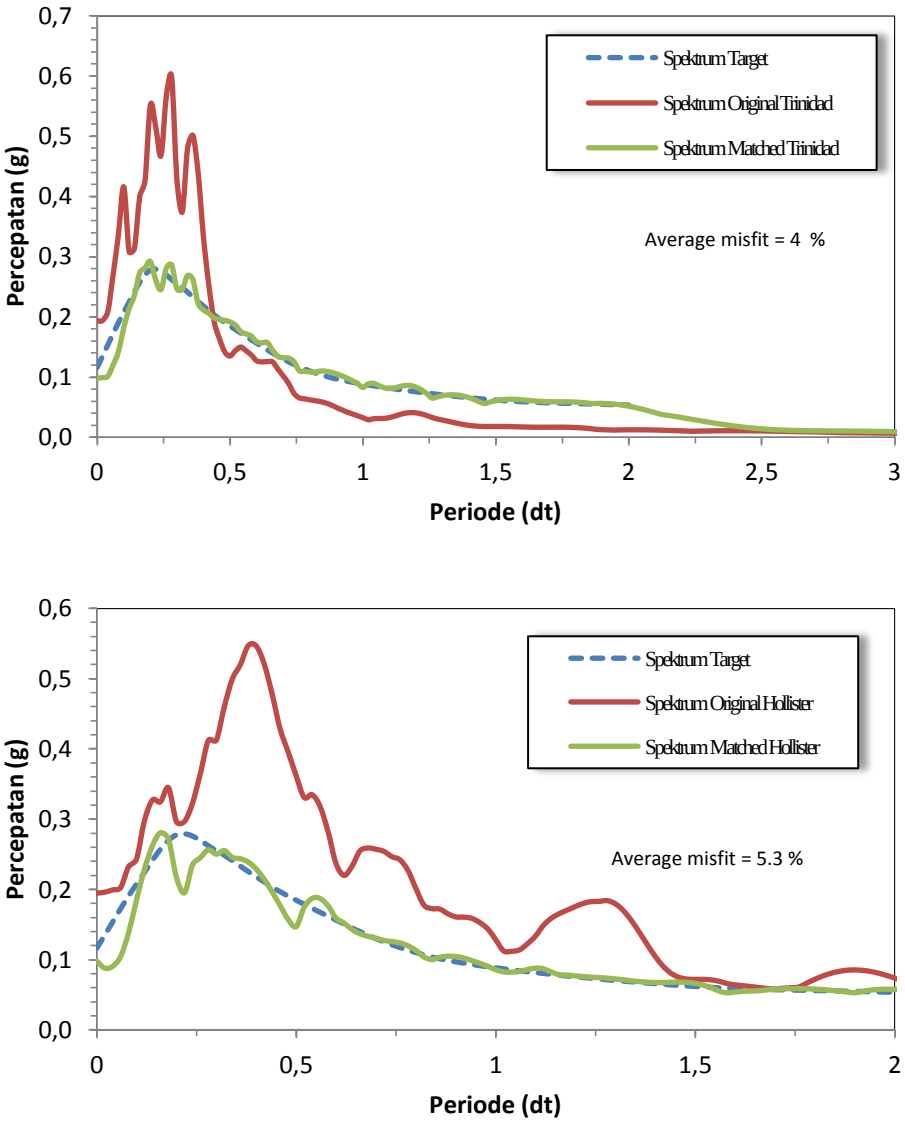
Tabel 5.11 Perhitungan Spektrum Target dengan atenuasi PSA Boore et, al.

Periode (s)	b1ss	b2	b3	b5	bv	va	h	Percepatan (g)
0	-0,313	0,527	0	-0,778	-0,371	1396	5,57	0,116
0,1	1,006	0,753	-0,226	-0,934	-0,212	1112	6,27	0,208
0,2	0,999	0,711	-0,207	-0,924	-0,292	2118	7,02	0,278
0,3	0,598	0,711	-0,161	-0,893	-0,401	2133	5,94	0,255
0,4	0,212	0,769	-0,12	-0,867	-0,487	1954	4,91	0,218
0,5	-0,112	0,831	-0,09	-0,846	-0,553	1782	4,13	0,185
0,75	-0,737	0,884	-0,046	-0,813	-0,653	1507	3,07	0,119
1	-1,133	0,979	-0,032	-0,798	-0,698	1406	2,9	0,088
1,5	-1,552	1,036	-0,044	-0,796	-0,704	1479	3,92	0,062
2	-1,699	1,085	-0,085	-0,812	-0,655	1795	5,85	0,054

