

BAB V

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

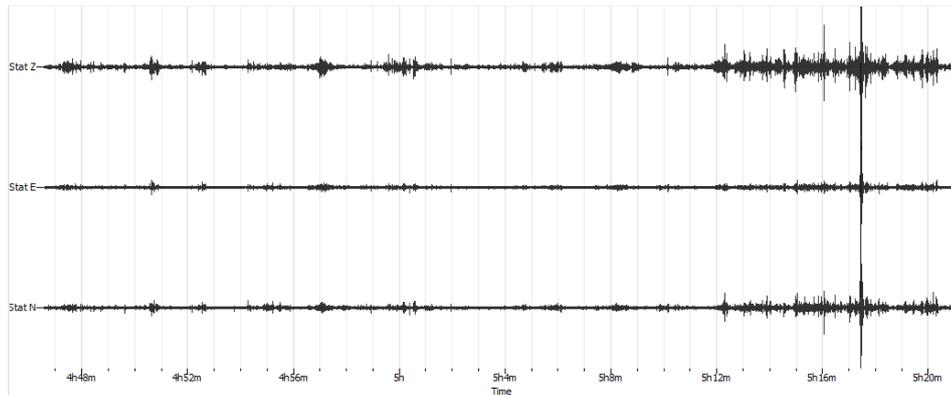
5.1 PENGOLAHAN DATA

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 (f_g) dan faktor amplifikasi spektrum tanah (A_g) yang merupakan nilai puncak kurva HVSR, berkaitan dengan geologi setempat dan parameter fisik bawah permukaan. Perkembangan selanjutnya, metode ini mampu untuk mengestimasi indeks kerentanan tanah (Nakamura, 2007), indeks kerentanan bangunan (Sato et al., 2008; Triwulan et al., 2010) dan interaksi antara tanah dan bangunan (Gallipoli et al., 2004; Triwulan et al., 2010).

Pengukuran mikrotremor di wilayah penelitian dilakukan untuk mendapatkan rekaman mikrotremor yang akan dilakukan pengolahan untuk mendapatkan nilai karakteristik dinamik berupa frekuensi dominan tanah (f_g) dan faktor amplifikasi spektrum tanah (A_g). Pengambilan data mikrotremor ini meliputi 111 titik ukur yang berada di wilayah Kabupaten Klaten bagian selatan yang berbatasan langsung dengan Kabupaten Gunungkidul.

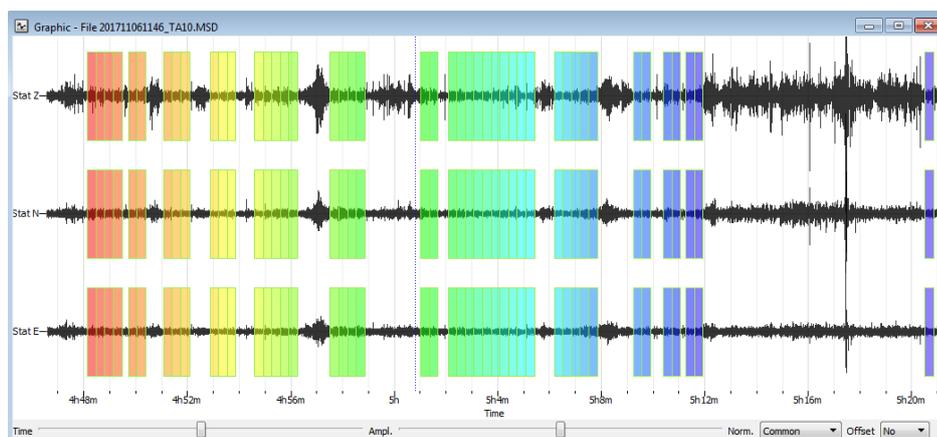
Hasil pengukuran di titik-titik ukur berupa data rekaman mikrotremor dalam interval waktu (durasi) tertentu, dalam pengukuran ini durasi perekaman antara 30 menit. Contoh seismogram mikrotremor hasil rekaman di Kabupaten Klaten seperti di perlihatkan pada **Gambar 5.1**. Komponen Vertikal (*Up-Down*),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

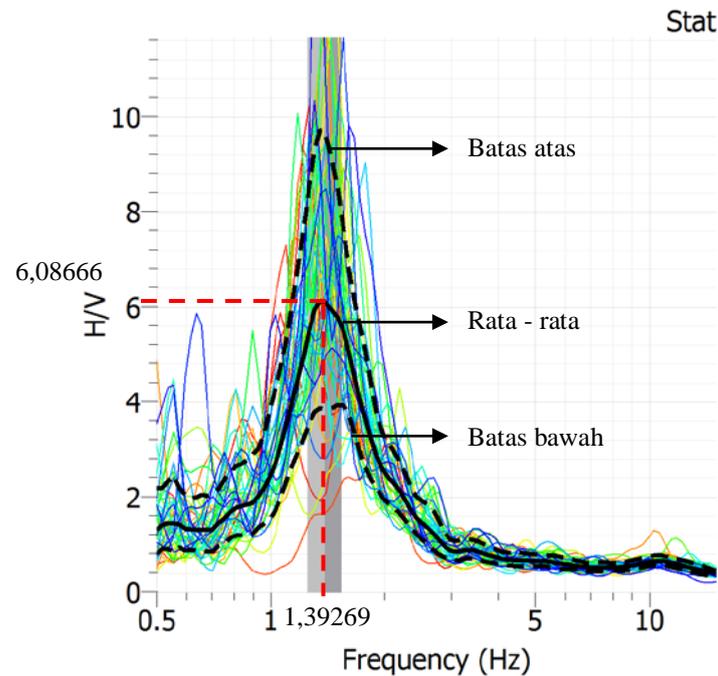
Tahapan selanjutnya adalah melakukan *windowing* pada rekaman mikrotremor, adalah terbaginya *seismogram* mikrotremor menjadi beberapa jendela (*window*) berupa kotak-kotak berwarna, untuk memilih sinyal-sinyal yang bebas dari *noise*. Satu warna mewakili satu *window* dengan lebar kotak dalam satuan 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 menunjukkan kurva rata-rata HVSR, sedangkan garis hitam putus-putus menunjukkan simpangan kurva HVSR. Contoh kurva HVSR hasil pengukuran mikrotremor di Kota Yogyakarta seperti ditunjukkan pada **Gambar 5.3**. Kurva HVSR selengkapnya ada pada Lampiran 1.



Gambar 5.3 Kurva HVSR Titik 10

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

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

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

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

$$\begin{aligned}
 \text{Episenter} &= \sqrt{(X_{\text{data}} - X_{\text{gempa}})^2 + (Y_{\text{data}} - Y_{\text{gempa}})^2} \\
 &= \sqrt{(448380.36 - 440266)^2 + (9139858.277 - 9119864)^2} \\
 &= 21578,09 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Jarak hiposenter (R)

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

Periode dominan (T_g)

$$\begin{aligned} T_g &= \frac{1}{f_g} \\ &= \frac{1}{1,39268} \\ &= 0,71803 \text{ dtk} \end{aligned}$$

PGA Kanai 1966

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

Konversi ke satuan PGA (g)

$$\begin{aligned} \alpha_g &= \text{PGA (gal)} \times 0,0010197 \\ &= 273,5616 \times 0,0010197 = 0,28 \text{ g} \end{aligned}$$

Konversi ke satuan MMI, menurut Wald (1999)

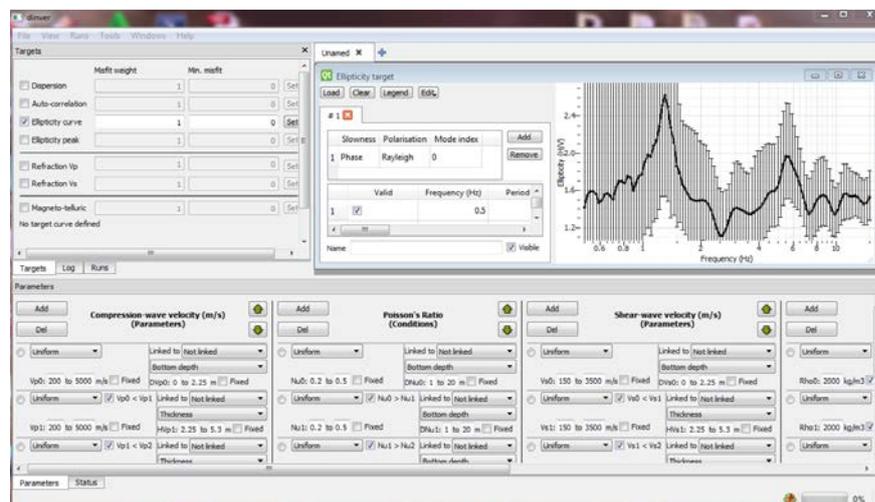
$$\begin{aligned} \alpha_g &= 3,66 \times \log(\text{PGA (gal)}) - 1,66 \\ &= 3,66 \times \log(273,5616) - 1,66 = 7,3 \end{aligned}$$

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

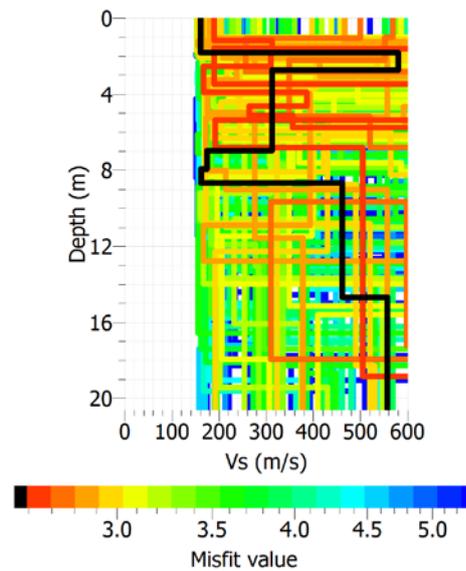
$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{A_g^2 \alpha_g}{\pi^2 f_g C_b} \\ &= \frac{6,0866^2 \times 273,5616}{\pi^2 \times 1,39268 \times 10^5} \\ &= 0,007373 = 7,3 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

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

software Dinver pada *geopsy*. Software ini bekerja dengan melakukan iterasi pada model awal (*inisial model*) untuk dicocokkan dengan kurva HVSR hasil pengukuran sampai didapatkan model akhir (*final model*) yang sedikit 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 penelitian. 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 per lapisan 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 v_s setiap lapisan, ketebalan setiap lapisan, dan nilai v_s rata-rata, seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.2**.

Tabel 5.2 Rekapitulasi Nilai v_s Titik 10

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

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

$$\begin{aligned}
 fg &= \frac{v_s}{4h} \\
 h &= \frac{v_s}{4fg} \\
 &= \frac{290}{4 \times 1,39268} \\
 &= 52,06 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Kemudian dihitung nilai v_s sampai kedalaman 30 m (V_{s30}), dengan Persamaan (3.20).

$$\begin{aligned} V_{s30} &= \frac{h30}{\sum \frac{h_i}{v_{si}}} \\ &= \frac{30}{\frac{1,8}{160} + \frac{1}{540} + \frac{4,2}{280} + \frac{0,6}{160} + \frac{1,4}{150} + \frac{6,6}{450}} \\ &= 537,135 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Untuk memvalidasi nilai V_{s30} mikrotremor, maka akan dibandingkan dengan V_{s30} dari situs USGS di lokasi penelitian yang sama. Selanjutnya akan diketahui rasio perbandingan V_{s30} mikrotremor dengan V_{s30} 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

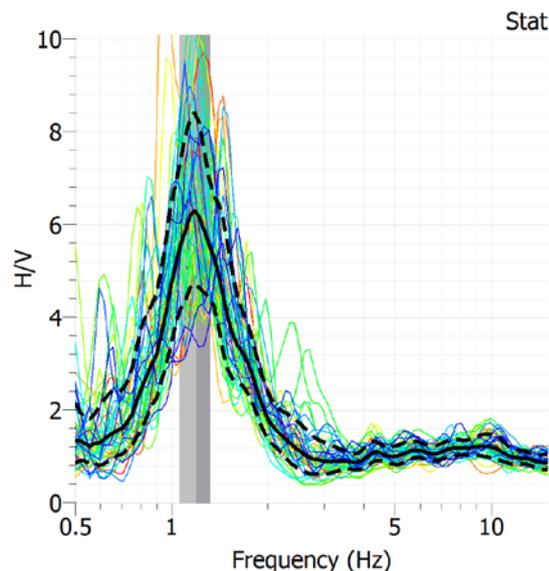
Bentuk kurva dengan puncak yang jelas didapatkan pada kurva HVSR muncul sebagai satu buah puncak tunggal dengan nilai yang signifikan. Puncak seperti ini menunjukkan adanya kontras impedansi pada suatu kedalaman tertentu sehingga gelombang mengalami amplifikasi atau penguatan. Ada syarat yang harus terpenuhi 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 A_0 (SESAME, 2004).

