

## Studi Awal Amplifikasi Gerak Tanah Gempa untuk Universitas Indonesia (Depok)

**Lingga Ekaputra Lucky Suryajaya\***

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia,  
E-mail: [lingga.ekaputra@ui.ac.id](mailto:lingga.ekaputra@ui.ac.id)

**Widjojo Adi Prakoso**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Indonesia,  
E-mail: [wprakoso@eng.ui.ac.id](mailto:wprakoso@eng.ui.ac.id)

**Yuamar Imarrazan Basarah**

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan Institut Teknologi Bandung,  
E-mail: [basarah2@illinois.edu](mailto:basarah2@illinois.edu)

**Sigit Pramono**

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG),  
E-mail: [sigit\\_muslim@yahoo.com](mailto:sigit_muslim@yahoo.com)

### Abstrak

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh maraknya peristiwa gempa bumi di Indonesia beberapa tahun belakangan. Sementara itu, praktik umum dalam penentuan parameter tanah dan kegempaan di Indonesia masih banyak bergantung pada berbagai studi empiris. Maka dari itu, penelitian ini bertujuan untuk mempelajari parameter tanah dan kegempaan di Indonesia lewat fenomena amplifikasi gerak tanah gempa dengan studi kasus yang berlokasi di Universitas Indonesia (Depok). Metode penelitian yang digunakan meliputi: analisis data hasil pencatatan gempa di Hutan UI pada kedalaman 300 meter, pemodelan satu dimensi dengan perangkat lunak DEEPSOIL v7, serta analisis komparatif terhadap hasil pencatatan gerak tanah gempa Banten, 14 Januari 2022 bermagnitudo 6,6 (low strain) di permukaan tanah Hutan UI dan FMIPA UI. Hasil penelitian menunjukkan adanya osilasi pada akhir output percepatan tanah, serta lonjakan nilai peak ground acceleration (PGA) dengan kesalahan relatif terbesar terhadap data recorded adalah 57,82% untuk Hutan UI dan 146,37% untuk FMIPA UI. Hal tersebut mengindikasikan bahwa tanah yang dimodelkan berdasarkan parameter hasil korelasi lebih lunak dari seharusnya. Dengan kata lain, tanah lebih kaku dari dugaan sebelumnya yang mengacu pada korelasi yang telah ditentukan.

**Kata-kata Kunci:** Amplifikasi, Gempa bumi, Gerak tanah gempa, Parameter, Peak ground acceleration, Percepatan spektra, Periode.

### Abstract

This research is motivated by the frequent occurrence of earthquakes in Indonesia in recent years. Meanwhile, the common practice in determining soil and seismic parameters in Indonesia still heavily relies on various empirical studies. Therefore, this study aims to investigate soil and seismic parameters in Indonesia through the phenomenon of earthquake ground motion amplification, with a case study located at the University of Indonesia (Depok). The research methods employed include the analysis of earthquake recording data in the UI Forest at a depth of 300 meters, one-dimensional modeling using DEEPSOIL v7 software, and a comparative analysis of the ground motion recording results of the earthquake in Banten on January 14<sup>th</sup>, 2022, with a magnitude of 6.6 (low strain) on the surface of UI Forest and FMIPA UI. The research results show visible oscillations at the end of the ground acceleration output and a spike in the peak ground acceleration (PGA) with the largest relative error compared to the recorded data being 57,82% for Hutan UI and 146,37% for FMIPA UI. This indicates that the soil modeled based on correlation is softer than anticipated. In other words, the soil is stiffer than previously assumed based on the established correlations.

**Keywords:** Amplification, Earthquake, Ground motion, Parameter, Peak ground acceleration, Period, Spectral acceleration.

\* Penulis Korespondensi: [lingga.ekaputra@ui.ac.id](mailto:lingga.ekaputra@ui.ac.id)

## 1. Pendahuluan

Sepanjang tahun 2022, tercatat ada 1.290 gempa terjadi di bagian barat Jawa, dengan 106 gempa yang guncangannya dirasakan dan 4 di antaranya merupakan gempa destruktif, yaitu Gempa Sukabumi-Bayah pada 9 Oktober dengan magnitudo 5,5; Gempa Cianjur pada 21 November dengan magnitudo 5,6; Gempa Garut-Tasikmalaya pada 3 Desember dengan magnitudo 6,4; dan Gempa Sukabumi pada 8 Desember dengan magnitudo 5,8 (Wamad, 2023). Berdasarkan data tersebut, Jawa Barat dapat dikategorikan sebagai wilayah yang rentan terhadap bencana geologi. Terlebih lagi, lokasi yang berada di daerah tropis menyebabkan pelapukan batuan berlangsung intensif, sehingga menghasilkan jenis tanah residual yang dapat menimbulkan berbagai permasalahan geoteknik (umumnya berkaitan dengan daya dukung tanah). Oleh karena itu, standar dan informasi parameter tanah menjadi hal krusial untuk mengantisipasi dampak berlebih dari gempa yang terjadi.

Parameter tanah dan kegempaan di Indonesia hingga saat ini masih banyak bergantung pada studi empiris terhadap hasil penelitian luar negeri, seperti cepat rambat gelombang regangan geser ( $v_s$ ) dan faktor amplifikasi untuk *peak ground acceleration* (PGA). Hal ini dapat menjadi kelemahan pada analisis karena karakteristik tanah yang belum tentu cocok antara di Indonesia dengan acuan empiris tersebut. Dengan demikian, perlu dilakukan studi lebih lanjut untuk mempelajari kegempaan secara lebih baik di Indonesia.