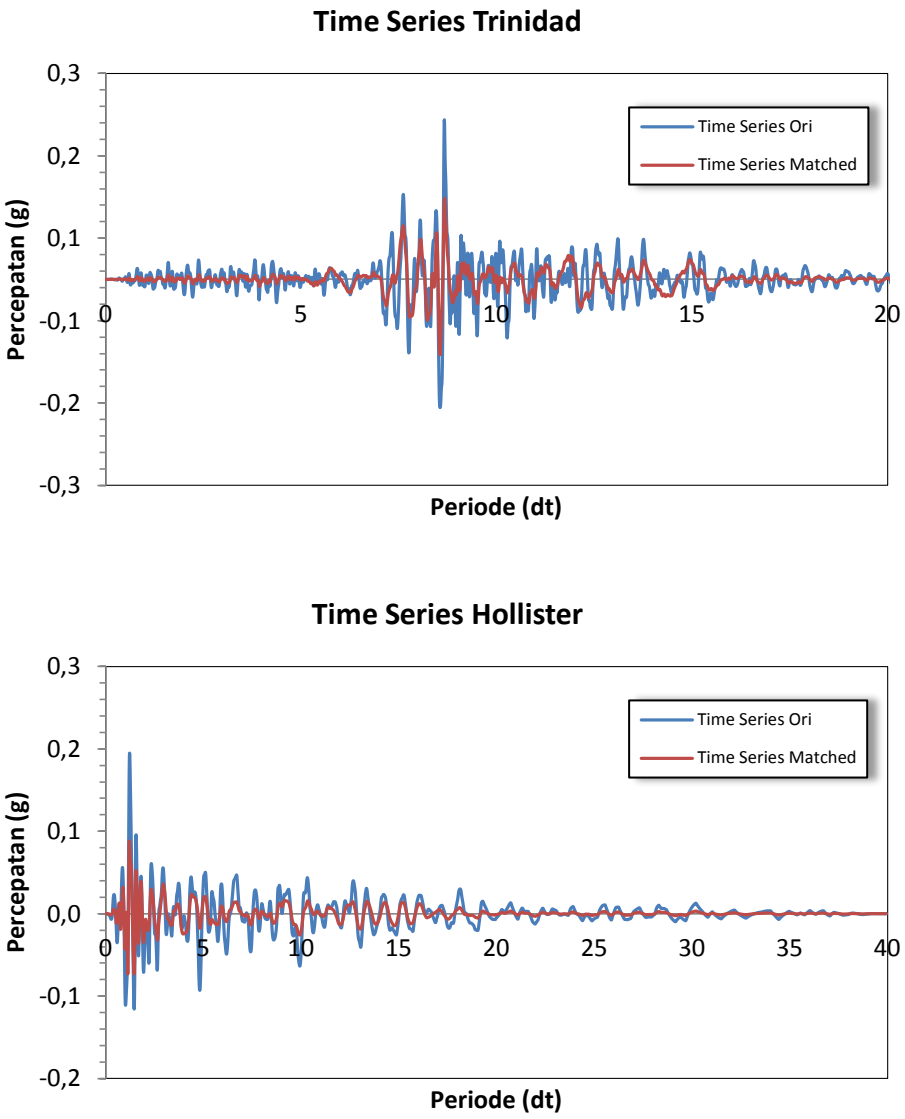


Gambar 5.38 Spektrum Target

Setelah diperoleh spektra desain maka spektra ini di trasformasi fourier menjadi *time history* percepatan yang hasilnya ditunjukan pada **Gambar 5.40.** *Time history* inilah yang digunakan sebagai input program NERA untuk menghitung percepatan gerakan tanah maksimum dan regangan geser maksimum perlapisan tanah.



Gambar 5.39 Respon spektral original, matched, dan target dari dua gempa



Gambar 5.40 *Time history* hasil matching dari tiga gempa

5.11.2 Analisis PGA dan Regangan Geser Tanah Perlapisan

Input data untuk *soil profile* pada titik bor Gereja Wedi ditunjukan pada **Tabel 5.12.** Hasil perhitungan PGA pada titik bor ini menggunakan tiga *ground motion* ditunjukan dalam **Tabel 5.13**. Hasil perhitungan regangan geser tanah menggunakan tiga ground motion ditunjukkan dalam **Tabel 5.14.** Sedangkan profil PGA tiap lapisan ditunjukan **Gambar 5.41** dan profil regangan geser tiap lapisan ditunjukkan pada **Gambar 5.42.**

Tabel 5.12 Input soil profil titik bor Gereja Wedi

Layer Number	Soil Material Type	Thickness of layer (m)	N-SPT	Total unit weight (kN/m3)	Shear wave velocity (m/s)
1	Pasir	2,25	5	16	98,11
2	Pasir	2,25	4	16	86,66
3	Lanau	0,8	15	17	180,76
4	Pasir	1,2	25	16	240,16
5	Pasir	1,25	25	16	240,16
6	Lanau	1,65	20	17	212,13
7	Pasir	1,3	15	16	180,76
8	Pasir	2,3	22	16	223,67
9	Pasir	5	15	16	180,76
10	Lempung	2	20	18	212,13

Tabel 5.13 Hasil perhitungan PGA dalam satuan g pada permukaan tanah dari masing – masing *input motion*

