

ANALISIS RESPON SEISMIK NONLINIER DI KABUPATEN BANTUL AKIBAT GEMPA BANTUL 2023

Nurul Dwi Endarina¹, Lindung Zalbuin Mase^{*}, Muharram Nurfikri²,
Rena Misliniyati³, Hardiansyah⁴

Corresponding Author Unit Penelitian Bahaya Geoteknik Universitas Bengkulu^{*}
Program Studi Teknik Sipil Universitas Bengkulu^{1,2,3,4}

E-mail : g1b022007.nuruldwiendarina@mhs.unib.ac.id¹, lmase@unib.ac.id^{*},
m.nurfikri@unib.ac.id², rena_misliniyati@unib.ac.id³, hardiansyah@unib.ac.id⁴

ABSTRAK

Kabupaten Bantul merupakan wilayah dengan tingkat kerentanan gempa yang tinggi akibat aktivitas tektonik zona subduksi di selatan Pulau Jawa, sehingga analisis respon seismik berbasis kondisi tanah lokal menjadi penting untuk mendukung perencanaan struktur tahan gempa. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respon seismik nonlinier tanah akibat Gempa Bantul 2023 melalui parameter *Peak Ground Acceleration* (PGA), percepatan respon spektra, dan faktor amplifikasi. Metodologi penelitian menggunakan model atenuasi *NGA-Subduction* untuk menghasilkan percepatan spektral sebagai target *spectral matching*, yang selanjutnya digunakan sebagai input motion dalam analisis respon tanah satu dimensi nonlinier menggunakan perangkat lunak *DeepSoil* Versi 7. Data tanah diperoleh dari hasil *Standard Penetration Test* (SPT) pada empat titik penelitian, serta klasifikasi kelas situs ditentukan berdasarkan nilai V_{S30} . Hasil penelitian menunjukkan nilai V_{S30} berkisar antara 259–412 m/s dengan dominasi kelas situs D dan satu titik kelas C, nilai PGA permukaan sebesar 0,047–0,063 g, serta faktor amplifikasi antara 0,91–1,25. Respon spektra di permukaan umumnya meningkat pada periode pendek dibandingkan input motion, namun masih berada di bawah spektra desain SNI 1726:2019. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kondisi tanah lokal berperan signifikan dalam memodifikasi respon gempa dan berkontribusi dalam pengembangan analisis bahaya seismik berbasis lokasi spesifik.

Kata Kunci : *Amplifikasi Tanah, Bantul, PGA, Respon Seismik Nonlinier, Respon Spektra*

PENDAHULUAN

Yogyakarta terletak di dekat zona subduksi yang terbentuk dari proses konvergensi antara Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke arah utara dan Lempeng Eurasia yang cenderung stabil. Interaksi tektonik ini memicu penunjaman Lempeng Indo-Australia di bawah Lempeng Eurasia, sehingga mengakibatkan terjadinya deformasi kerak dan menjadikan Pulau Jawa sebagai wilayah yang aktif secara tektonik, yang ditandai oleh tingkat kegempaan yang tinggi serta aktivitas

vulkanik yang intens (Rahayu & Madrinovella, 2024). Gempa bumi terjadi pada dua dekade terakhir terjadi di Yogyakarta. Gempa 27 Mei 2006 terjadi akibat aktivitas pergerakan lempeng di Sesar Opak dianggap sebagai salah satu peristiwa gempa bumi terparah dalam sejarah Indonesia belakangan ini dengan kekuatan magnitude 5,9 (Saputra dkk., 2018). Meskipun pusat gempa berada paling dekat dengan Kota Yogyakarta, kerusakan paling parah terjadi di wilayah Bantul. Gempa yang terjadi pada hari Jumat, 30 Juni 2023 terjadi akibat adanya aktivitas pergerakan lempeng subduksi

dengan kekuatan magnitudo sebesar 6,0. Pusat gempa terletak pada koordinat 8,75° LU dan 110° BT, sekitar 102 km sebelah barat daya Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, pada kedalaman fokus 67 km. Gempa 30 Juni 2023 menyebabkan kerusakan pada 172 bangunan, 15 orang terluka, dan 1 orang meninggal dunia. Berdasarkan lokasi episentrum dan kedalaman hiposentrum, gempa bumi yang terjadi merupakan gempa bumi sedang yang disebabkan oleh pergerakan lempeng subduksi (*intraslab*) (BMKG, 2023).

Risiko gempa bumi telah menjadi salah satu faktor yang membatasi pengembangan kawasan perkotaan di wilayah terdampak, seperti Kabupaten Bantul. Infrastruktur fisik di Kabupaten Bantul sangat rentan terhadap kerusakan gempa. Ada kemungkinan bahwa bangunan, jalan raya, dan fasilitas umum lainnya di Bantul tidak dibangun sesuai standar yang diperlukan untuk menahan dampak gempa bumi yang signifikan (Tidiesya dkk., 2025). Di sisi lain, pertumbuhan jumlah penduduk tetap menuntut perluasan kawasan perkotaan untuk memenuhi kebutuhan ruang. Kondisi ini mendorong kemungkinan terjadinya alih fungsi lahan dan pemanfaatan ruang yang sebelumnya belum terbangun menjadi kawasan terbangun (Nurhaci dkk., 2024). Oleh karena itu, mengingat Bantul merupakan kota yang memegang peranan penting dalam bidang ekonomi, pendidikan, dan budaya, sangatlah penting untuk mempertimbangkan potensi dampak gempa bumi di wilayah ini di masa mendatang.