Studi terkait kegempaan dapat dikembangkan lewat analisis amplifikasi gerak tanah gempa pada suatu situs. Data yang dapat diolah untuk menunjang penelitian ini di antaranya bersumber dari Stasiun Akselerometer BMKG Hutan Universitas Indonesia dan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Indonesia, Depok, Jawa Barat. Terdapat hasil pengujian lapangan dan laboratorium terhadap tanah Hutan UI, serta catatan gempa Banten, 14 Januari 2022 bermagnitudo 6,6 yang terekam pada 3 akselerograf yang masing-masing berlokasi di Hutan UI pada permukaan tanah dan kedalaman 300 meter, serta di FMIPA UI pada permukaan tanah. Data-data tersebut memungkinkan untuk melakukan pemodelan stratigrafi tanah yang kemudian dapat dianalisis amplifikasi gerak tanah gempanya. Pemodelan dapat dilakukan dengan perangkat lunak DEEPSOIL v7 (Hashash dkk., 2020) yang diharapkan mampu menunjukkan hubungan antara parameter tanah, khususnya kecepatan gelombang geser dengan amplifikasi gelombang gempa yang terjadi, serta melakukan komparasi antara *output* dari perangkat lunak dengan data sesungguhnya pada permukaan tanah.

## 2. Tinjauan Pustaka

### 2.1 Parameter dinamis tanah

Dinamika tanah berhubungan dengan tegangan yang terjadi pada struktur tanah akibat adanya beban dinamis, khususnya gempa bumi. Parameter dinamis tanah adalah suatu besaran yang dapat

menggambarkan karakteristik tanah akibat pembebanan berubah-ubah terhadap waktu yang arahnya berlawanan dengan arah gerakan dan gaya inersia berada pada pusat massa, sehingga dapat menentukan cara tanah merespons. Dalam konteks analisis perambatan gelombang gempa, parameter dinamis tanah yang umum digunakan, antara lain: modulus geser tanah ( $G$ ), kecepatan rambat gelombang geser ( $v_s$ ) dan redaman ( $\xi$ ).

#### a. Modulus geser tanah ( $G$ )

Modulus geser tanah adalah perbandingan antara tegangan geser dengan regangan geser tanah (Das dan Ramana, 1993). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Vucetic dan Dobry (1991), nilai modulus geser tanah berbanding terbalik dengan regangan geser dan indeks plastisitas. Dalam penelitian ini, modulus geser tanah akan secara otomatis ditentukan berdasarkan model yang dipilih pada *software* DEEPSOIL v7.

#### b. Kecepatan rambat gelombang geser ( $v_s$ )

Kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) merupakan salah satu parameter dinamis tanah yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kekakuan lapisan tanah. Hal tersebut menjadi krusial dalam desain gempa karena berhubungan dengan faktor amplifikasi tanah. Metode yang kerap digunakan dalam menentukan kecepatan gelombang geser adalah menggunakan korelasi empiris. Pada penelitian ini, metode korelasi empiris untuk kecepatan gelombang geser akan didasarkan pada hasil *standard penetration test* (SPT). Nilai kecepatan gelombang geser yang diambil merupakan rata-rata menurut jenis tanah dari seluruh korelasi yang disediakan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Direktorat Jenderal Bina Marga (2019) yang dapat dilihat pada **Tabel 1**.

#### c. Redaman ( $\xi$ )

Redaman merupakan parameter dinamis tanah yang menunjukkan adanya peristiwa disipasi energi akibat Gerakan antar molekul dalam material, sehingga terjadi pelemahan pada getaran. Parameter redaman pada tanah disebut dengan rasio redaman ( $\xi$ ). Menurut penelitian yang dilakukan oleh Vucetic dan Dobry (1991), nilai rasio redaman akan berbanding lurus dengan regangan geser, tetapi berbanding terbalik dengan indeks plastisitas. Sama halnya dengan modulus geser tanah, pada penelitian ini, redaman tanah akan secara otomatis ditentukan berdasarkan model yang dipilih pada *software* DEEPSOIL v7.

## 2.2 Karakteristik geoteknik Universitas Indonesia

Karakteristik geoteknik Universitas Indonesia dikaji hingga kedalaman 1.000 meter lewat penelitian Ridwan (2016) dengan tujuan mengestimasi kecepatan gelombang geser untuk sedimen dalam dan dangkal menggunakan metode *microtremor array*, pengembangan peta kedalaman batuan dasar, distribusi spasial  $av_{s30}$ , dan kelas situs, serta verifikasi hasil analisis melalui data SPT dan *seismic downhole test* yang dilakukan pada 55 titik di Jakarta. Terdapat data kecepatan gelombang geser 1D yang merupakan hasil

Tabel 1. Korelasi empiris kecepatan gelombang geser berdasarkan N-SPT

| Sumber                      | Jenis Tanah | Korelasi                      |
|-----------------------------|-------------|-------------------------------|
| Imai (1997)                 | Semua tanah | $v_s (avg) = 91 N^{0,337}$    |
|                             | Pasir       | $v_s (avg) = 80,6 N^{0,331}$  |
|                             | Lempung     | $v_s (avg) = 80,2 N^{0,292}$  |
| Ohta dan Goto (1978)        | Semua tanah | $v_s (avg) = 85,35 N^{0,348}$ |
| Seed dan Idriss (1981)      | Semua tanah | $v_s (avg) = 61,4 N^{0,5}$    |
| Sykora dan Stokoe (1983)    | Pasir       | $v_s (avg) = 100,5 N^{0,29}$  |
| Okamoto dkk. (1989)         | Pasir       | $v_s (avg) = 125 N^{0,3}$     |
| Pitilakis dkk. (1999)       | Pasir       | $v_s (avg) = 145 N^{0,178}$   |
|                             | Lempung     | $v_s (avg) = 132 N^{0,271}$   |
| Kiku dkk. (2001)            | Semua tanah | $v_s (avg) = 68,3 N^{0,292}$  |
| Jafari dkk. (2002)          | Pasir       | $v_s (avg) = 22 N^{0,77}$     |
|                             | Lempung     | $v_s (avg) = 27 N^{0,73}$     |
| Hasancebi dan Ulusay (2007) | Semua tanah | $v_s (avg) = 99 N^{0,309}$    |
|                             | Pasir       | $v_s (avg) = 90,82 N^{0,319}$ |
|                             | Lempung     | $v_s (avg) = 97,89 N^{0,269}$ |
| Dikmen (2009)               | Semua tanah | $v_s (avg) = 58 N^{0,39}$     |
|                             | Pasir       | $v_s (avg) = 73 N^{0,33}$     |
|                             | Lantau      | $v_s (avg) = 60 N^{0,36}$     |
|                             | Lempung     | $v_s (avg) = 44 N^{0,48}$     |