Titik Bor	Trinidad	Hollister	Kanai
Gereja Wedi	0,1162	0,117	0,47

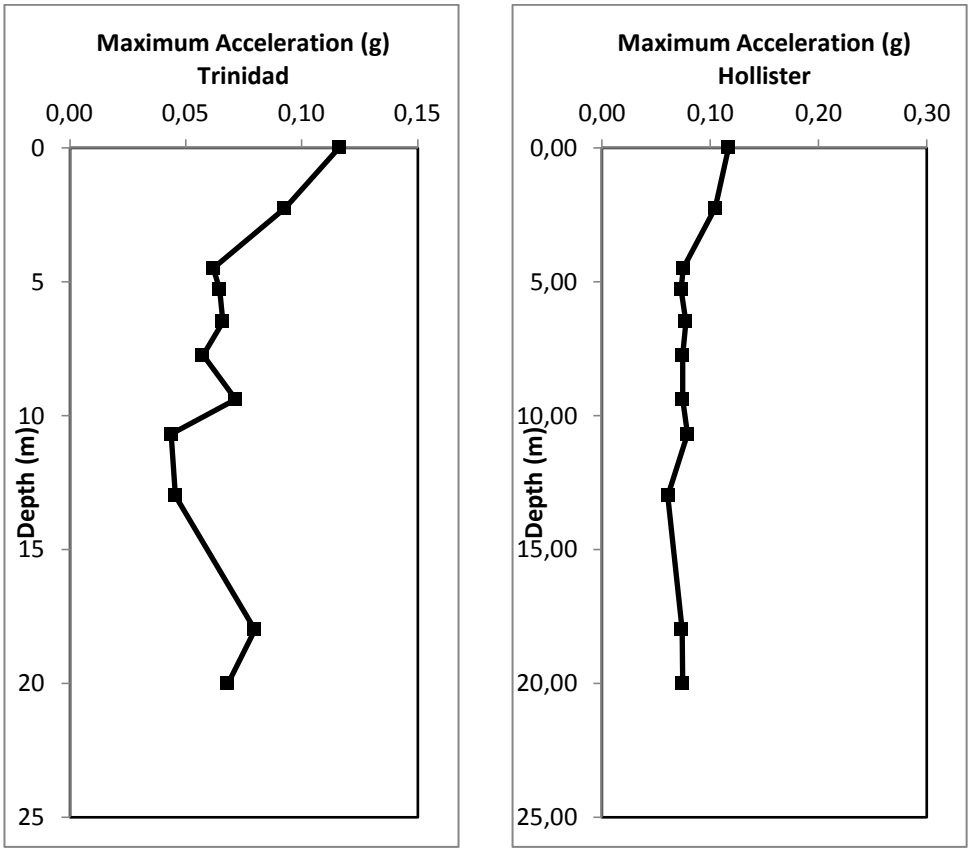
Hasil perhitungan menunjukan nilai rata-rata PGA di titik Gereja Wedi tertinggi sebesar 0.117 g dengan sumber gempa Hollister. Titik uji ini belum dapat mewakili kondisi kegempaan di Kabupaten Klaten secara keseluruhan. Karena hanya satu titik uji yang diambil maka masih sedikit apabila dibandingkan dengan luasan wilayah yang ditinjau. Perlu ada penambahan titik uji sehingga dapat merepesentasikan kondisi kegempaan wilayah penelitian.

Tabel 5.14 Hasil perhitungan Regangan Geser Tanah dalam % dari masing – masing *input motion*

Titik Bor	Trinidad	Hollister	Nakamura
Gereja Wedi	0,105	0,1628	0,228

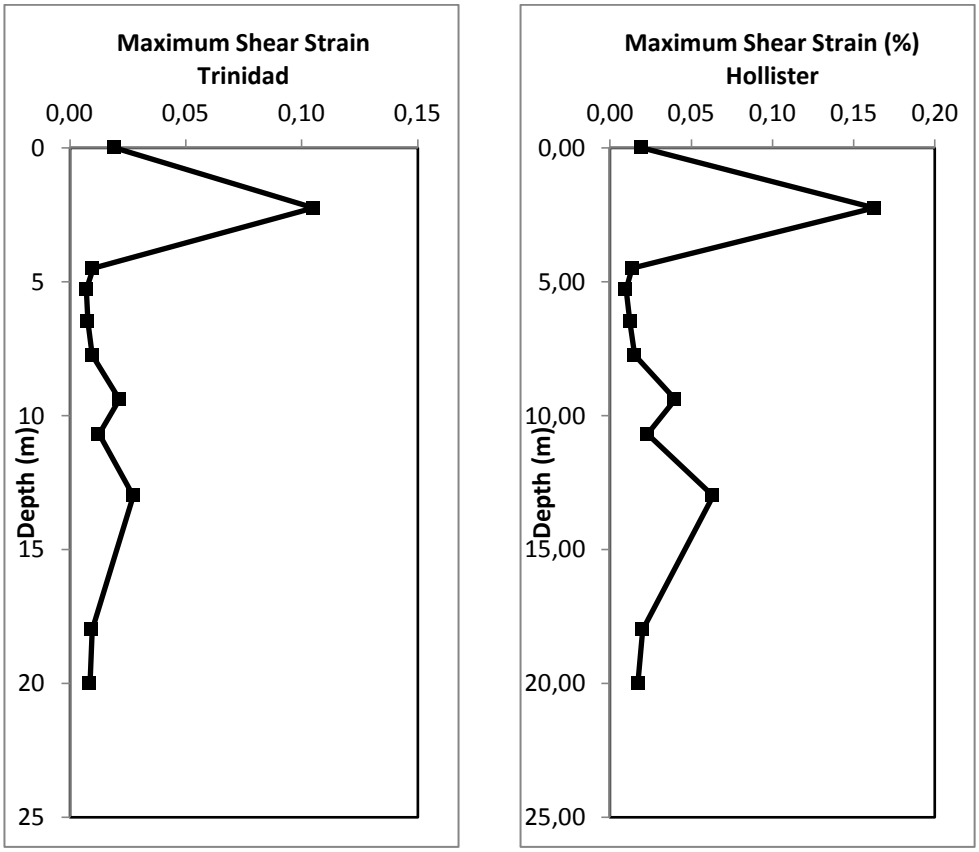
Titik uji Malangan menghasilkan nilai *ground shear strain* tertinggi sebesar 0.1628% dengan *source ground motion* Hollister. Perhitungan dengan metode Nakamura terdapat perbedaan namun tidak terlalu besar. Hal ini di mungkinkan karena penggunaan PGA pada perhitungan Nakamura yang menyebabkan hasil yang berbeda.