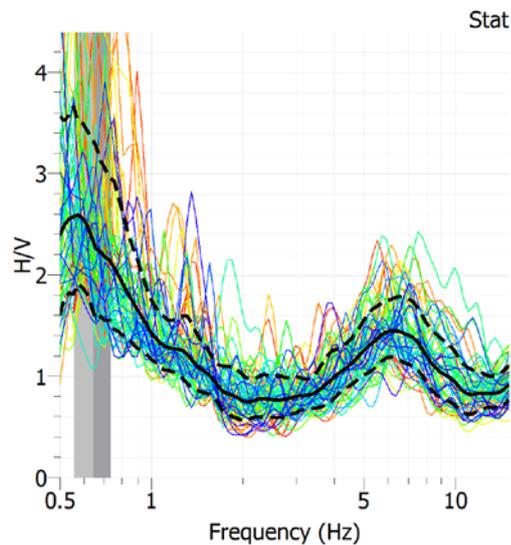
Kurva HVSR dengan satu puncak pada titik ukur mikrotremor dalam penelitian ini salah satunya ditunjukkan pada **Gambar 5.6**. Dari gambar kurva tersebut nilai amplifikasi kurva pada f_0 adalah 1,19266, dan kurva menurun dengan *slope* ke kanan dan kiri yang curam dan signifikan, sehingga didapatkan nilai amplifikasi pada $f_0=3$ jatuh pada nilai amplifikasi disekitar 1,5 yang nilainya kurang dari $A_0/2 = 3,132$.



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

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

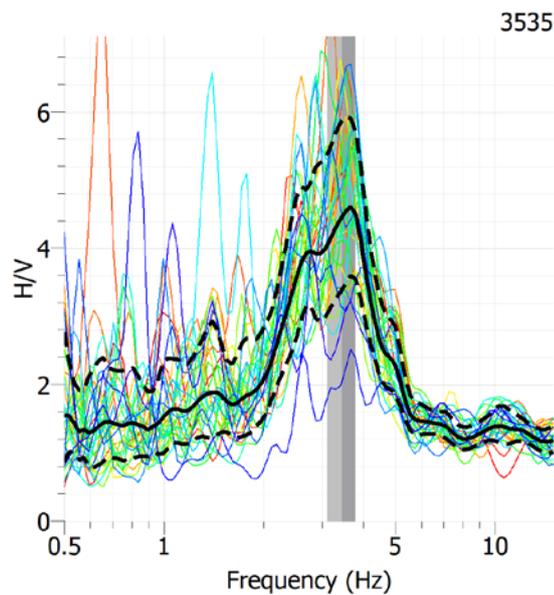
Kurva HVSR yang memiliki dua buah puncak menunjukkan karakteristik tertentu, diasumsikan adanya kontras impedansi pada kedalaman yang berbeda, yaitu kedalaman dangkal dan kedalaman yang lebih dalam. Kurva seperti ini kemungkinan disebabkan oleh keadaan geologi di suatu daerah yang berupa sedimen tidak kompak yang ada di permukaan, kemudian di bawahnya tersusun oleh sedimen yang sudah kompak dan paling bawah tersusun oleh *bedrock* yang sangat kompak, misalnya batuan beku. Bahwa amplifikasi terjadi tidak hanya pada frekuensi rendah tetapi juga dapat terjadi pada frekuensi tinggi. Hal ini dapat terjadi karena faktor geologi maupun non geologi. Kurva dengan puncak ganda seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 5.7**.



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

3. Kurva HVSR dengan puncak lebar

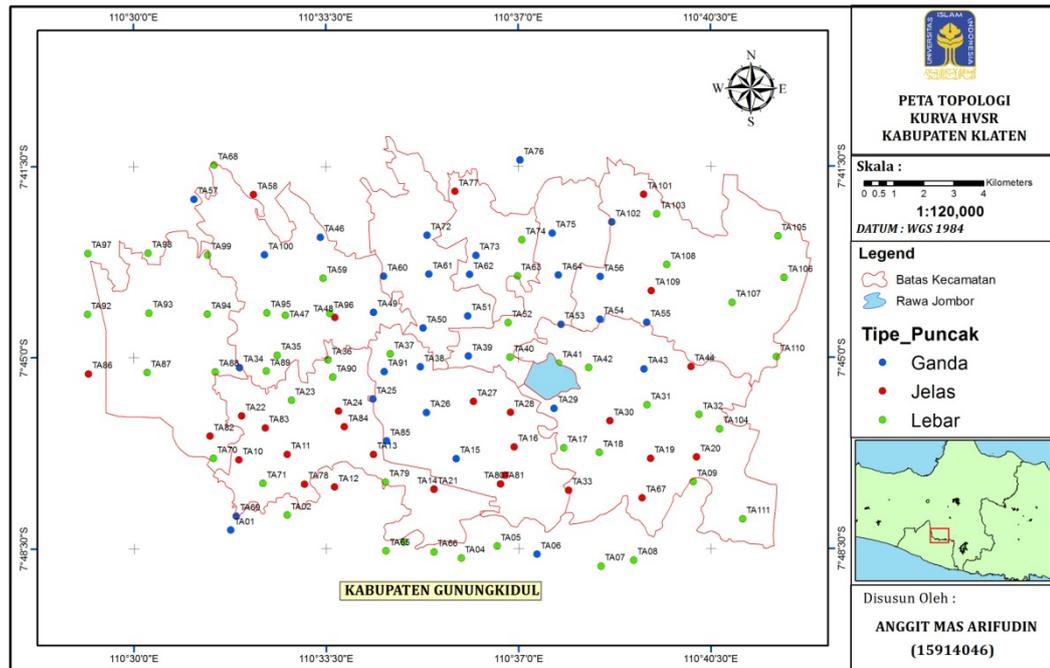
Kurva HVSR yang memiliki puncak yang lebar dimungkinkan berkaitan dengan keadaan geologi lokal atau geometri yang berhubungan dengan cekungan suatu lembah atau *bedrock* yang miring, kemungkinan juga karena adanya variasi struktur sedimen-*bedrock*. Kurva HVSR dengan puncak lebar seperti yang ditunjukkan 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 (v_p), kecepatan gelombang geser (v_s), ketebalan lapisan (h), densitas lapisan (ρ), faktor kuasi gelombang (Q_p dan Q_s).



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

menunjukkan 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.

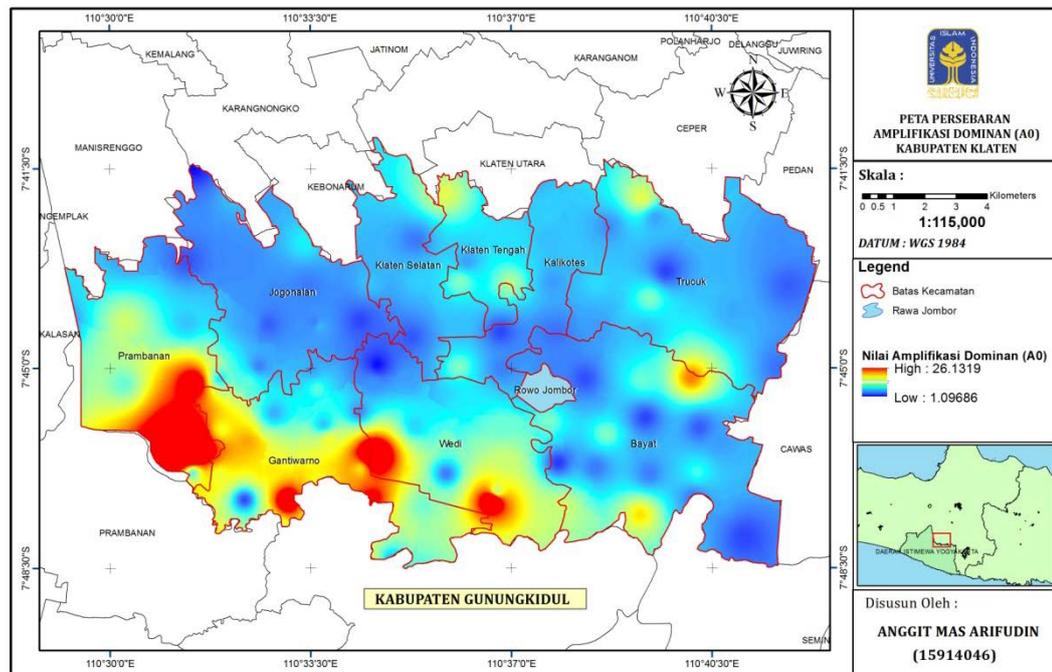
5.1.3 Mikrozonasi Nilai Faktor Amplifikasi Tanah (A_g)

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 amplifikasi tanah yang dihasilkan dari pengukuran mikrotremor terbagi menjadi 4 zona yaitu :

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



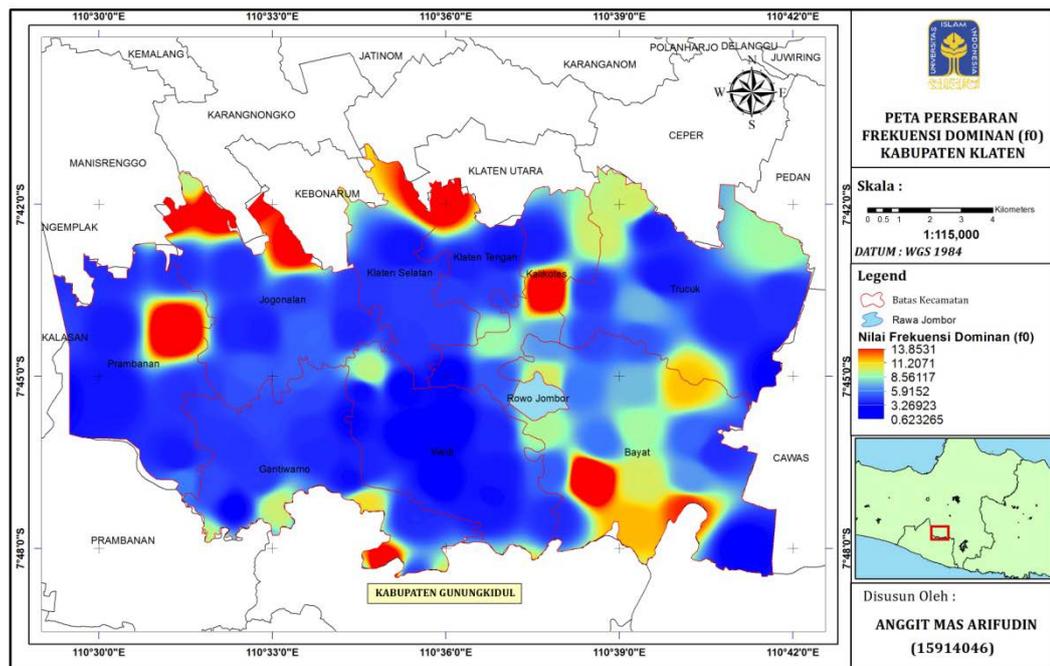
Gambar 5.10 Peta faktor amplifikasi tanah (A_g)

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 (A_g) 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 guncangan 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, ditunjukkan 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.