Sumber: Ameratunga (2016)

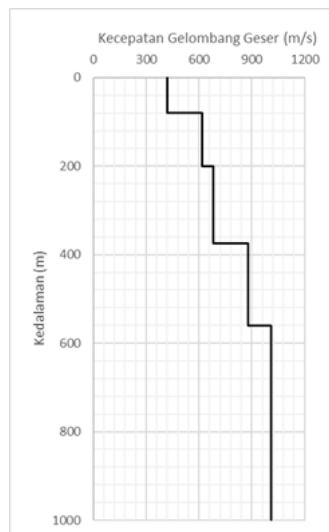
microtremor array dengan kedalaman mencapai 1.000 meter sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

Karakteristik geoteknik Universitas Indonesia juga diperoleh dengan uji fisik dan geofisik di FMIPA UI, Depok (JAU; 6.397° LS, 106.833° BT) untuk mengarakterisasi tanah hingga kedalaman 30 meter oleh Prakoso dkk. (2011) pada Gambar 2.

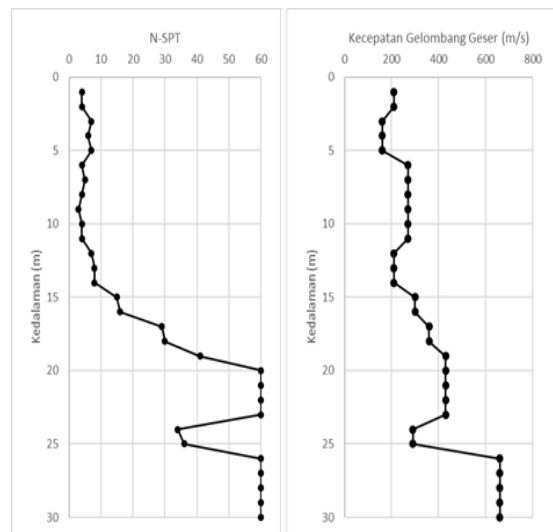
Adapun hasil pengujian SPT yang dilakukan tiap 2 meter hingga kedalaman 80 meter yang berlokasi di Hutan UI. Data hasil pengujian ini juga dapat menjadi dasar penentuan stratigrafi dan parameter tanah (Gambar 3).

### 2.3 Pemodelan amplifikasi gempa satu dimensi (1D)

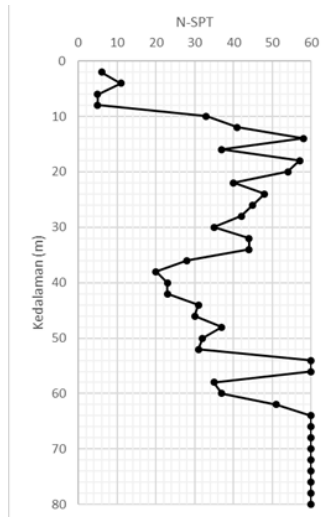
Pemodelan amplifikasi gempa satu dimensi (1D) merupakan suatu analisis numerik menggunakan perangkat lunak tertentu untuk memprediksi perilaku gelombang seismik ketika merambat pada sumbu vertikal melewati lapisan tanah yang beragam. Salah satu hasil yang dapat diperoleh dari pemodelan amplifikasi gempa 1D adalah kurva respons spektra. Kurva tersebut menunjukkan hubungan antara percepatan spektra terhadap periode atau frekuensi. Perubahan amplitudo gelombang seismik sebagai fungsi dari frekuensi dapat diketahui, sehingga efek amplifikasi pada suatu situs dapat dipertimbangkan. Pada penelitian



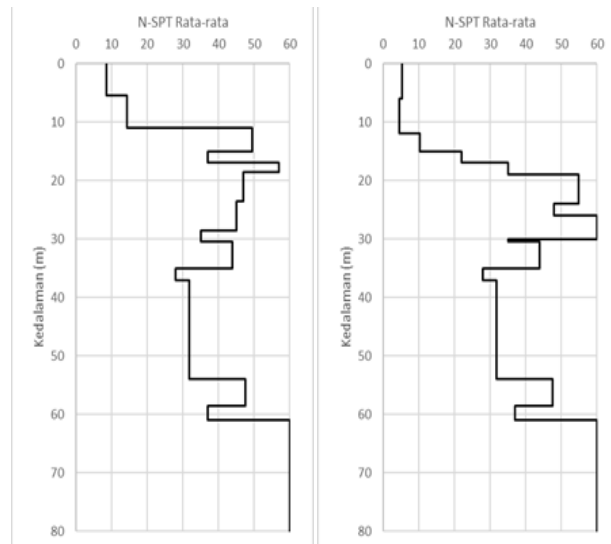
Gambar 1. Kecepatan gelombang geser di Universitas Indonesia (Ridwan, 2016)



Gambar 2. Evaluasi kecepatan gelombang geser dan model karakteristik geoteknik FMIPA UI (Prakoso dkk., 2011)



Gambar 3. Grafik N-SPT terhadap kedalaman di Hutannya UI



Gambar 4. Grafik N-SPT rata-rata terhadap kedalaman di Hutannya UI dan FMIPA UI

ini, pemodelan amplifikasi gerak tanah gempa dilakukan menggunakan perangkat lunak DEEPSOIL v7. Pada DEEPSOIL v7, penentuan analisis ditetapkan menggunakan metode nonlinear dengan model konstitutif tanah general quadratic/hyperbolic. Kurva referensi untuk modulus geser dan redaman menggunakan Darendeli (2001), serta batuan dasar akan didefinisikan sebagai rigid halfspace. Profil tanah dibagi menurut persamaan  $H = v_s/4f_{max}$  dengan  $f_{max}$  ditentukan sebesar 30 Hz.