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



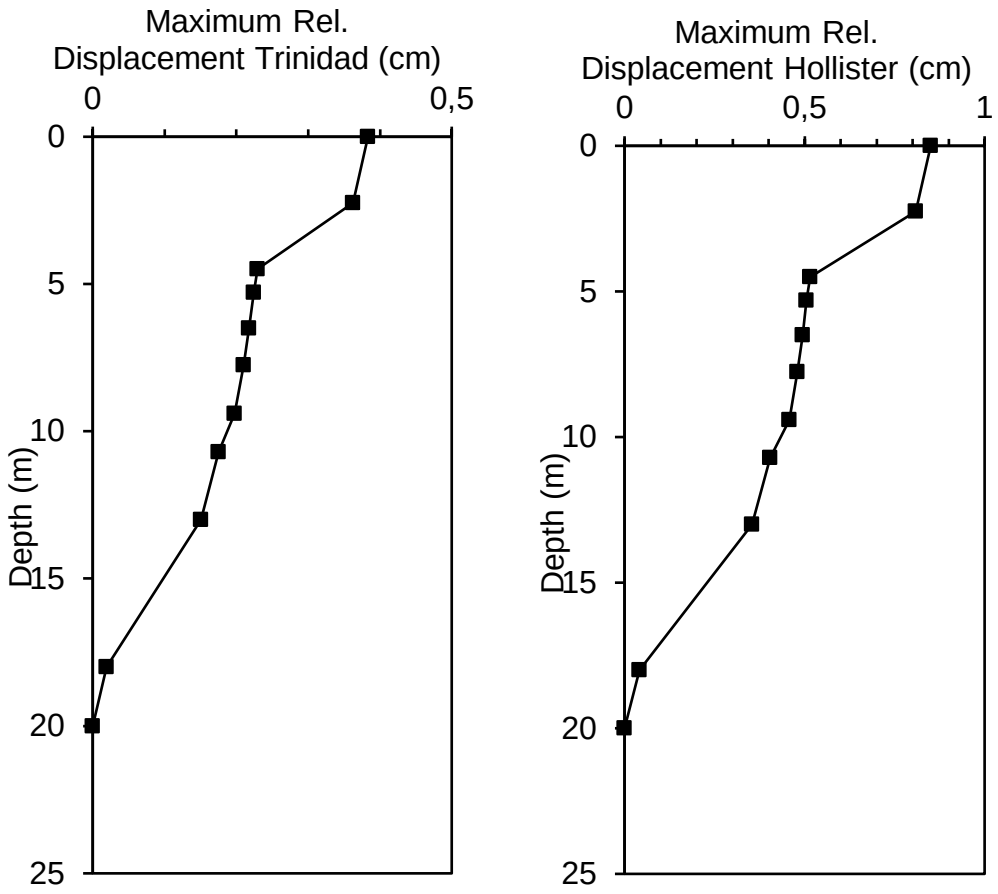
Gambar 5.41 Grafik *Maximum Acceleration* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten

Berdasarkan **Gambar 5.41** untuk gempa Trinidad nilai *acceleration* semakin ke permukaan cenderung semakin besar, walaupun ada penurunan nilai *acceleration* pada kedalaman 13 m dan 10,7 m dikarenakan terjadi perbedaan jenis tanah dari pasir padat menjadi pasir lembut. Hal ini dikarenakan juga karakter gempa Trinidad yang amplitudonya membesar pada tengah kejadian gempa. Sedangkan untuk gempa Hollister nilai *acceleration* semakin ke permukaan semakin besar tanpa ada lonjakan nilai, baik penurunan atau peningkatan nilai *acceleration*. Pada gempa Hollister kejadian gempa memilki amplitudo yang besar di awal kejadian dan kemudian mengecil.



Gambar 5.42 Grafik *Maximum Shear Strain* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten

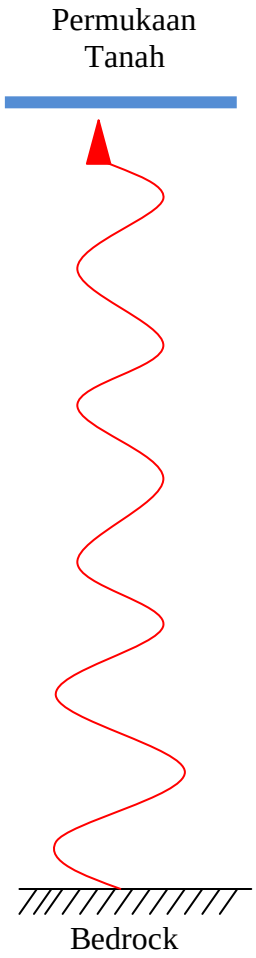
Berdasarkan **Gambar 5.42** untuk gempa Trinidad dan Hollister nilai regangan tanah baserock lebih rendah daripada di permukaan. Untuk regangan di kedalaman 18 m sampai 4,5 m memiliki nilai yang bervariasi naik dan turun, tetapi pada kedalaman 2,25 m mengalami lonjakan atau kenaikan nilai regangan tanah dari 0,0101 menjadi 0,105, hal ini dikarenakan pada kedalaman 4,5 m niali SPT = 15 kemudian turun pada kedalaman 2,25 m nilai SPT menjadi 4, tentunya ini menunjukkan bahwa regangan tanah juga bergantung pada tingkat kekerasan lapisan tanah.