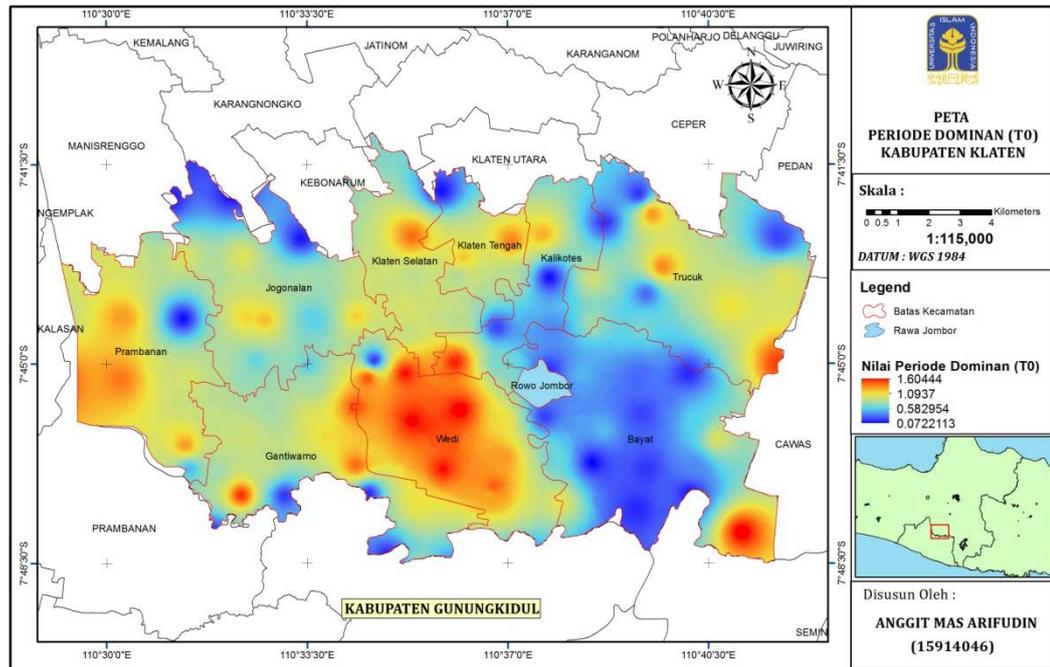
Gambar 5.11 Peta frekuensi dominan tanah (*fg*)

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 (T_g)

Periode gelombang adalah waktu yang dibutuhkan untuk menempuh satu gelombang dalam satuan detik. Periode dominan (T_g) 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, ditunjukkan 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, Kecamatan Gantiwarno, dan Kecamatan Prambanan. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 2.



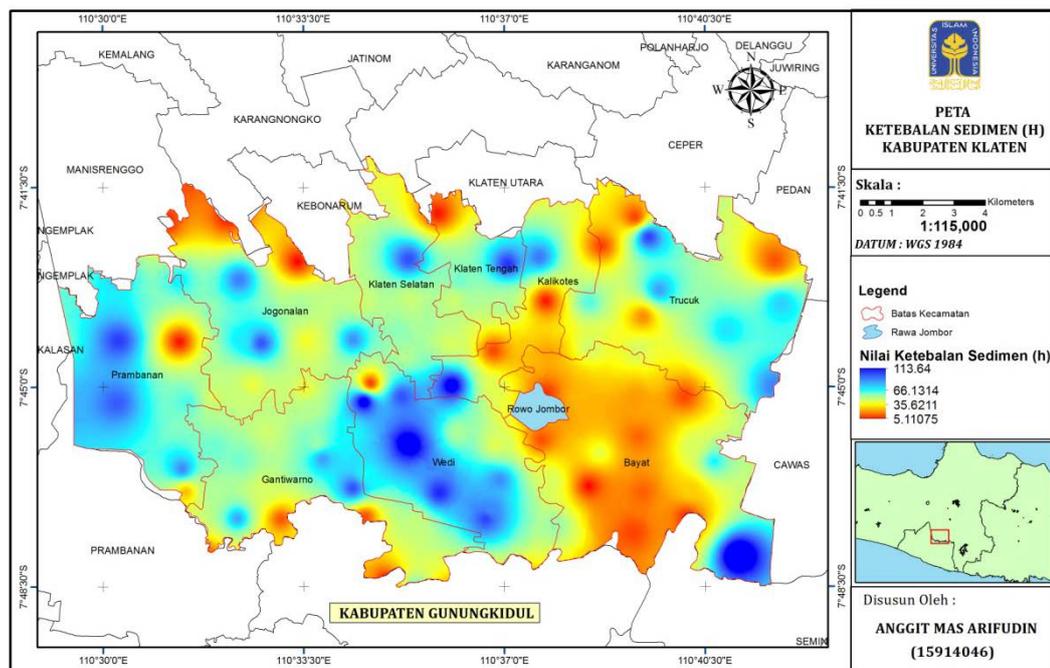
Gambar 5.12 Peta periode dominan tanah (T_g)

Daerah yang mempunyai periode rendah berada di wilayah Kecamatan Bayat, Kecamatan Jogonalan bagian utara, dan Kecamatan Kalikotes bagian utara. Periode dominan yang tinggi menunjukkan jenis lapisan sedimen dengan struktur yang lunak dan tebal. Sebaliknya periode dominan yang rendah menunjukkan 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 perbukitan dan pegunungan daerah Paseban dan makam Sunan Pandanaran. Hasil selengkapnya seperti ditunjukkan Lampiran 3.

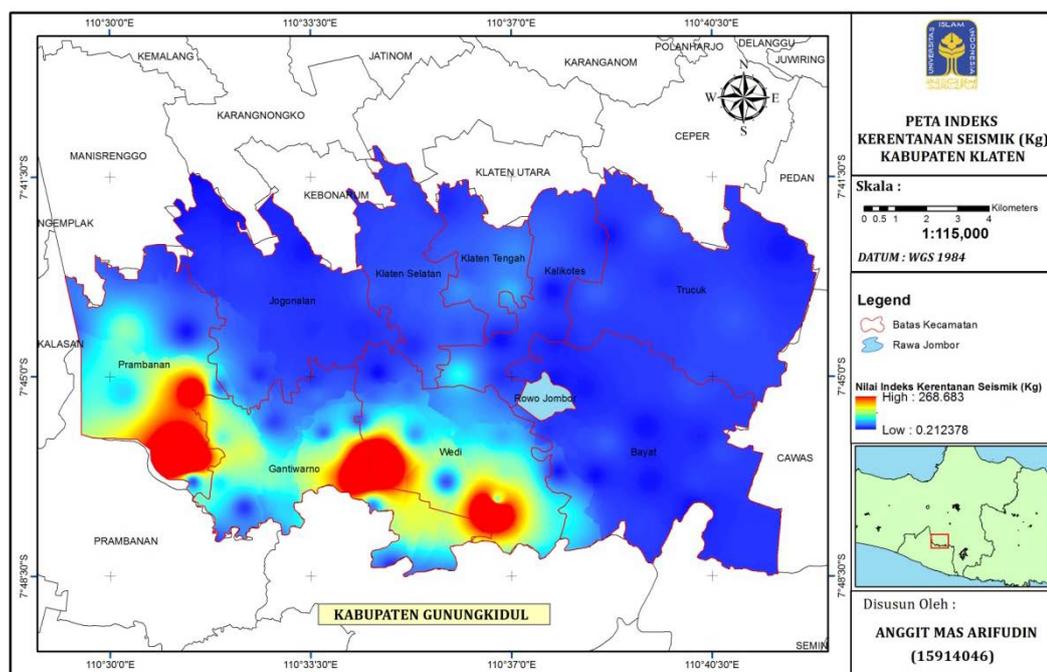


Gambar 5.13 Peta ketebalan sedimen (H)

5.1.7 Mikrozonasi Nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Nilai indeks kerentanan seismik diperoleh dari perhitungan dengan persamaan (3.14). Besarnya nilai indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh nilai faktor amplifikasi tanah dan periode dominan tanah. Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi diperoleh pada daerah dengan nilai amplifikasi tinggi dan nilai f_g rendah. Nilai amplifikasi tinggi berkaitan dengan daerah dengan nilai f_g kecil berkaitan dengan daerah dengan ketebalan besar dengan kekompakan tinggi. Nilai indeks kerentanan seismik rendah diperoleh pada daerah dengan nilai amplifikasi rendah dan nilai frekuensi dominannya tinggi. Daerah tersebut mempunyai kontras impedansi rendah dengan ketebalan lapisan sedimennya tipis, daerah ini umumnya berada di daerah perbukitan. Untuk wilayah Kabupaten Klaten terdapat perbukitan 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, ditunjukkan 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)

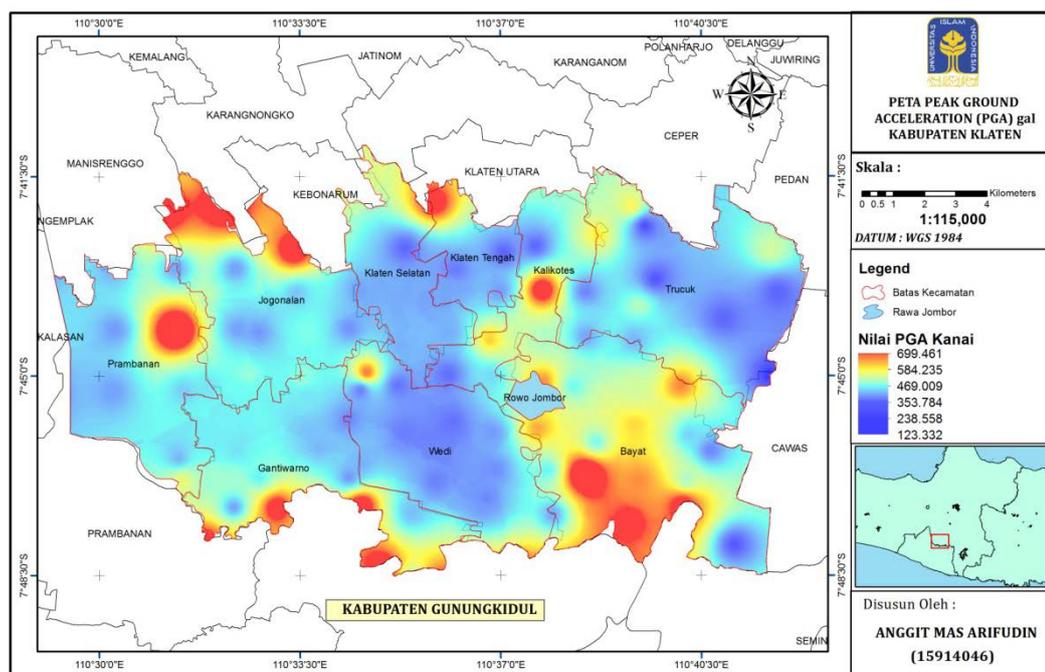
Persamaan atenuasi Kanai (1966) seperti tersebut dalam persamaan (3.15), atenuasi ini menunjukkan nilai percepatan puncak tanah (PGA) berkaitan dengan kondisi tanah setempat, dalam hal ini periode dominan tanah disamping besar magnitudo dan jarak sumber gempa.

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.

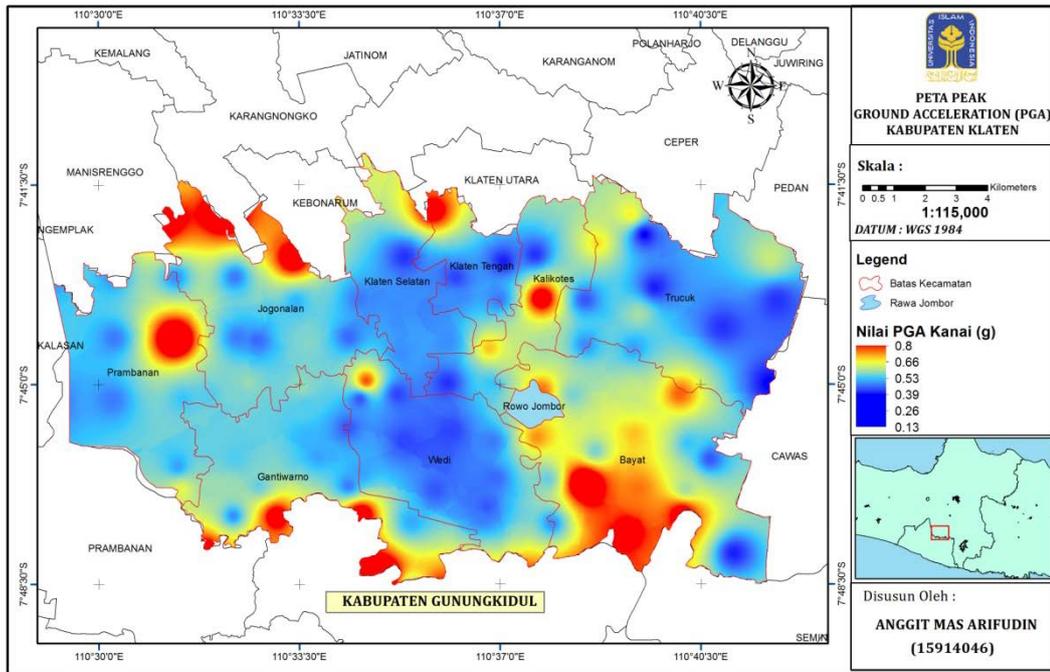
Hasil perhitungan PGA (*peak ground acceleration*) dengan rumusan atenuasi Kanai dengan parameter gempa bumi Bantul 27 Mei 2006 (Mw 6,3), di wilayah Kota Yogyakarta mengalami PGA dipermukaan berkisar antara 123,324 gal sampai dengan 819,353 gal. Nilai PGA terbesar selain ditentukan oleh jarak dan magnitudo 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, Semangkok, 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 Kecamatan Prambanan bagian selatan. Peta persebaran PGA Kanai di tunjukkan pada **Gambar 5.15** dan **Gambar 5.16**.