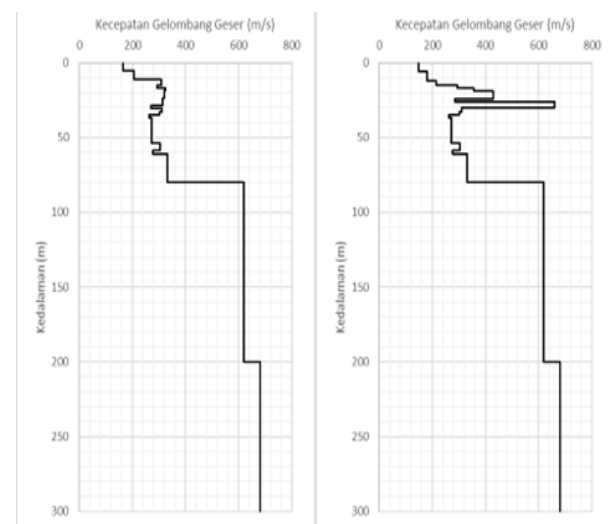
### 3. Metodologi Penelitian

#### 3.1 Penentuan stratigrafi dan parameter tanah

Stratigrafi tanah ditentukan untuk dua lokasi, yaitu Hutannya UI dan FMIPA UI. Stratigrafi tanah di Hutannya UI didasarkan pada deskripsi tanah dan hasil SPT. Sementara itu, stratigrafi tanah di FMIPA UI menggunakan data SPT dari Gambar 1. Untuk kebutuhan penelitian, stratigrafi tanah FMIPA UI perlu diteruskan hingga kedalaman yang sama dengan Hutannya UI. Oleh karena itu, stratigrafi tanah di FMIPA UI dari kedalaman 30 meter hingga 80 meter diasumsikan memiliki data yang identik dengan Hutannya UI. Dari stratigrafi yang telah ditentukan, nilai N-SPT dirata-rata untuk mengetahui kekuatan tanah dan menjadi pertimbangan *input* parameter tanah secara empiris.

Data stratigrafi tanah tersebut kemudian perlu diteruskan hingga kedalaman 300 meter karena letak akselerograf yang merekam gerak tanah gempa berada pada kedalaman tersebut. Maka, data dikompositkan dengan menggunakan hasil *microtremor array* di wilayah Universitas Indonesia pada Gambar 2. Berdasarkan gelombang gesernya, kedalaman 80 m – 300 m dibagi menjadi 2 lapis tanah, yaitu 80 m – 200 m dan 200 m – 300 m. Jenis tanah pada kedua lapisan tersebut dapat diasumsikan sebagai tanah pasir padat.

Parameter tanah dasar yang perlu di-*input* pada DEEPSOIL v7 meliputi berat jenis, kecepatan gelombang geser, dan kuat geser. Berat jenis dan kuat geser tanah akan ditentukan lewat hasil uji laboratorium yang tersedia di beberapa kedalaman tertentu. Pada

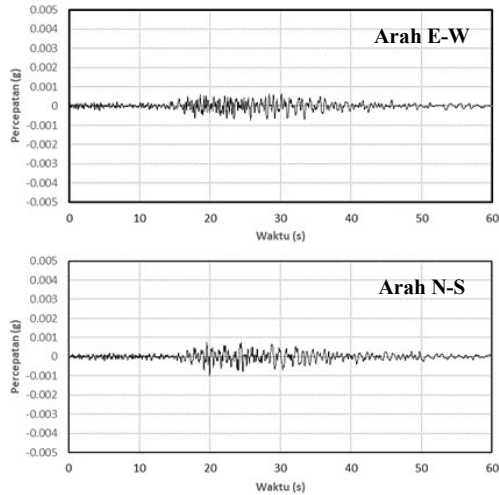


Gambar 5. Model kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman di Hutannya UI dan FMIPA UI

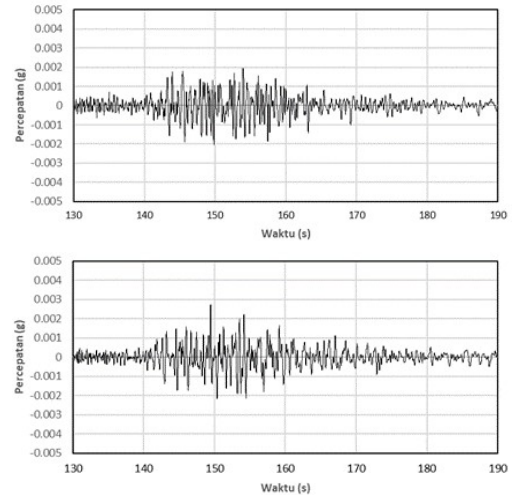
kedalaman yang tidak tersedia uji laboratorium, digunakan korelasi empiris untuk menentukan parameternya. Sedangkan, kecepatan gelombang geser pada kedalaman 0 m – 80 m di Hutannya UI dan FMIPA UI akan ditentukan dengan korelasi empiris berdasarkan nilai N-SPT menggunakan Tabel 1. Seluruh nilai kecepatan gelombang geser yang diperoleh lalu dirata-rata sesuai dengan jenis tanahnya. Pada kedalaman 80 m – 300 m nilai kecepatan gelombang geser langsung mengambil nilai dari Gambar 2, yaitu sebesar 620 m/s pada kedalaman 80 m – 200 m dan 680 m/s pada kedalaman 200 m – 300 m. Parameter lain yang perlu di-*input* adalah model tanah, seperti nilai modulus geser dan redaman. Nilai tersebut akan ditentukan lewat kurva referensi Darendeli (2001).