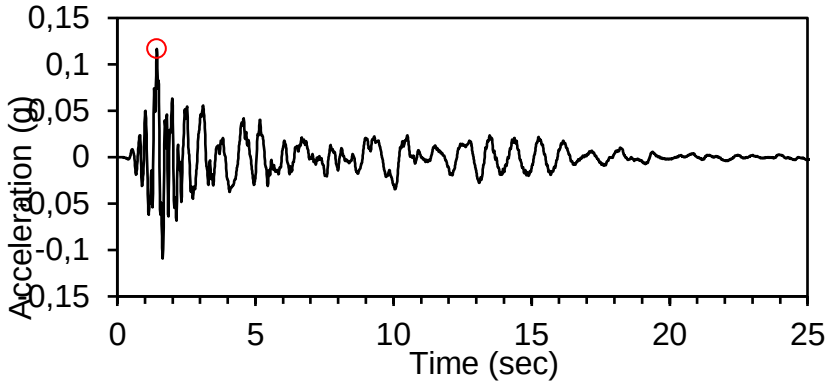


Gambar 5.43 Grafik *Maximum Relative Displacement* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten

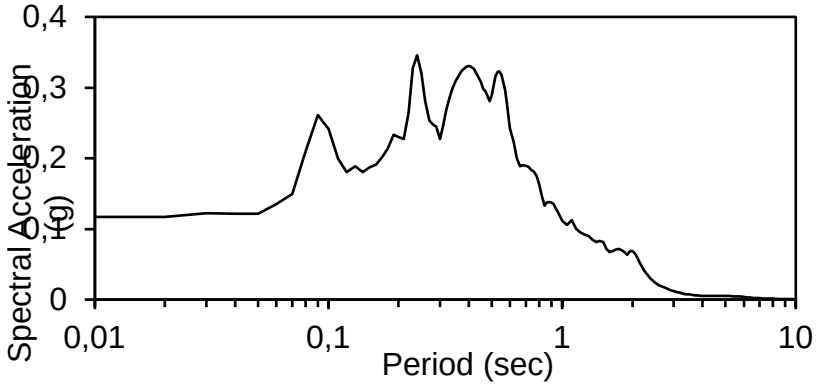
Berdasarkan **Gambar 5.43** untuk gempa Trinidad dan Hollister nilai displacement tanah semakin ke permukaan semakin besar nilainya. Hal ini sesuai dengan teori yang disampaikan oleh Nakamura, 2000, bahwa bentuk kurva nilai displacement tanah dari baserock ke permukaan akan cenderung berbentuk segitiga terbalik.