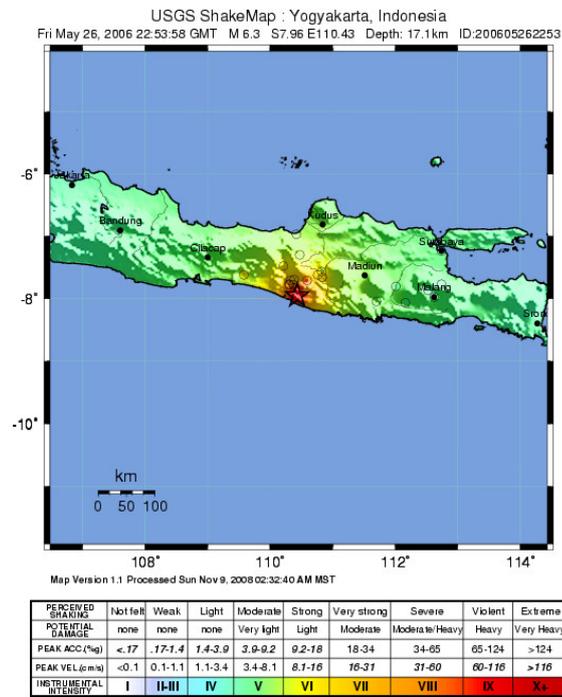
Jika dibandingkan dengan sebaran peta *shakemap* yang dihasilkan USGS terdapat perbedaan nilai dari keduanya. PGA Kanai memperhitungkan pengaruh dari kondisi site yang di cerminkan dari nilai periode dominan tanah setempat. Peta *shakemap* USGS pada saat gempa 26 mei 2006, pada **Gambar 5.17**. Estimasi 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

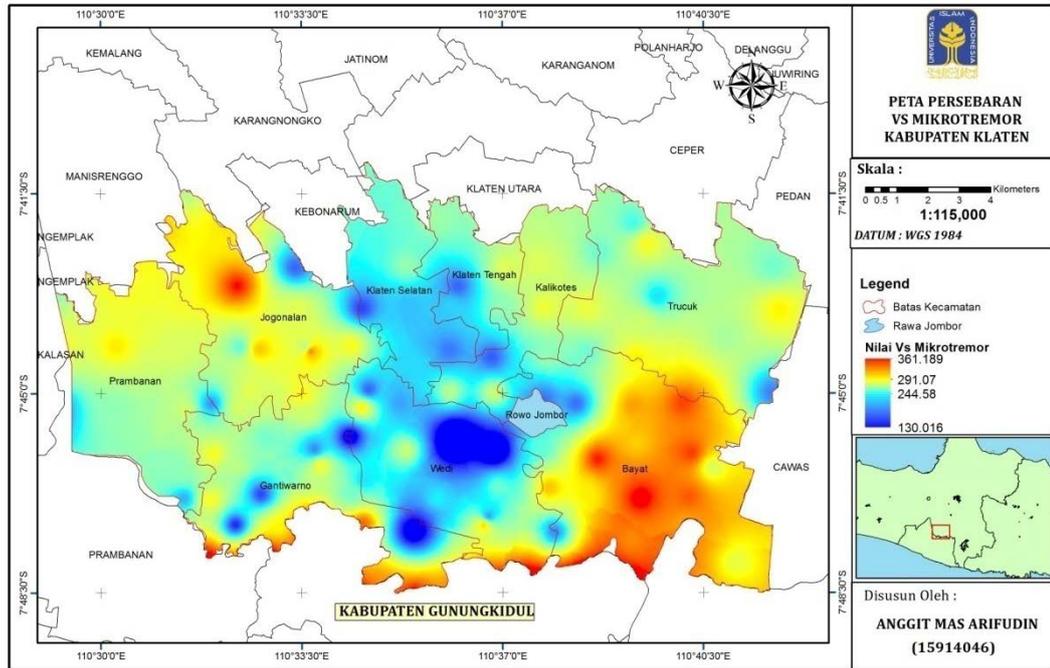
Selain parameter dinamik tanah tersebut di atas beberapa parameter dinamik tanah lainnya yang dilakukan penelitian di daerah Kabupaten Klaten. Parameter dinamik tanah yang dianalisis meliputi kecepatan gelombang geser (v_s), dan regangan geser tanah (γ).

5.3.1 Kecepatan Gelombang Sekunder (v_s) Inversi Kurva HVSR Mikrotremor

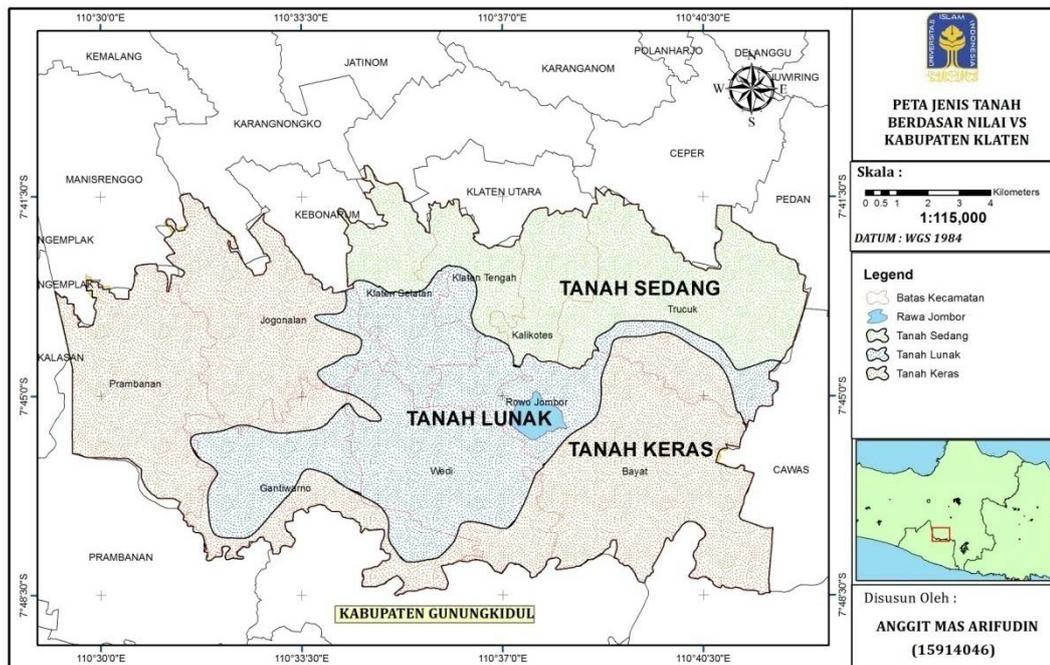
Kecepatan gelombang geser pada umumnya ditentukan dengan melakukan survei lapangan. Beberapa teknik yang digunakan antara lain dengan teknik *borehole*, semisal *crosshole*, *downhole*, dan *suspension logger survey*. Metode-metode tersebut bersifat aktif *invasif* dan biaya mahal. Kemudian berkembang metode estimasi v_s menggunakan mikrotremor. Metode ini relatif murah dan bersifat pasif dan *uninvasif*. Pada penelitian ini metode estimasi Kecepatan gelombang geser (v_s) menggunakan mikrotremor diperoleh dari analisis kurva H/V menggunakan metode *ellipticity curve* dengan *software 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 (Vs_{30}) rata-rata hasil inversi kurva HVSR ditunjukkan 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 Vs_{30} berkisar antara 199,256 m/s sampai dengan 997,693 m/s. Daerah dengan Vs_{30} relatif tinggi berada di bagian selatan

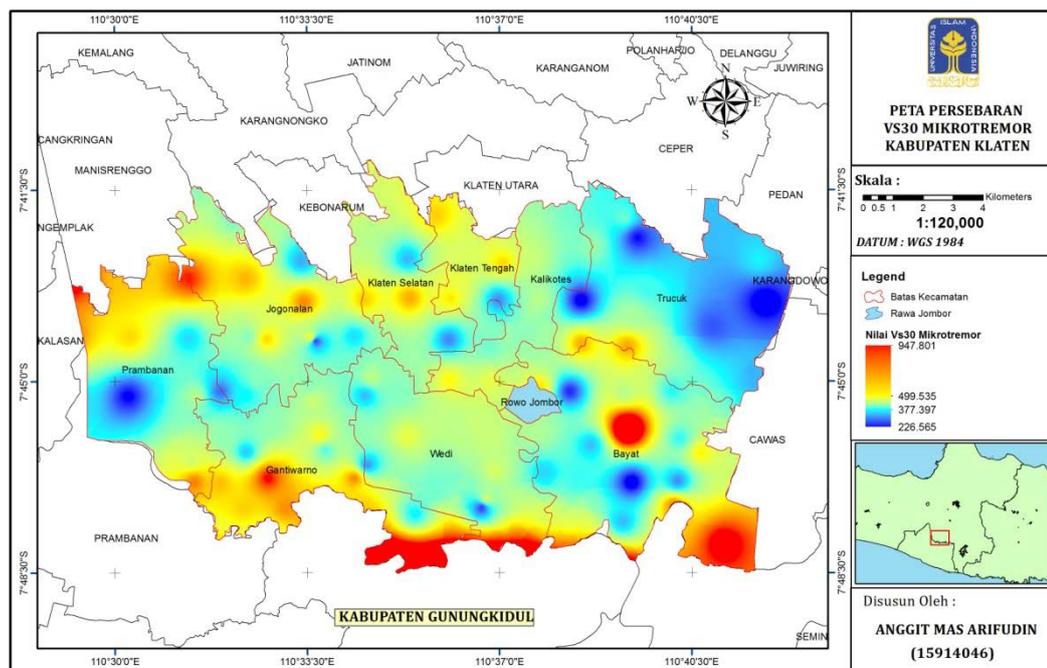
Kecamatan Gantiwarno, Kecamatan Wedi, dan Kecamatan Bayat yang berbatasan langsung dengan perbukitan Gunung Kidul. Wilayah dengan Vs30 bernilai relatif rendah berada di wilayah Kecamatan Prambanan, Kecamatan Wedi bagian utara, Kecamatan Trucuk, Kecamatan Jogonalan, Kecamatan Klaten Selatan, Kecamatan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



Gambar 5.18 Peta distribusi Nilai Vs Mikrotremor



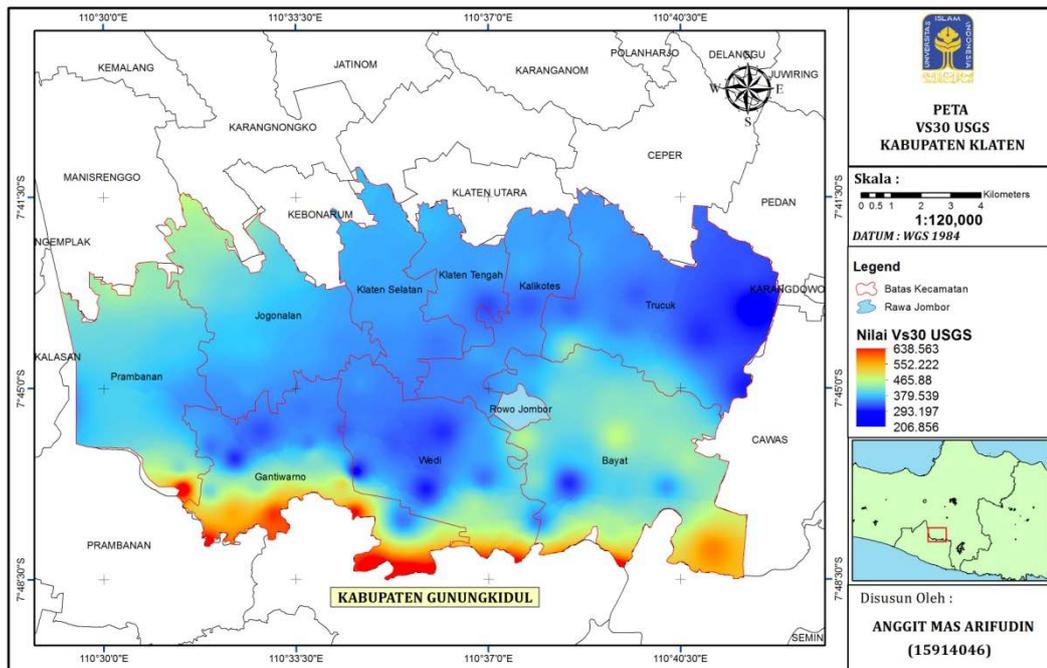
Gambar 5.19 Peta Jenis Tanah berdasarkan Nilai Vs