#### 3.2 Input gerak tanah gempa

Gerak tanah gempa yang digunakan pada penelitian ini adalah gempa Banten yang terjadi pada Jumat, 14



Gambar 6. Gerak tanah gempa arah E-W dan N-S pada kedalaman 300 m di Hutan UI (BMKG, 2022)



Gambar 8. Gerak tanah gempa arah E-W dan N-S pada permukaan tanah FMIPA UI (BMKG, 2022)

Januari 2022 Pukul 16:05:41 WIB dengan magnitudo 6,6 dan kedalaman 40 km. Menurut data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), lokasi pusat gempa bumi terletak di Samudera Hindia pada koordinat 7,21° LS – 105,05° BT. Gempa Banten tersebut terekam pada 3 akselerograf yang terdapat di Universitas Indonesia, masing-masing berlokasi di Hutan UI pada permukaan tanah dan kedalaman 300 meter, serta di FMIPA UI pada permukaan tanah. Gerak tanah gempa di Hutan UI pada kedalaman 300 m akan di-input ke dalam pemodelan untuk dianalisis amplifikasinya dengan analisis awal mengasumsikan bahwa input gerak tanah gempa di FMIPA UI sama dengan Hutan UI.

Gerak tanah gempa di Hutan UI dan FMIPA UI pada permukaan (0 meter) akan menjadi verifikator dengan melakukan analisis komparatif terhadap output pemodelan menggunakan DEEPSOIL v7. Verifikasi akan dititikberatkan pada nilai *peak ground acceleration* (PGA) atau nilai percepatan tertinggi yang dicapai oleh gerak tanah gempa, kemudian dilakukan pula analisis terhadap respons spektranya. Berikut merupakan data hasil pencatatan gerak tanah gempa (*recorded*) di permukaan Hutan UI (Gambar 7) dan FMIPA UI (Gambar 8).

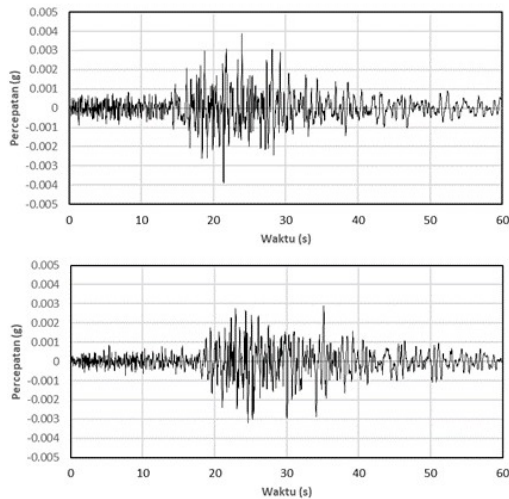
Dengan demikian, tabulasi gerak tanah gempa *input* dan *output* yang terekam pada akselerograf berdasarkan *peak ground acceleration* (PGA) dapat dilihat pada Tabel 2.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Analisis pada penelitian ini menitikberatkan pada nilai *peak ground acceleration* (PGA) yang dihasilkan oleh pemodelan secara 1 dimensi menggunakan perangkat lunak DEEPSOIL v7. Output pemodelan gerak tanah gempa ditampilkan untuk 60 detik durasi signifikan dan dibandingkan dengan hasil pencatatan (*recorded*) di permukaan tanah pada dua arah sumbu, yaitu E-W dan N-S. Hasil pemodelan untuk gerak tanah gempa Hutan UI ditampilkan pada Gambar 9.

Percepatan gerak tanah gempa ini kemudian ditabulasi dan diperoleh kesalahan relatifnya dengan cara menghitung selisih antara nilai PGA hasil pemodelan dengan nilai pencatatan, kemudian dibandingkan dengan nilai pencatatan. Tabulasi dapat dilihat pada Tabel 3.

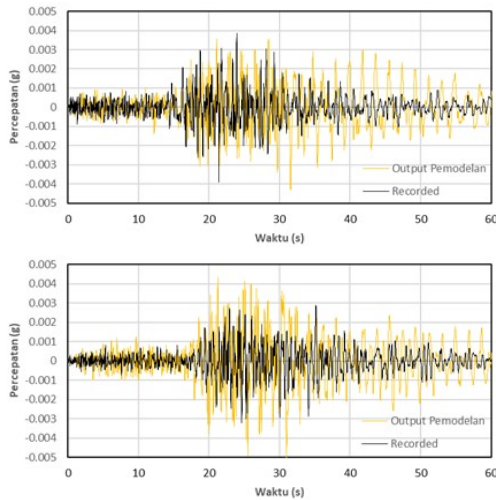
Output *peak ground acceleration* (PGA) di Hutan UI menunjukkan hasil yang cukup sesuai terhadap hasil