Hasil Analisis dengan NERA untuk Gempa Trinidad

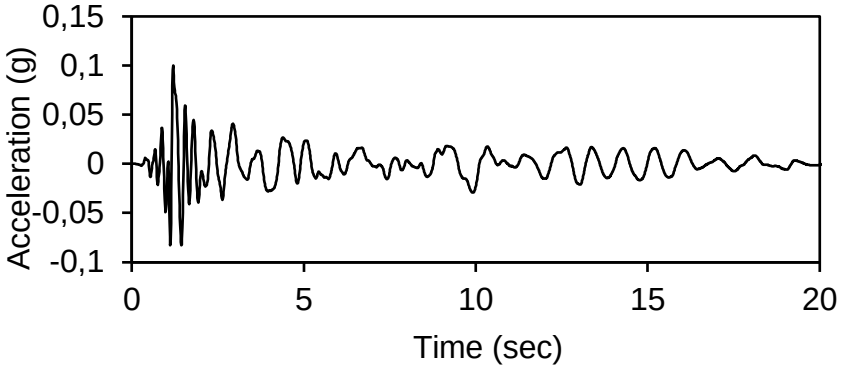




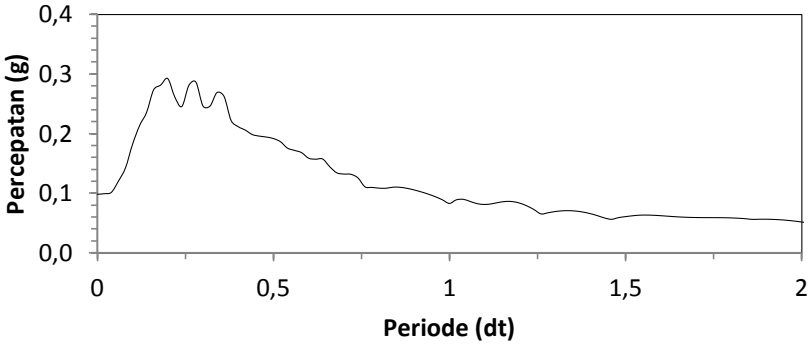
Maxiumum Acceleration (g) = 0,116



Maxiumum Spektral Acceleration (g) = 0,4203

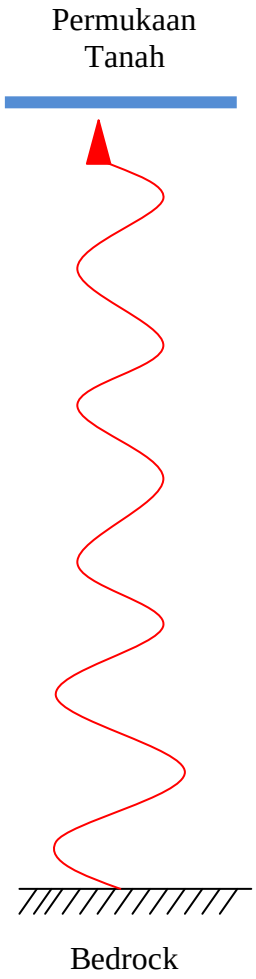


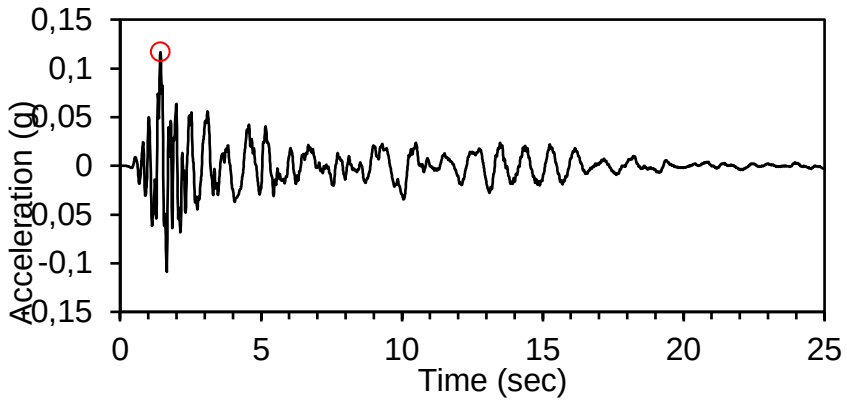
Maxiumum Acceleration (g) = 0,0886



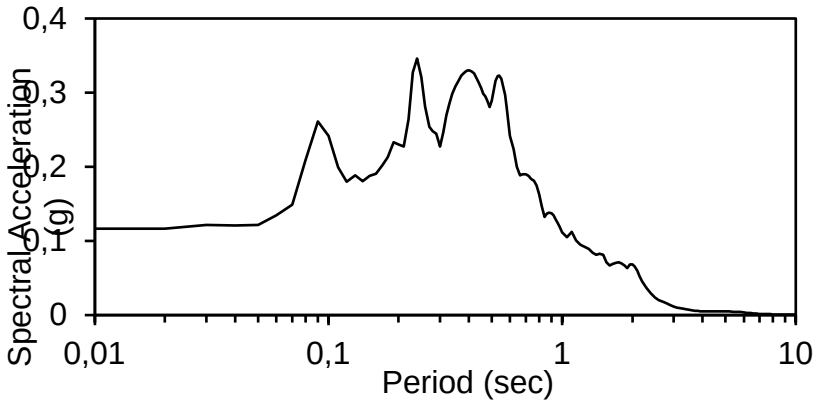
Maxiumum Spektral Acceleration (g) = 0,292