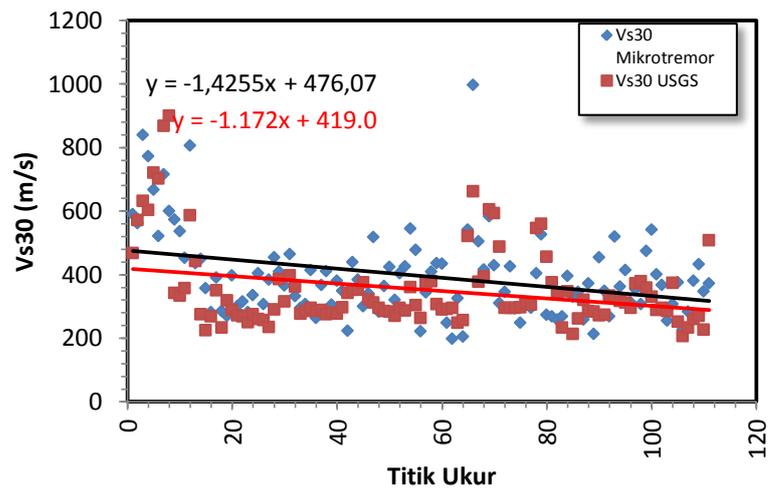
Gambar 5.20 Peta distribusi Nilai Vs30 Mikrotremor

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 membagi 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

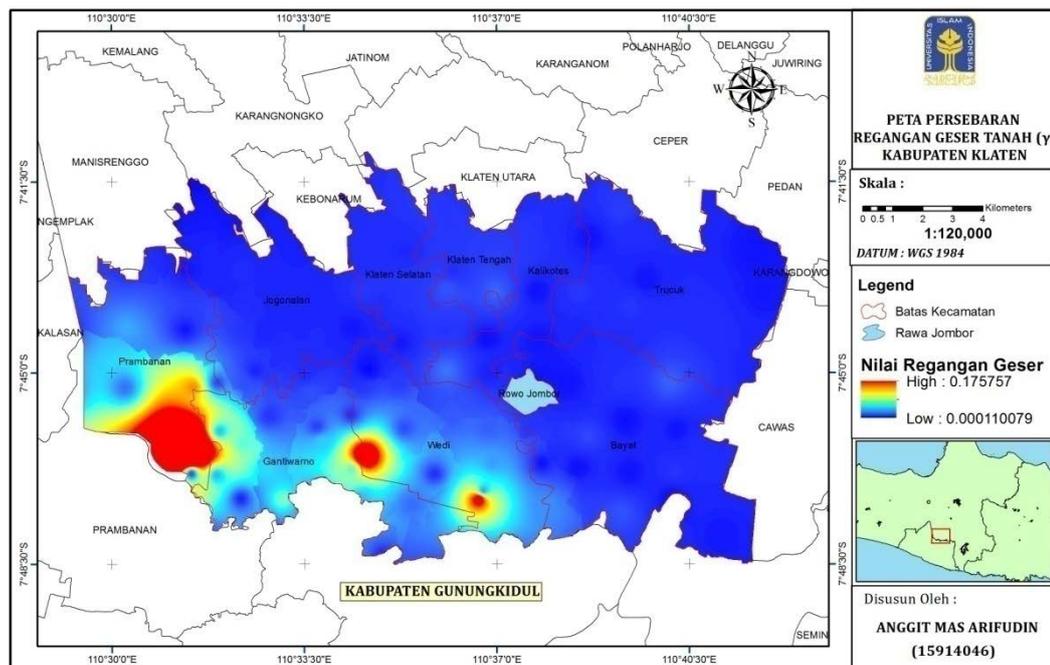


Gambar 5.22 Perbandingan Secara Visual Hasil Vs30 Mikrotremor dengan Vs30 USGS

5.3.3 Regangan Geser Tanah (γ)

Nilai regangan geser yang terukur di wilayah penelitian menunjukkan besarnya tingkat regangan pada material penyusun saat terjadi gempa bumi. Nakamura *et.al* (2000) menghitung besarnya regangan geser di suatu tempat dengan cara melakukan perkalian antara indeks kerentanan seismik (K_g) berdasarkan mikrotremor dengan besarnya PGA di batuan dasar. Beberapa penelitian mengenai regangan geser tanah (*ground shear strain*) yang tinggi berkorelasi dengan kerusakan akibat gempa bumi. Nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan nilai PGA memberikan sumbangan terbesar terhadap nilai regangan tanah di suatu tempat.

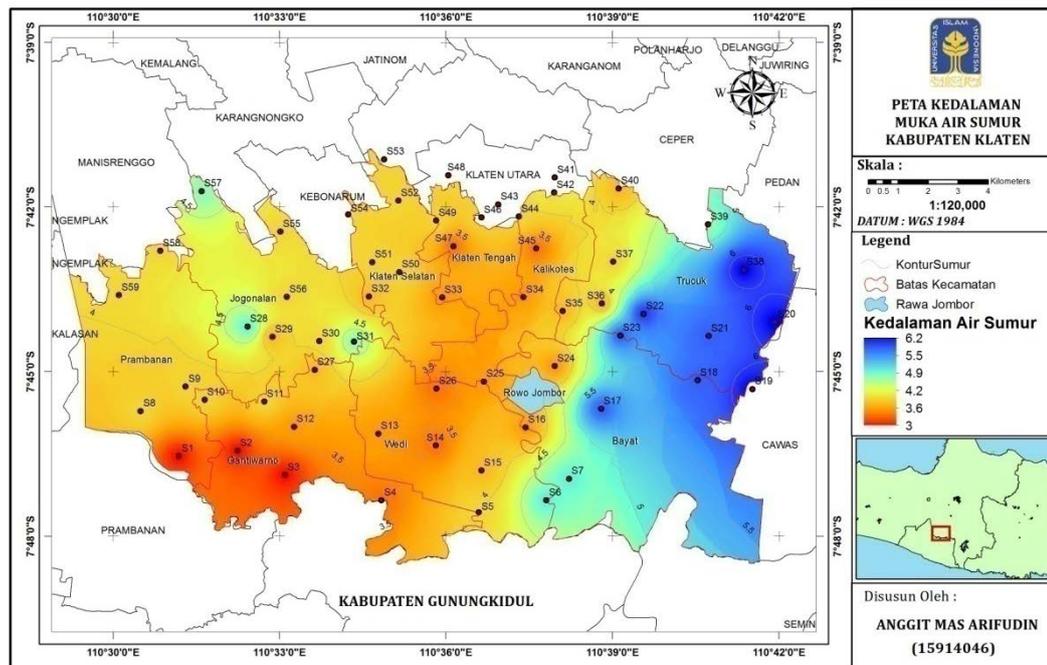
Pada penelitian ini menggunakan atenuasi Kanai 1966 untuk menentukan nilai PGA. Nilai regangan geser yang diperoleh dalam penelitian ini di sajikan peta distribusi regangan geser tanah **Gambar 5.23**. Nilai regangan geser tanah permukaan akibat gempa 27 Mei 2006 di wilayah Kabupaten Klaten bernilai 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 K_g , PGA Kanai, regangan geser tanah dan V_{s30} . Hasil pengukuran tersebut diklasifikasi dengan cara membagi menjadi tiga klasifikasi level nilai hasil ukur yaitu level 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

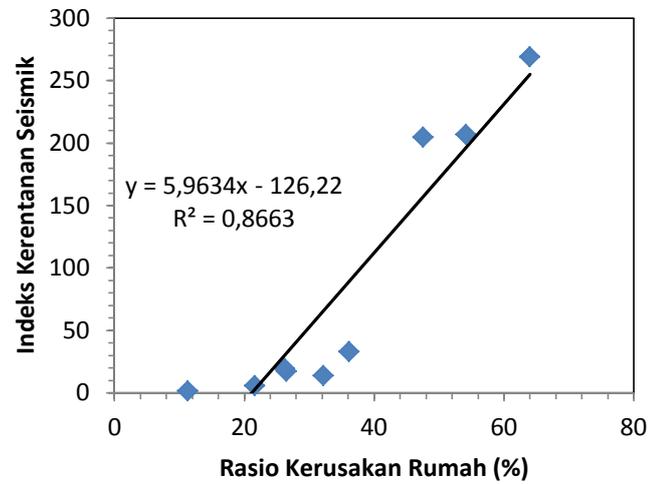
No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	199.256 - 465.4014	rendah	3
2	465.4014 - 731.5468	menengah	2
3	731.5468 - 997.693	tinggi	1

Tabel 5.8 Klasifikasi kedalaman air sumur

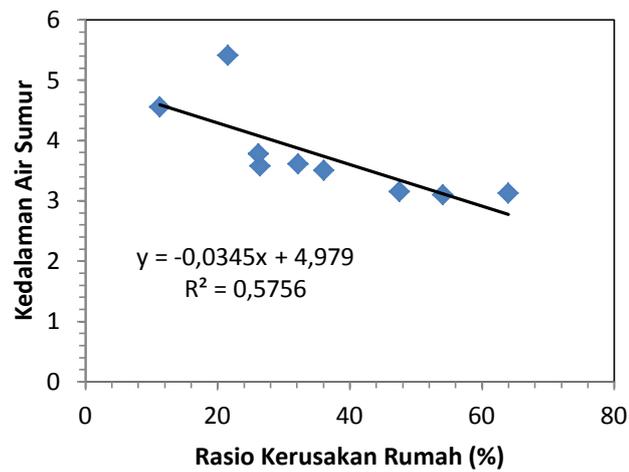
No	Rentang	Klasifikasi Level	Skor
1	3 - 4,06667	rendah	3
2	4,06667 - 5,13333	menengah	2
3	5,13333 - 6,2	tinggi	1

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 =

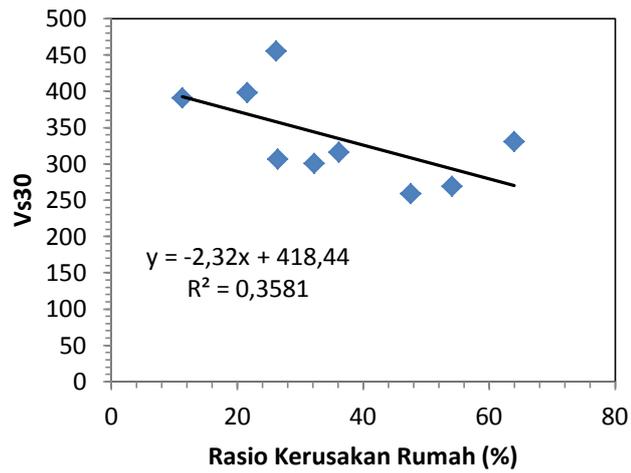
10 %, $K_g = 35$ %, Regangan geser = 10 %, dan kedalaman muka air sumur = 20 %. Dapat dilihat pada **Tabel 5.9**.