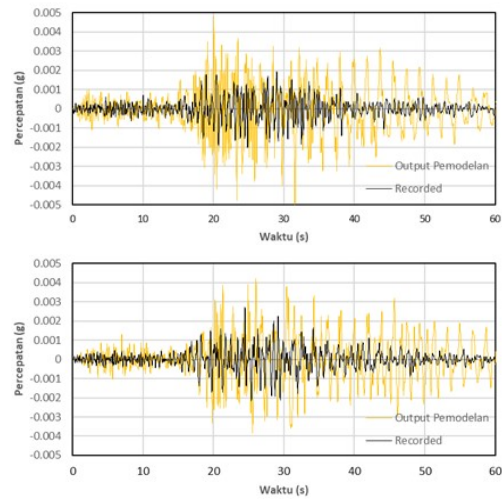
Gambar 7. Gerak tanah gempa arah E-W dan N-S pada permukaan tanah Hutan UI (BMKG, 2022)

Tabel 2. Hasil pencatatan gerak tanah gempa (*recorded*)

| Arah Gerak Tanah Gempa | Input di Kedalaman 300 m (g) | Hutan UI            |             | FMIPA UI            |             |
|------------------------|------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|-------------|
|                        |                              | Output Recorded (g) | Amplifikasi | Output Recorded (g) | Amplifikasi |
| E-W                    | 0,000752094                  | 0,003898            | 5,18        | 0,002019            | 2,68        |
| N-S                    | 0,000992268                  | 0,003200            | 3,23        | 0,002721            | 2,74        |



Gambar 9. Output pemodelan gerak tanah gempa Hutan UI



Gambar 10. Output pemodelan gerak tanah gempa FMIPA UI

Tabel 3. Tabulasi output pemodelan gerak tanah gempa Hutan UI

| Arah Gerak Tanah Gempa | Output Pemodelan (g) | Amplifikasi | Kesalahan Relatif |
|------------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| E-W                    | 0,004309             | 5,73        | 10,54%            |
| N-S                    | 0,005051             | 5,09        | 57,82%            |

pencatatan di permukaan tanah (*recorded*) didasarkan pada kesesuaian bentuk percepatan gerak tanah gempa dan nilai kesalahan relatifnya. Kesalahan relatif pada arah N-S jauh lebih besar daripada arah E-W diduga karena adanya suatu faktor redaman tanah yang tidak terdeteksi pada penelitian ini. Hal ini tampak pada **Tabel 2** yang menunjukkan *input* gerak tanah gempa pada arah N-S lebih besar daripada arah E-W, tetapi *output recorded* menghasilkan nilai yang lebih rendah (berbanding terbalik). Adapun bentuk percepatan gerak tanah gempa hasil pemodelan tampak lebih besar, baik pada arah E-W maupun N-S, khususnya pada detik ke-40 hingga 60. Meski hal tersebut tidak berpengaruh terhadap kesalahan relatif karena puncak tertinggi terjadi sebelum durasi tersebut, hal ini menjadi fenomena tersendiri dalam penelitian ini yang kemudian disebut dengan istilah “osilasi”. Hal serupa ditemui pada hasil pemodelan untuk gerak tanah gempa FMIPA UI yang ditampilkan pada **Gambar 10**.

Percepatan gerak tanah gempa ini kemudian juga ditabulasi dan diperoleh kesalahan relatifnya dengan membandingkan *peak ground acceleration* (PGA) hasil pemodelan dengan pencatatan (*recorded*) sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Hasil pemodelan di FMIPA UI menunjukkan kesalahan relatif yang lebih tinggi daripada Hutan UI. Bentuk percepatan gerak tanah gempa yang lebih besar, baik pada arah E-W maupun N-S mengindikasikan bahwa penyesuaian stratigrafi tanah pada 30 meter lapisan teratas belum cukup untuk

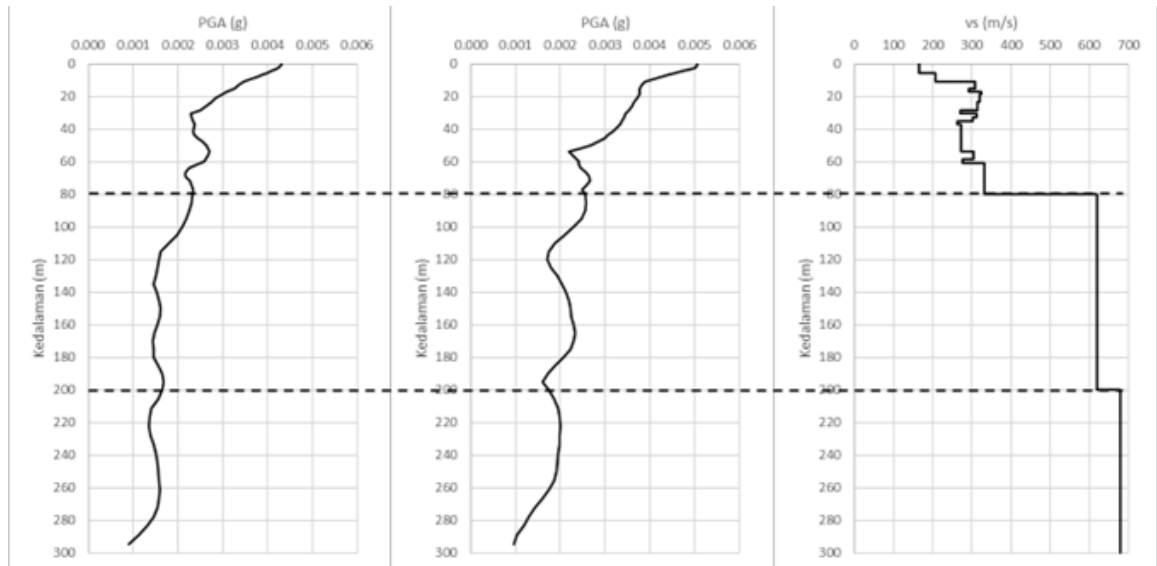
menghasilkan *output* yang lebih baik. Namun, dapat diketahui bahwa penyesuaian stratigrafi berpengaruh cukup signifikan terhadap *output* pemodelan percepatan gerak tanah gempa secara keseluruhan. Dengan demikian, terdapat variabilitas tanah antara FMIPA UI dengan Hutan UI yang menyebabkan stratigrafi tanah di FMIPA UI tidak bisa diasumsikan sama dengan stratigrafi tanah di Hutan UI dalam konteks pemodelan amplifikasi gerak tanah gempa.