Hasil Analisis dengan NERA untuk Gempa Hollister

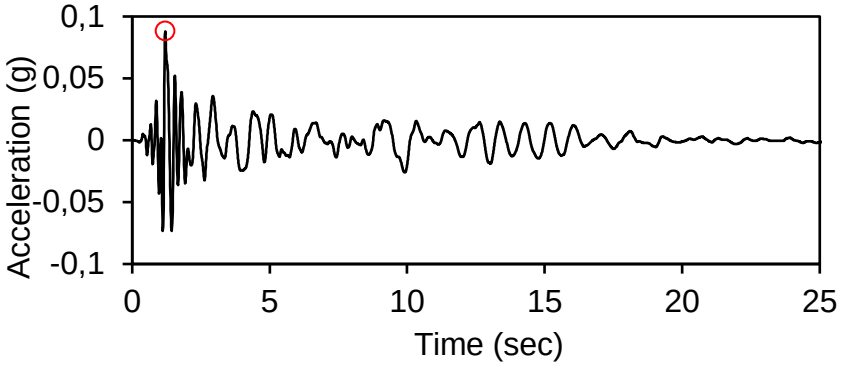




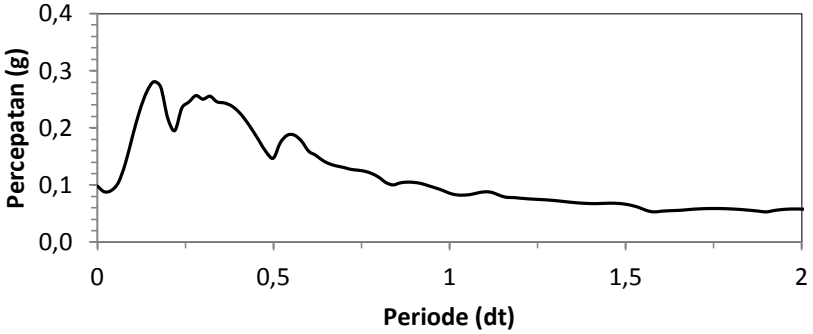
Maxiumum Acceleration (g) = 0,117



Maxiumum Spektral Acceleration (g) = 0,3458



Maxiumum Acceleration (g) = 0,088



Maxiumum Spektral Acceleration (g) = 0,289

BAB VI
KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan pada penelitian kerentanan seismik dan karakteristik dinamik tanah di Kabupaten Klaten bagian selatan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Distribusi nilai frekuensi dominan dengan nilai 0,623 – 13,853 Hz. Distribusi nilai periode dominan dengan nilai 0,072 – 1,604 detik. Distribusi nilai faktor amplifikasi berkisar antara 1,09 – 26,134. Distribusi nilai indeks kerentanan seismik berkisar antara 0,212 – 270,184 dengan nilai relatif lebih tinggi di bagian selatan wilayah Kabupaten Klaten yaitu Kecamatan Wedi, Gantiwarno, dan Prambanan.
2. Karakteristik dinamik tanah ditujukkan oleh nilai kecepatan gelombang geser v_s dengan nilai 130 – 570,83 m/s dan v_s pada kedalaman 30 meter hasil inversi kurva HVSR dengan nilai 199,256 – 997,693 m/s. Vs30 bernilai rendah berada di bagian selatan Kabupaten Klaten, dan bernilai tinggi di bagian perbuktian perbatasan dengan Kabupaten Gunungkidul.
3. Rasio perbandingan hasil Vs30 mikrotremor dengan Vs30 USGS adalah 0,601 – 1,765 dengan rata-rata rasio 1,165, yang berarti hasil antara kedua metode bernilai mendekati sama.
4. Karakteristik dinamik tanah ditunjukkan oleh nilai regangan geser dengan metode Nakamura berkisar antara 0,00011 (0,011 %) sampai 0,1758 (17,58 %).
5. Nilai PGA berdasar perhitungan dengan metode Kanai berkisar antara 123,324 – 819,353 gal atau 0,13 – 0,84 g.
6. Regangan geser tanah menurut rumusan Nakamura dipengaruhi oleh besarnya nilai indek kerentanan seismik dan besarnya PGA di batuan dasar di titik tertentu dan berbanding lurus dengan nilai indek kerentanan seismik dan nilai PGA.

7. Daerah bagian selatan wilayah Kabupaten Klaten mempunyai tingkat kerentanan seismik yang relatif lebih tinggi sesuai dengan kondisi kerusakan bangunan akibat gempa Jogja Mei 2006, meliputi Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, dan Kecamatan Prambanan.

6.2 SARAN

1. Penentuan nilai PGA dengan *New Generation Atenuation* sehingga sehingga diperoleh nilai PGA dengan metode terbaru.
2. Perlu adanya titik data bor yang lebih banyak dan rapat, sehingga data properties bawah permukaan yang diperoleh semakin banyak dan sifat tanah yang diperoleh semakin akurat.
3. Titik pengukuran mikrotremor perlu ditambah meliputi seluruh wilayah Kabupaten Klaten, sehingga peta mikrozonasi yang diperoleh memiliki cakupan wilayah yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

Bappeda, Klaten. (2008). *Data Kerusakan Akibat Gempabumi 27 Mei 2006 (Laporan Perkembangan Penanganan Pasca Gempabumi Tektonik Di Kabupaten Klaten Provinsi Jawa Tengah).* Klaten: Bappeda.

Bappenas. (2006). *Preliminary Damage and Loss Assesment, Yogyakarta and Central Java Natural Disaster.* Jakarta: The Consultatif Group on Indonesia.

Bardet, & Tobita. (2001). *A computer program for nonlinear earthquake site response analysis of layered soil deposits.* California: Department of Civil Engineering, University Of Southern California.

BMKG. (2016). *Data Gempabumi dirasakan di DIY dan sekitarnya.* Yogyakarta.

BPS, Klaten. (2013). *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2013.* Badan Pusat Statistik Kabupaten Klaten.

BPS, Klaten. (2016). *Kabupaten Klaten Dalam Angka 2016.* Badan Pusat Statistik Kabupaten Klaten.

BPS, Klaten. (2013). *Statistik Daerah Kabupaten Klaten 2013.* Badan Pusat Statistik Kabupaten Klaten.

BPS, Klaten. (2016). *Statistik Daerah Kabupaten Klaten 2016.* Badan Pusat Statistik Kabupaten Klaten.

Bulen, & Bolt. (1985). *An Introduction to the Theory of Seismology*. Cambridge University Press, 4th Edition, 509 pp.

Daryono. (2011). *Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada setiap satuan bentuk Lahan di Zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogkarta.* Yogyakarta: Disertasi, Universitas Gadjah Mada.

Daryono, & T. R. (2007). *Data Mikrotremor dan Pemanfaatannya Untuk Pengkajian Bahaya Gempa Bumi.* Badan Meteorologu Klimatologi dan Geofisika.

Daryono, Sutikno, J. S., & K. S. (2009). *Local Site Effect of Graben Bantul Using Microtremor Measurement, Proceedings of international Conference Erath*

Science and Technology. Yogyakarta: Department of Geological Engineering Gajah Mada University.