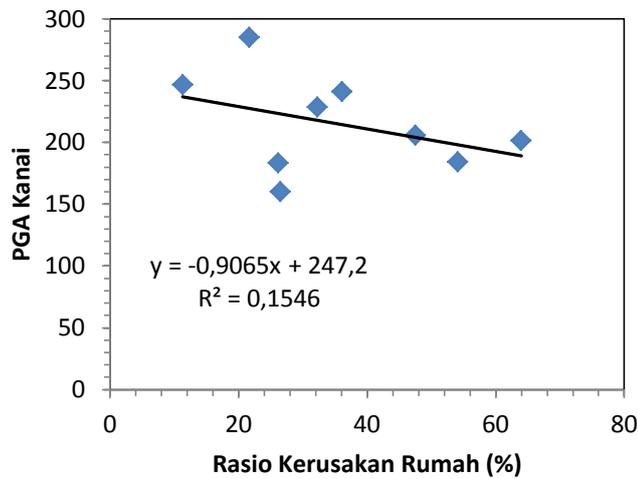
Gambar 5.25 Grafik Hubungan K_g dengan Rasio Kerusakan Rumah



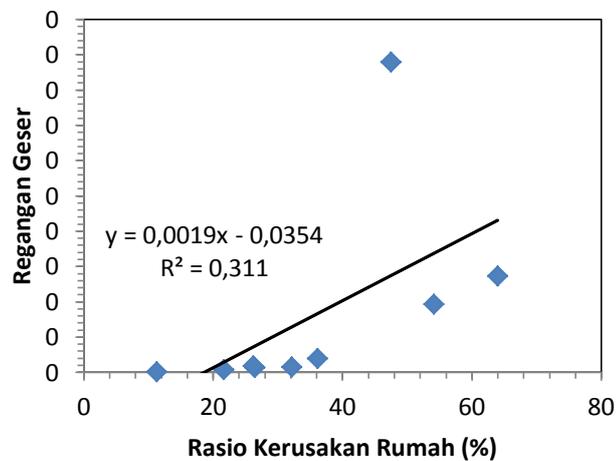
Gambar 5.26 Grafik Hubungan Kedalaman Muka Air Sumur dengan Rasio Kerusakan Rumah



Gambar 5.27 Grafik Hubungan Vs30 dengan Rasio Kerusakan Rumah



Gambar 5.28 Grafik Hubungan PGA Kanai dengan Rasio Kerusakan Rumah



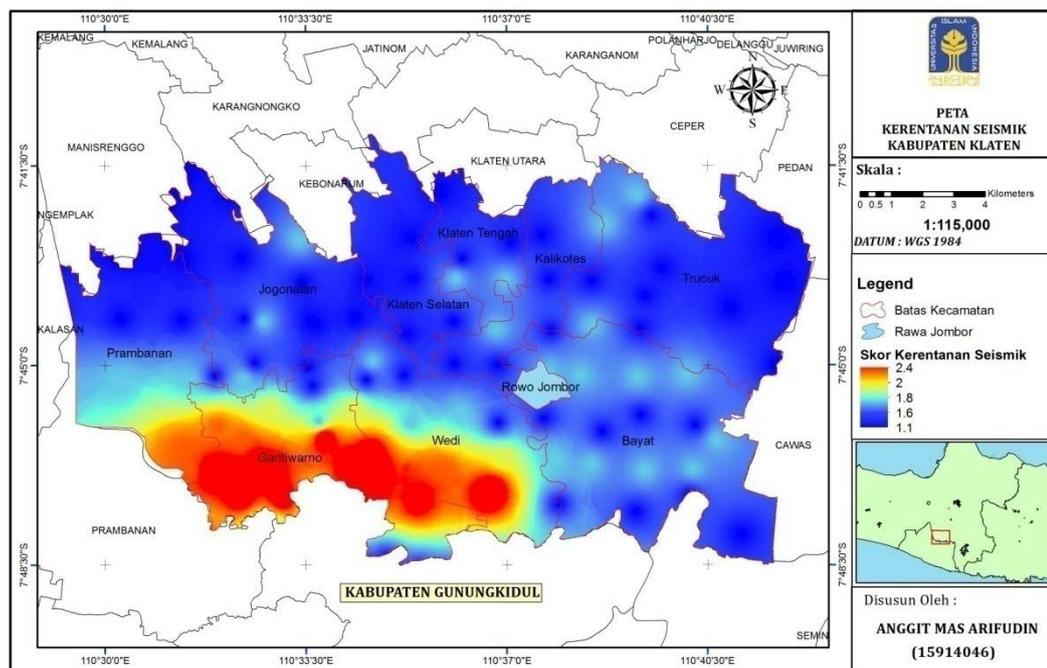
Gambar 5.29 Grafik Hubungan Regangan Geser dengan Rasio Kerusakan Rumah

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 R²		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 guncangan 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 (K_g), REGANGAN GESER (γ), DAN PERCEPATAN TANAH (α)

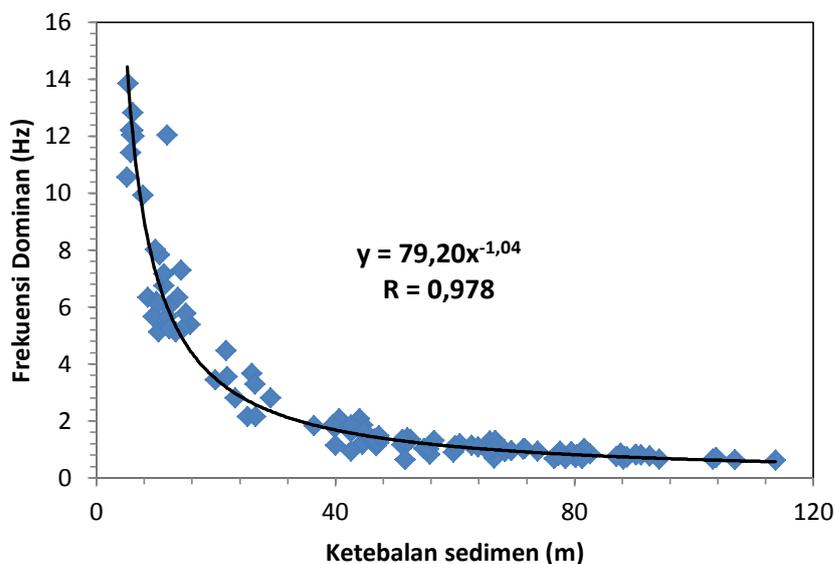
Indeks kerentanan seismik, regangan geser dan percepatan tanah menurut Nakamura seperti dirumuskan dalam persamaan (3.6), terlihat bahwa besarnya regangan geser tanah dipengaruhi oleh besarnya nilai indeks kerentanan seismik dan besarnya PGA di batuan dasar dititik tertentu. Regangan geser berbanding lurus dengan nilai indeks kerentanan seismik dan nilai PGA di batuan dasar. Semakin besar nilai K_g 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 mempunyai material penyusun relatif lebih tidak kompak dari bagian yang lain, ditunjukkan nilai regangan gesernya yg lebih besar sehingga relatif lebih rawan.

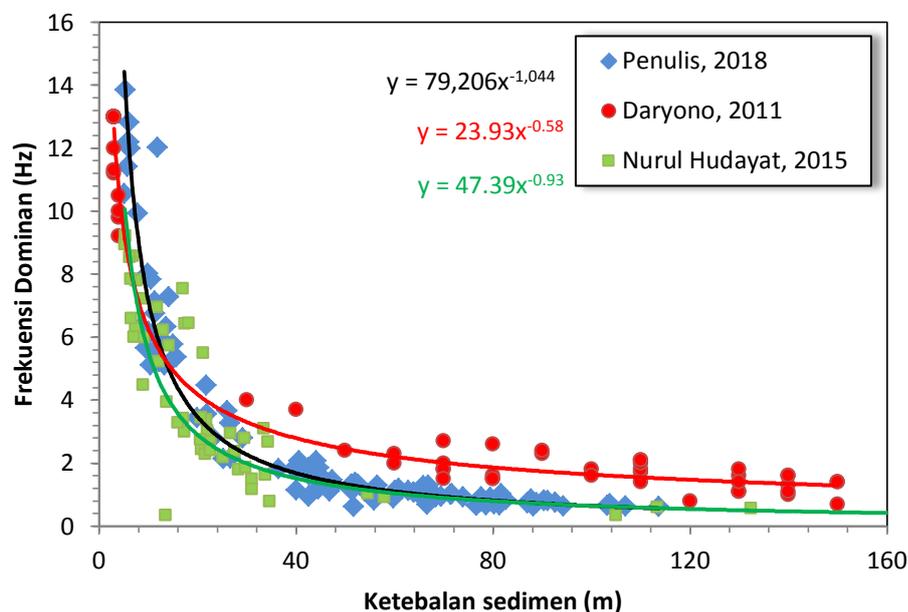
5.7 HUBUNGAN FREKUENSI DOMINAN (f_g), DAN KETEBALAN SEDIMEN TANAH (h)

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 Hidayat, 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 Hidayat (2015), dan penulis

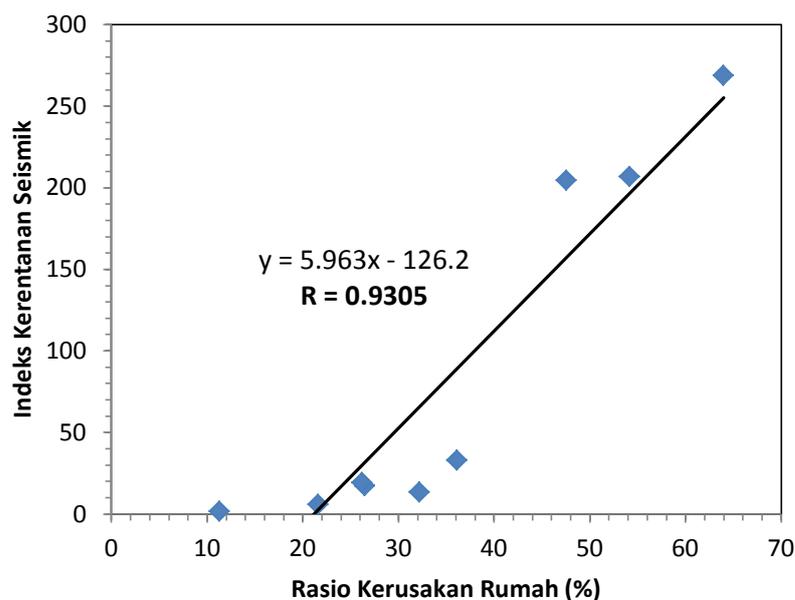
5.8 HUBUNGAN INDEKS KERENTANAN SEISMIK DENGAN RASIO KERUSAKAN RUMAH

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

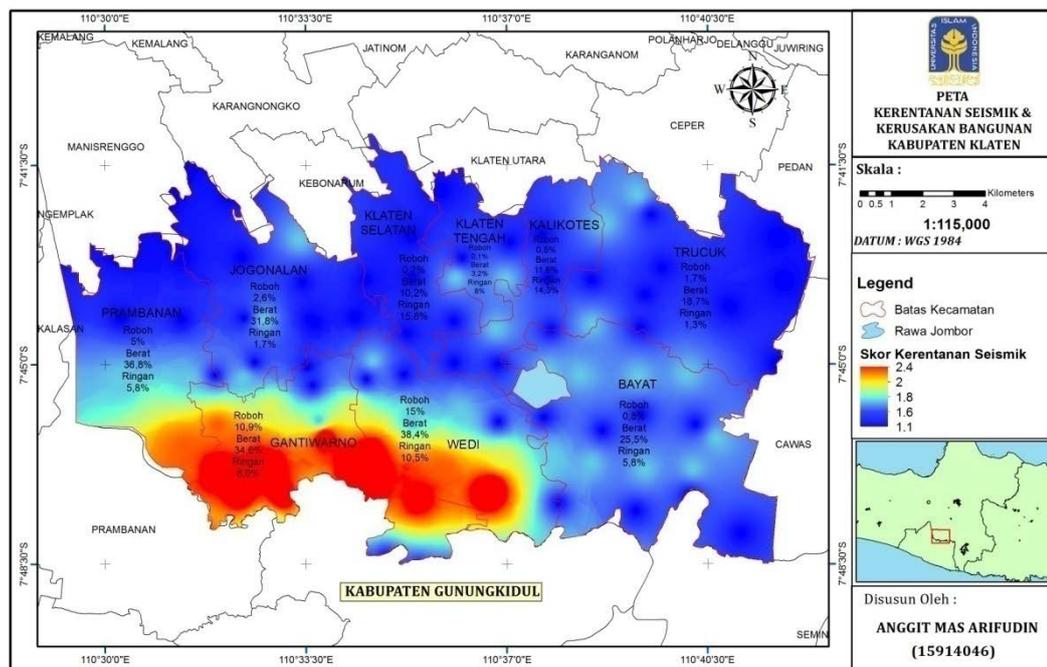
Persebaran tingkat kerusakan akibat gempa bumi 27 Mei 2006 wilayah bagian selatan Kabupaten Klaten berkorelasi dengan tingkat kerentanan seismik hasil penelitian, dimana bagian selatan relatif lebih rentan berkesesuaian dengan kerusakan bangunannya lebih parah. Seperti ditunjukkan pada **Tabel 5.10**.

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%).