Analisis lebih lanjut dilakukan terhadap grafik *peak ground acceleration* (PGA) untuk tiap kedalaman di Hutan UI yang disejajarkan dengan grafik kecepatan gelombang geser (**Gambar 11**). Dari grafik tersebut, ditemukan fenomena timbulnya lonjakan nilai PGA pada lapisan atas tanah, khususnya pada lapisan yang parameter-parameternya diolah dari hasil uji lapangan dan laboratorium, yaitu dari kedalaman 80 meter hingga permukaan tanah (0 meter). Berbeda dengan PGA pada kedalaman 300 meter hingga 80 meter yang naik secara bertahap.

Pada permukaan tanah (0 meter) hingga kedalaman 80 meter, tampak kecepatan gelombang geser berada pada rentang 175 m/s sampai 350 m/s yang termasuk dalam kelas situs SD (tanah sedang). Sementara, pada kedalaman 80 meter hingga 300 meter, kecepatan gelombang geser berada pada rentang 350 m/s sampai 750 m/s yang termasuk dalam kelas situs SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak). Perbedaan kelas situs ini menunjukkan adanya kekakuan tanah yang berbeda, sehingga faktor amplifikasi juga akan berbeda, yaitu lebih besar pada tanah yang lebih lunak.

Tabel 4. Tabulasi output pemodelan gerak tanah gempa FMIPA UI

| Arah Gerak Tanah Gempa | Output Pemodelan (g) | Amplifikasi | Kesalahan Relatif |
|------------------------|----------------------|-------------|-------------------|
| E-W                    | 0,004975             | 6,61        | 146,37%           |
| N-S                    | 0,004204             | 4,24        | 54,52%            |

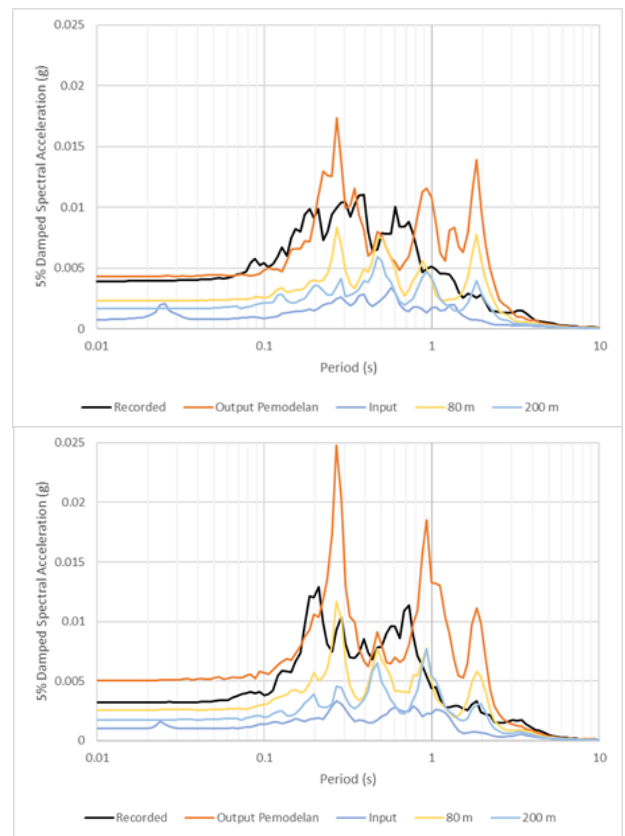


Gambar 11. Grafik *peak ground acceleration* (PGA) dan kecepatan gelombang geser terhadap kedalaman di Hutannya UI

Fenomena lain yang ditemukan pada hasil pemodelan di kedua lokasi adalah tampak adanya osilasi di akhir durasi signifikan. Percepatan gerak tanah gempa umumnya berangsur mengecil mendekati nol setelah durasi signifikan. Oleh karena itu, analisis juga dilakukan terhadap respons spektra yang dihasilkan oleh *output* pemodelan di Hutannya UI untuk mempelajari frekuensi yang terkandung (*frequency content*) dalam gerak tanah gempa. Respons spektra menunjukkan hubungan antara percepatan spektra dengan redaman 5% terhadap periode sebagaimana disajikan pada Gambar 12.

Dari grafik respons spektra, tampak adanya pergeseran pada *output* pemodelan (garis jingga) dibandingkan dengan hasil pencatatan (garis hitam). Setelah ditelusuri pada kedalaman 200 meter dan 80 meter, pergeseran sudah terjadi dari awal amplifikasi gerak tanah gempa. Selain itu, percepatan spektra yang tampak lebih tinggi dari seharusnya (*recorded*). Perbedaan yang signifikan tersebut menunjukkan bahwa analisis pemodelan gerak tanah gempa tidak cukup hanya mengacu pada *peak ground acceleration* (PGA) saja karena frekuensi yang terkandung bisa berbeda.