Douglas, J. (2017). *Ground motion prediction equations 1964-2017*. United Kingdom: University of Strathclyde.

Elnashai. (2008). *Fundamentals of Erathquake Engineering.* United Kingdom: John Wiley and Son.

Gurler, Nakamura, Saita, & Sato. (t.thn.). Local Site Effect of Mexico City Based on Microtremor Measurement. *System and Data Research Co., Ltd, Tokyo 186-0003, Japan* .

Irjan dan Bukhori, A. (2010). Pemetaan Wilayah Rawan Bencana berdasarkan Data Mikroseismik Menggunakan TDS (Time Digital Seismograf) Type 303 Study Kasus : Kampus I UIN Maulana Malik Ibrahim Malang. *Jurnal Neutrino Vol.3 No.2* .

Ishihara, K. (1982). Evaluation of Soil Properties for use in Earthquake response analysis. *Proceedings International Symo. On Num. Model in Geomechanics*, (hal. 237-259).

Ishihara, K. (1978). Introduction to Dynamic Soil Mechanism. *in Japanese* .

Kanai. (1966). Improved Empirical Formula for Characteristics of Stray Earthquake Motion. *Proceedings of The Japanese Earthquake Symposium* (hal. 1-4). Japan: Reported In Trifunac & Brandy (1975).

Kanai. (1983). *Seismology and Engineering.* Japan: Tokyo University.

Kanai, K. (1951). Relation between the nature of surface layer and the amplitudes of earthquake motions I. *Earthquake Research Institute, Tokyo University* , 31-37.

Konno, & Ohmachi. (1998). Ground-Motion Characteristics Estimated from Spectral Ratio between Horizontal and Vertical Components of Microtremor. *Bull. Seism. Soc. Am., Vo. 88, No.1* , 228-241.

Litbang, BMKG. (2010). *Kajian Kerawanan Bahaya Gempabumi di Kabupaten Bantul DIY, Laporan Hasil Penelitian.* Yogyakarta: Litbang BMKG.

Mahajan, & Mundepi. (2012). Active seismic and passive microtremor HVSR for assesing site effects in Jammu City, NW Himalaya India-A Case Study. *Jurnal of Applied Geophysics* , 51-62.

Mulyati, S. (2015). *Kajian Kondisi Fisik Wilayah Rawan Gempabumi untuk Penilaian Kerentanan Fisik Bangunan di Kecamatan Wedi dan Kecamatan Gantiwarno Kabupaten Klaten.* Yogyakarta: Tesis, Universitas Gadjah Mada.

Murtono, A. (2013). *Analisis Mikrotremor dengan Metode HVSR (Nakamura) untuk Mikrozonasi Gempabumi Daerah Candi Plaosan dan Sekitarnya, Kabupaten Klaten, Provinsi Jawa Tengah.* Yogyakarta: Skripsi, Universitas Gadjah Mada.

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* , 25-33.

Nakamura, Y. (2007). Development of vulnerability assesment for ground and structures using microtremor. *System and Data Research Co., Ltd* .

Nakamura, Y. (2008). On The H/V Spectrum. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12-17, 2008.* Beijing, China.

Nogoshi, & Igarashi. (1971). On the Amplitude Characteristic of Microtremor (Part 2) (in Japanese with English abstract). *Journal Seism. Soc. Japan, 24* , 26-40.

Raharjo, d. (1995). *Peta Geologi Kabupaten Klaten Skala 1:100.000.* Yogyakarta.

Ratnasari, D. W. (2017). *Analisis Nilai Indeks Kerentanan Tanah (Kg) dan Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Berdasarkan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) di Desa Gunung Gajah Kecamatan Bayat Kabupaten Klaten.* Yogyakarta: Skripsi, UIN Sunan Kalijaga.

Saita, J., B. M., & N. 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 Erathquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6, 2004* , Paper No.905.

SESAME. (2004). *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibratio Measurement, Processing and Interpretation.* European Commission - Reseacrh General Directorate.

Slob, S. (2007). *Micro Seismic Hazard Analysis, Earthquake Vulnerabilty and Multihazard Risk Assesment.* Geospatial Tools for Rehabilitation and Reconstruction Efforts, ITSC Netherlands.

Sungkowo, A. (2016). *Studi Kerentanan Sesimik dan Karakteristik Dinamik Tanah di Kota Yogyakarta dari Data Mikrotremor*. Yogyakarta: Tesis, Universitas Islam Indonesia.

USGS. (2018). *Search Earthquake Archives*. Dipetik April 5, 2018, dari http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/map

Wibowo, N. B. (2017). Rasio Model Vs30 Berdasarkan Data Mikrotremor dan USGS di Kecamatan Jetis Kabupaten Bantul. *Jurnal Sains Dasar 2017 6 (1)* , 49-56.

Widodo. (2012). *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan.* Yogyakarta: Pustaka Pelajar.

Yulistiani. (2017). *Potensi Likuifaksi berdasarkan Nilai Ground Shear Strain (GSS) di Kecmatan Prambanan dan Kecmatan Gantiwarno Kabupaten Klaten Jawa Tengah.* Yogyakarta: Skripsi, Universitas Negeri Yogyakarta.