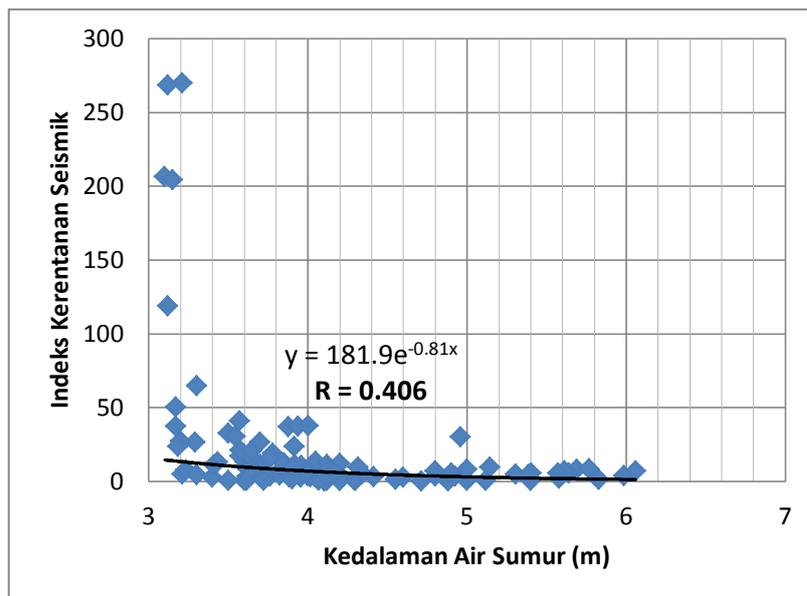
Hubungan antara rasio kerusakan rumah dalam persen dengan tingkat kerentanan seismik dapat dilihat pada **Gambar 5.35**.



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 memiliki 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 Linear 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 (Kementerian PU, 2017) dengan probabilitas terlampaui 10% dalam 50 tahun. Hasil penskalaan ini digunakan dalam perhitungan.

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

5.11.1 Analisis *Spectral Matching* untuk daerah Kabupaten Klaten

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

$$\ln Y = b_1 + b_2 (M - 6) + b_3 (M - 6)^2 + b_5 \ln R + b_v \ln \frac{v_s}{v_a} \quad (5.1)$$

Notasi dalam persamaan ini adalah :

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

$$B_1 = r_{b1ss} \text{ untuk strike slip}$$

$$= r_{b1RS} \text{ untuk reverse slip}$$

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

$$M = \text{Momen magnitude (Mw)}$$

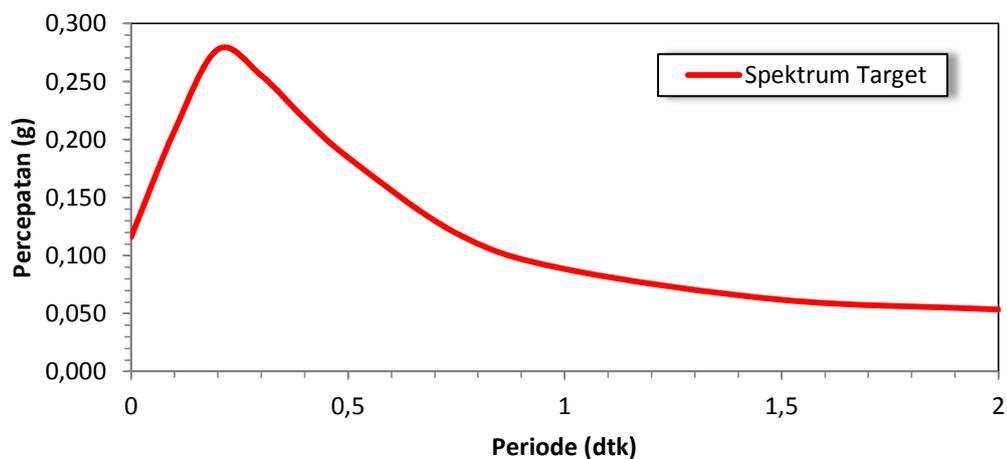
$$r_{jb} = \text{jarak terdekat dengan bidang patahan (km)}$$

$$v_s = \text{kecepatan gelombang geser (m/s)}$$

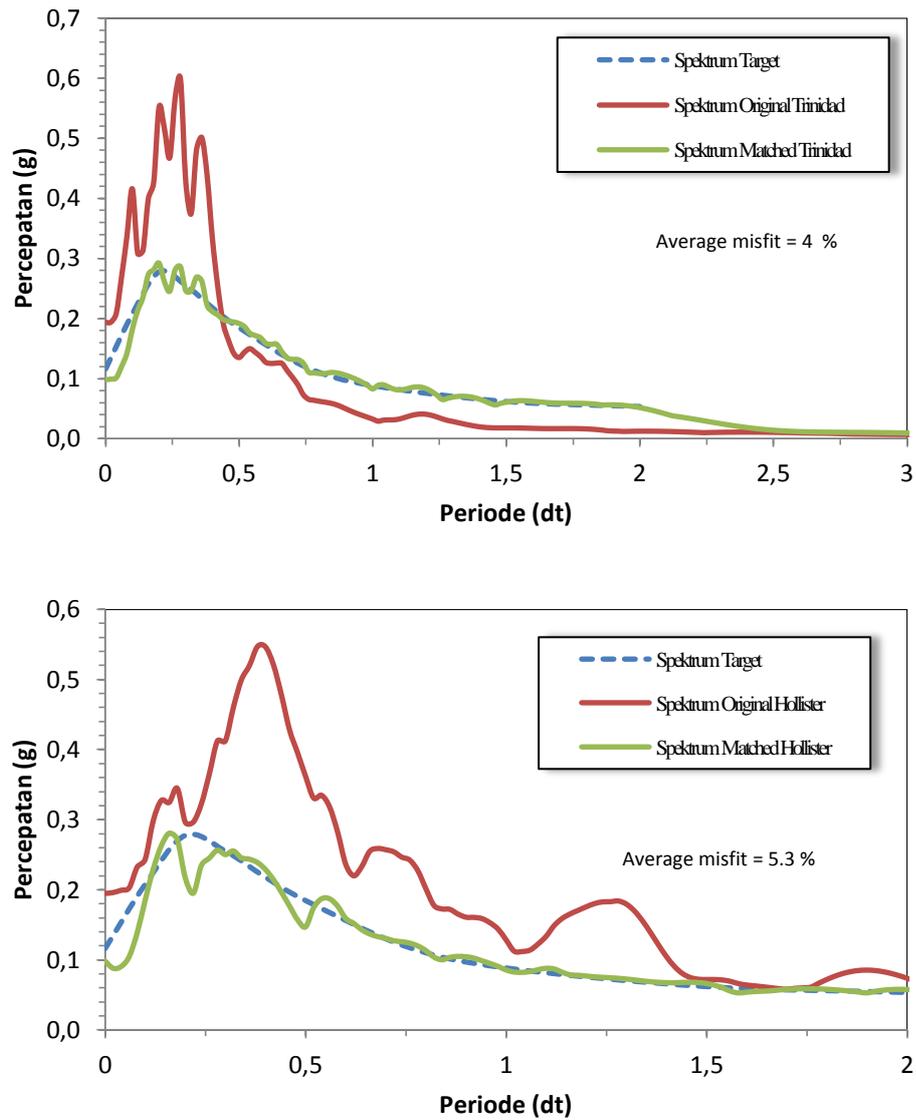
$$Y = \text{nilai PGA dalam g}$$

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

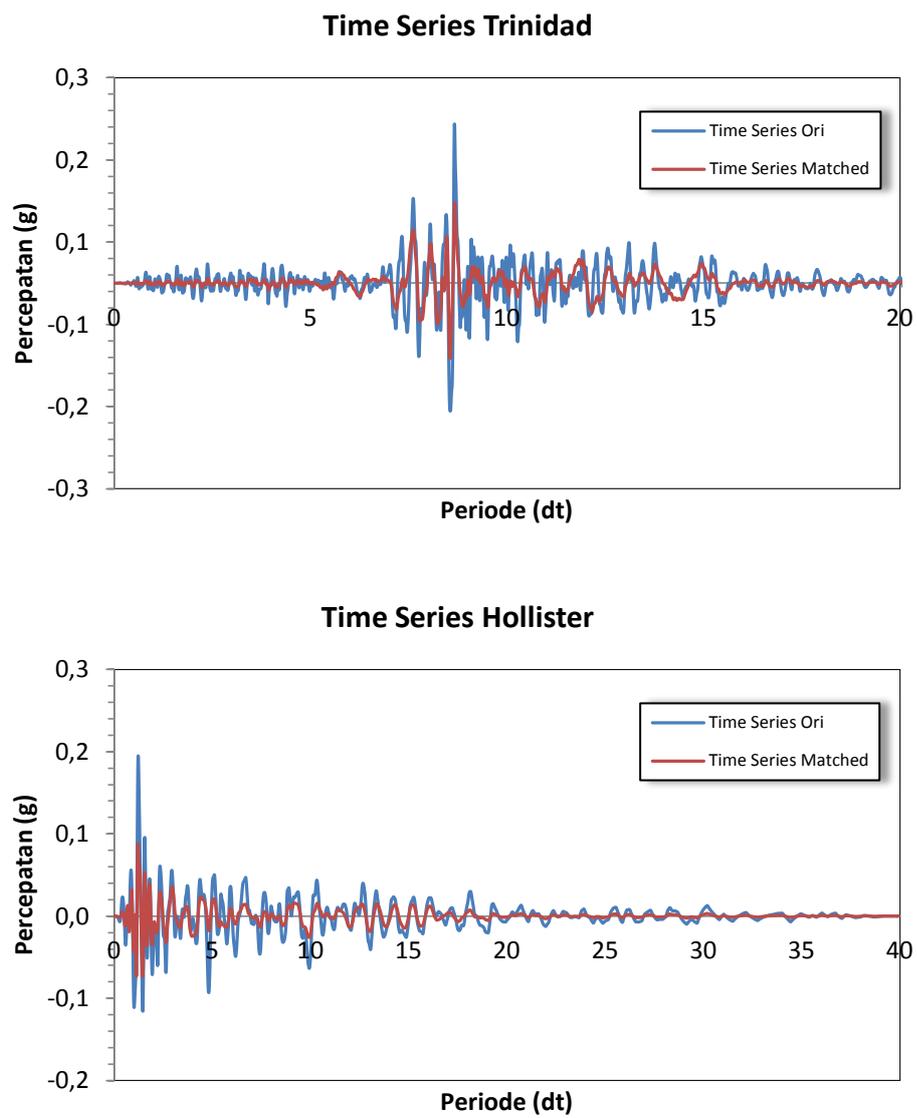
Periode (s)	b1ss	b2	b3	b5	bv	va	h	Percepatan (g)
0	-0,313	0,527	0	-0,778	-0,371	1396	5,57	0,116
0,1	1,006	0,753	-0,226	-0,934	-0,212	1112	6,27	0,208
0,2	0,999	0,711	-0,207	-0,924	-0,292	2118	7,02	0,278
0,3	0,598	0,711	-0,161	-0,893	-0,401	2133	5,94	0,255
0,4	0,212	0,769	-0,12	-0,867	-0,487	1954	4,91	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 transformasi fourier menjadi *time history* percepatan yang hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 5.40**. *Time history* inilah yang digunakan sebagai input program NERA untuk menghitung percepatan gerakan tanah maksimum dan regangan geser maksimum per lapisan 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 ditunjukkan pada **Tabel 5.12**. Hasil perhitungan PGA pada titik bor ini menggunakan tiga *ground motion* ditunjukkan dalam **Tabel 5.13**. Hasil perhitungan regangan geser tanah menggunakan tiga *ground motion* ditunjukkan dalam **Tabel 5.14**. Sedangkan profil PGA tiap lapisan ditunjukkan **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/m ³)	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