Pergeseran respons spektra menunjukkan bahwa *output* pemodelan memiliki periode yang lebih tinggi dari hasil pencatatan (*recorded*), sementara percepatan spektra yang lebih tinggi umumnya berhubungan dengan redaman tanah. Pada penelitian ini, kedua hal tersebut tidak berimplikasi langsung terhadap nilai kesalahan relatif yang dihasilkan, tetapi mengindikasikan bahwa tanah dimodelkan dengan parameter yang lebih lunak daripada seharusnya, bahkan dari kedalaman 200 meter dan 80 meter berdasarkan penelusuran respons spektra. Dengan kata lain, tanah seharusnya lebih kaku dari apa yang telah dimodelkan. Hal ini berimplikasi pada penentuan nilai kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) menggunakan korelasi empiris yang diduga masih terlalu rendah, sehingga tanah dimodelkan dengan kurang kaku. Dugaan lainnya adalah kemungkinan batuan dasar (*bedrock*) berada lebih dangkal daripada hasil



Gambar 12. Grafik respons spektra di Hutannya UI

*microtremor array* pada Gambar 2. Hal ini didasari pada sifat batuan dasar yang tidak mengamplifikasi gelombang seismik (faktor amplifikasi = 1). Sedangkan, hasil *microtremor array* pada Gambar 2 menunjukkan bahwa hingga kedalaman 300 meter, lapisan tanah belum mencapai kecepatan gelombang geser 750 m/s atau belum termasuk ke dalam kelas situs batuan dasar (SB). Dengan demikian, gerak tanah gempa dari kedalaman 300 meter selalu mengalami amplifikasi hingga ke permukaan tanah.

## 5. Kesimpulan

1. Berdasarkan nilai PGA, amplifikasi gerak tanah gempa di Hutan UI menghasilkan *output* yang cukup baik, tetapi cenderung lebih besar daripada hasil pencatatan (*recorded*).
2. Penyesuaian stratigrafi tanah pada 30 meter lapisan teratas FMIPA UI belum cukup untuk menghasilkan *output* yang baik karena kesalahan relatif masih tinggi, sehingga diketahui pula terdapat variabilitas tanah antara FMIPA UI dengan Hutan UI.
3. Terdapat fenomena lonjakan nilai PGA dari kedalaman 80 meter hingga permukaan tanah pada lapisan yang parameter-parameternya diolah dari hasil uji lapangan dan laboratorium.
4. Terdapat osilasi pada akhir durasi signifikan seluruh *output* pemodelan.
5. Dari grafik respons spektra, tampak periode yang lebih tinggi dari hasil pencatatan (*recorded*), bahkan dari kedalaman 200 meter, serta percepatan spektra yang lebih tinggi pula. Dengan demikian, terdapat indikasi penentuan parameter tanah dengan korelasi empiris lebih lunak daripada yang seharusnya.
6. Ada kemungkinan batuan dasar (*bedrock*) lebih dangkal dari data kecepatan gelombang geser ( $v_s$ ) yang ditunjukkan oleh hasil *microtremor array*.

## Daftar Pustaka

- Ameratunga, J., 2016, *Correlation of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Townsville: Springer.
- Darendeli, M. B., 2001, *Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves*, Ph.D. thesis, University of Texas at Austin, Austin, TX.
- Das, B. M., Ramana, G. V., 2011, *Principles of Soil Dynamics Second Edition*, Cengage Learning, Suite 400 Stamford.
- Dikmen, U., 2009, *Statistical Correlations of Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Soils*, Journal of Geophysics and Engineering.
- Hasancebi, N., Ulusay, R., 2006, *Empirical Correlations between Shear Wave Velocity and Penetration Resistance for Ground Shaking Assessments*, Bulletin of Engineering Geology and the Environment.
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Xing, G., Numanoglu, O., Groholski, D. R., Phillips, C. A., Park, D., 2020, DEEPSOIL 7.0, *User Manual*, Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Imai, T., 1977, *P and S Wave Velocities of the Ground in Japan*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
- Jafari, M. K., Shafiee, A., Razmkhah, A., 2002, *Dynamic Properties of Fine Grained Soils in South of Tehran*, Journal of Seismology and Earthquake Engineering.
- Kementerian PUPR, 2019, Kumpulan Korelasi Parameter Geoteknik dan Fondasi. Direktorat Jenderal Bina Marga.
- Kiku, H., Yoshida, N., Yasuda, S., Irisawa, T., Nakazawa, H., Shimizu, Y., Ansal, A., Erkan, A., 2001, *In-Situ Penetration Tests and Soil Profiling in Adapazari, Turkey*, Proceedings of the ICSMGE/TC4 Satellite Conference on Lessons Learned From Recent Strong Earthquakes.
- Ohta, Y., Goto, N., 1978, *Empirical Shear Wave Velocity Equations in Terms of Characteristic Soil Indexes*, Earthquake Engineering Structural Dynamics.
- Okamoto, T., Kokusho, T., Yoshida, Y., Kusunoki, K., 1989, *Comparison of Surface versus Subsurface Wave Source for P-S Logging in Sand Layer*, Proceeding of the 44<sup>th</sup> Annual Conference JSCE.
- Pitilakis, K., Raptakis, D., Lontzetidis, K. T., Vassilikou, T., Jongmans, D., 1999, *Geotechnical and Geophysical Description of Euro-Seistests, Using Field and Laboratory Tests, and Moderate Strong Ground Motions*, Journal of Earthquake Engineering.
- Prakoso, W. A., Daud, Y., Pratama, S. A., 2011, Karakteristik Geoteknik Stasiun *Accelerometer* Tanjung Priok (JATA) dan Depok (JAUI).
- Ridwan, M., 2016, *Study of Ground Subsurface in Jakarta by Using Microtremor Array Method: Identification of Engineering Bedrock Depth and Site Class*.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., 1981, *Evaluation of Liquefaction Potential Sand Deposits Based on Observation of Performance in Previous Earthquakes*, St. Louis (MO): ASCE National Convention.
- Sykora, D. E., Stokoe, K. H., 1983, *Correlations of In-Situ Measurements in Sands of Shear Wave Velocity*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 20, pp. 125-136.
- Vucetic, M., Dobry, R., 1991, *Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response*. Journal of Geotechnical Engineering, Volume 117, Issue 1, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89)).