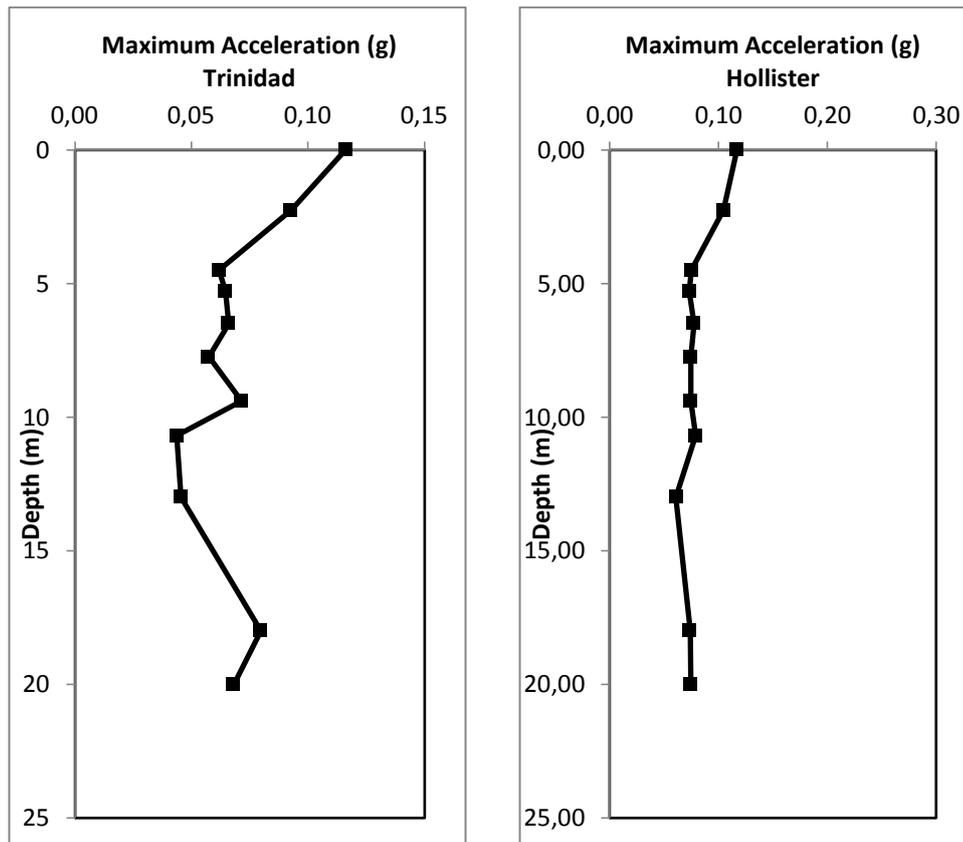
Hasil perhitungan menunjukkan nilai rata-rata PGA di titik Gereja Wedi tertinggi sebesar 0.117 g dengan sumber gempa Hollister. Titik uji ini belum dapat mewakili kondisi kegempaan di Kabupaten Klaten secara keseluruhan. Karena hanya satu titik uji yang diambil maka masih sedikit apabila dibandingkan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

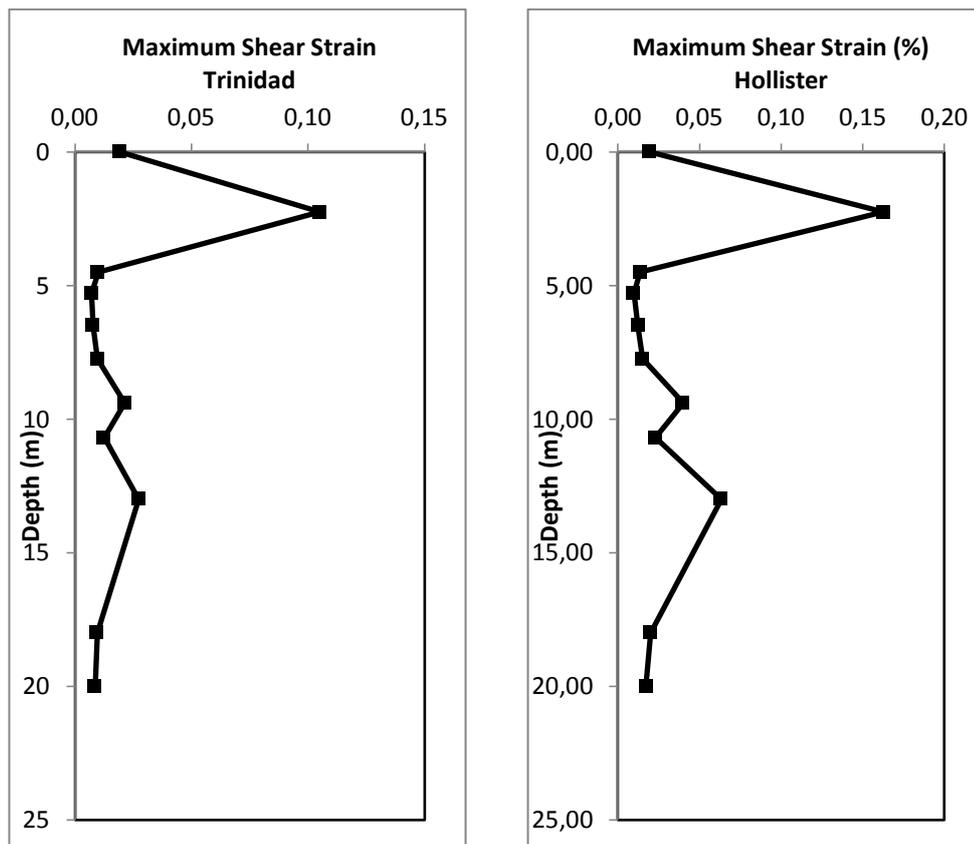
Titik uji Malangan menghasilkan nilai *ground shear strain* tertinggi sebesar 0.1628% dengan *source ground motion* Hollister. Perhitungan dengan metode Nakamura terdapat perbedaan namun tidak terlalu besar. Hal ini di mungkinkan karena penggunaan PGA pada perhitungan Nakamura yang menyebabkan hasil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



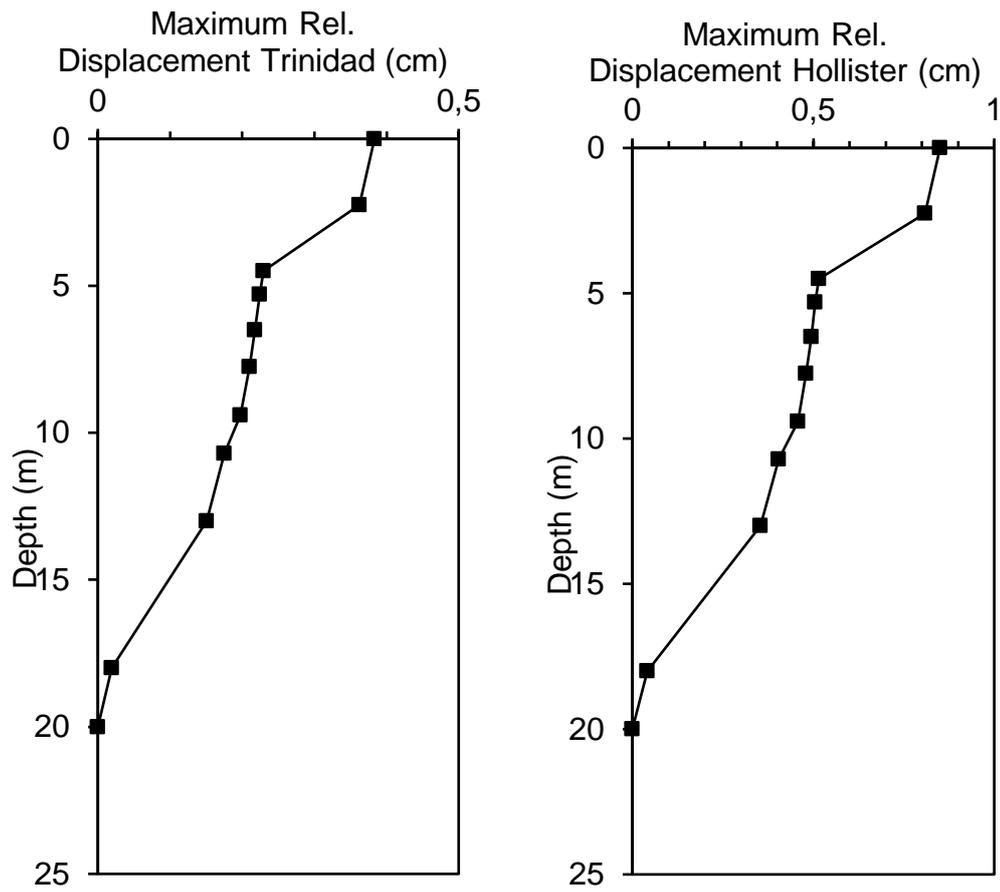
Gambar 5.41 Grafik *Maximum Acceleration* di titik Bor Gereja Wedi, Klaten

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 memiliki amplitudo yang besar di awal kejadian dan kemudian mengecil.



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

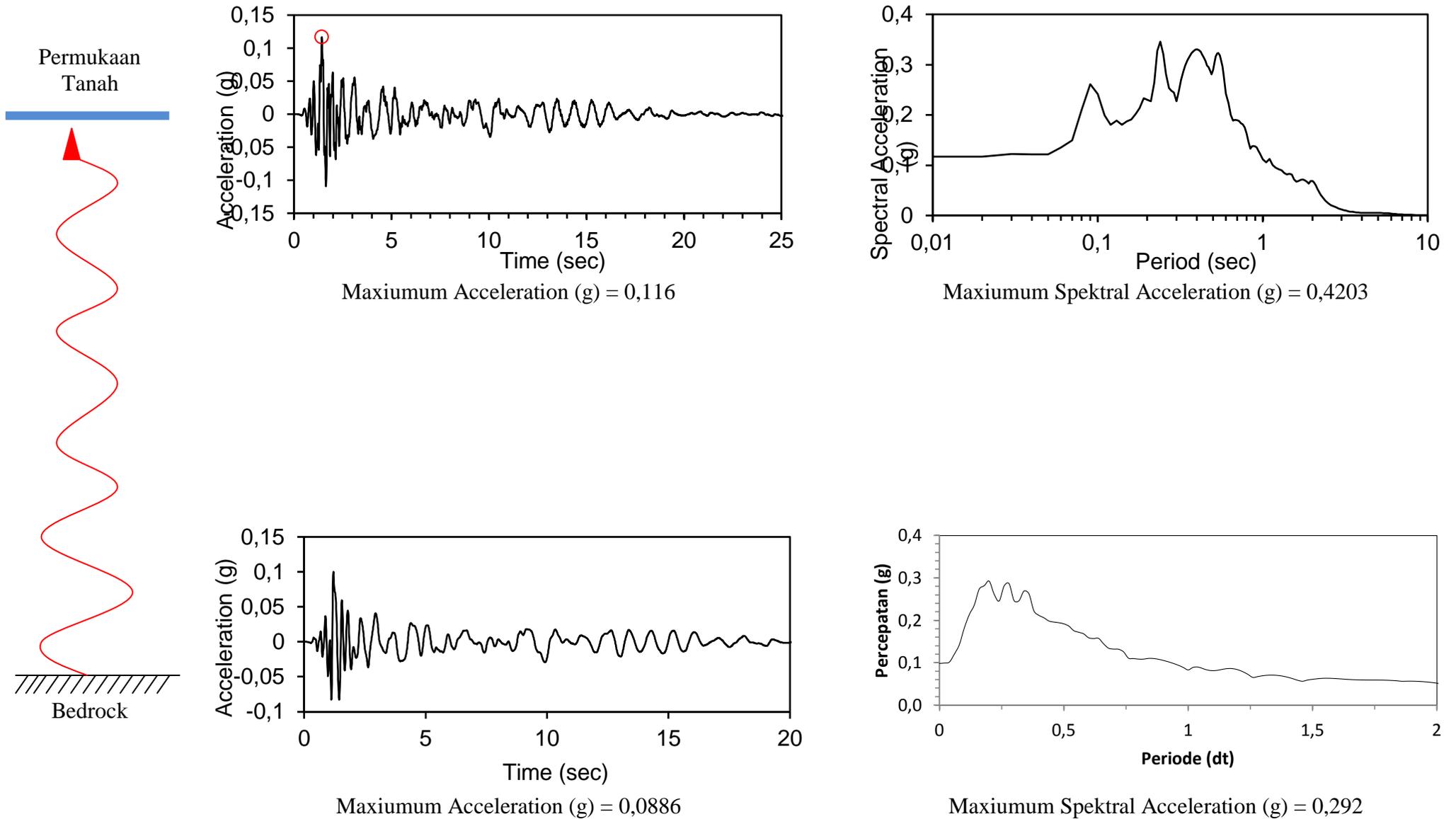
Berdasarkan **Gambar 5.42** untuk gempa Trinidad dan Hollister nilai regangan tanah baserock lebih rendah daripada di permukaan. Untuk regangan di kedalaman 18 m sampai 4,5 m memiliki nilai yang bervariasi naik dan turun, tetapi pada kedalaman 2,25 m mengalami lonjakan atau kenaikan nilai regangan tanah dari 0,0101 menjadi 0,105, hal ini dikarenakan pada kedalaman 4,5 m nilai 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



Hasil Analisis dengan NERA untuk Gempa Hollister