Penelitian mengenai kegempaan di Bantul telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu. Bustari & Wibowo (2023) menganalisis dan memetakan sebaran nilai V_{s30} , *site class*, faktor amplifikasi tanah, PGA menggunakan metode data sekunder yang bersumber dari USGS dan Data RSA Desain Spektra Indonesia Kementerian PUPR.

Susri Nurhaci dkk., (2024) menganalisis bahaya gempa bumi berdasarkan model spasial dan mengevaluasi Satuan Wilayah Pembangunan (SWP). Tidiesya dkk. (2025) menganalisis kerentanan sosial, fisik, dan ekonomi dari bencana gempa bumi. Penelitian sebelumnya berfokus pada dampak gempa dan masih menggunakan data sekunder dan data gempa Bantul 2006, sementara kajian respon seismik menggunakan metode nonlinier di Kabupaten Bantul masih belum dilakukan secara spesifik.

Selain faktor sumber gempa, karakteristik percepatan tanah di suatu lokasi sangat dipengaruhi oleh proses perambatan gelombang seismik dari batuan dasar menuju permukaan yang dikontrol oleh kondisi geologi lokal. Penggunaan model atenuasi modern seperti *NGA-Subduction* menjadi penting karena mampu memperkirakan parameter gerakan tanah, seperti percepatan spektral dan *Peak Ground Acceleration* (PGA), dengan mempertimbangkan pengaruh magnitudo, mekanisme sumber, jarak, serta kondisi situs secara lebih komprehensif (Kuehn dkk., 2020). Model *NGA-Subduction* dikembangkan berdasarkan basis data global yang luas dan terstandarisasi, sehingga mampu merepresentasikan variasi percepatan tanah pada berbagai zona subduksi serta mengakomodasi ketidakpastian dalam prediksi percepatan tanah (Parker dkk., 2020). Keunggulan lain dari model ini adalah kemampuannya dalam mengintegrasikan pendekatan non-ergodik, yang memungkinkan adanya penyesuaian terhadap kondisi regional sehingga menghasilkan estimasi yang lebih akurat dibandingkan model generasi sebelumnya. Namun demikian, hasil dari model atenuasi tersebut umumnya masih merepresentasikan kondisi batuan dasar (*bedrock motion*), sehingga belum sepenuhnya mencerminkan kondisi aktual di permukaan tanah. Oleh karena itu, diperlukan analisis lanjutan untuk mengevaluasi bagaimana kondisi tanah lokal memodifikasi respon gempa melalui

proses amplifikasi, resonansi, maupun redaman gelombang seismik. Integrasi dengan analisis respon tanah menjadi penting karena lapisan tanah dapat memberikan efek yang signifikan terhadap perubahan amplitudo dan frekuensi gelombang gempa. Parameter seperti nilai V_{s30} , ketebalan lapisan tanah, tingkat kejenuhan, serta kontras impedansi antar lapisan diketahui memiliki pengaruh dominan terhadap perilaku dinamik tanah selama kejadian gempa. Pendekatan berbasis respon tanah ini menjadi semakin relevan dalam kajian bahaya gempa berbasis lokasi spesifik, khususnya pada wilayah dengan kompleksitas geologi tinggi seperti daerah subduksi aktif, dimana variasi kondisi tanah dapat menghasilkan respon seismik yang sangat berbeda meskipun berada pada jarak yang relatif dekat dari sumber gempa.

Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan model atenuasi *NGA-Subduction* dengan analisis respon tanah nonlinier satu dimensi guna mengevaluasi respon seismik di Kabupaten Bantul akibat Gempa Bantul 2023. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA), percepatan respon spektra, dan faktor amplifikasi berdasarkan kondisi tanah lokal, serta menganalisis pengaruh parameter tersebut terhadap variasi respon seismik di permukaan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengevaluasi perbedaan respon seismik antar lokasi berdasarkan klasifikasi kelas situs dan profil tanah yang berbeda, sehingga dapat diketahui tingkat kerentanan relatif masing-masing wilayah. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara parameter percepatan tanah hasil model atenuasi dengan respon aktual di permukaan, serta memberikan kontribusi dalam pengembangan analisis bahaya

seismik berbasis kondisi lokasi spesifik. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan struktur tahan gempa yang lebih adaptif, serta sebagai referensi dalam pengembangan kajian mikrozonasi seismik di Kabupaten Bantul dan wilayah sekitarnya.

TINJAUAN PUSTAKA

Kecepatan Gelombang Geser (V_{s30})

Data yang dipakai dalam bidang teknik geofisika untuk menetapkan struktur bawah tanah hingga kedalaman 30 meter disebut dengan V_{s30} (Setiawan dkk., 2023). V_{s30} merupakan parameter utama yang digunakan dalam penetapan *site class*, yaitu klasifikasi kondisi tanah yang didasarkan pada karakteristik kecepatan gelombang geser. Berdasarkan SNI 1726:2019, nilai V_{s30} dijadikan acuan dalam menentukan jenis tanah dan memiliki peran penting dalam evaluasi kerentanan seismik suatu wilayah.

Tabel 1. Klasifikasi Kelas Situs

Kelas Situs	Deskripsi	V_{s30} (m/s)
SA	Batuan keras	>1500
SB	Batuan	750 - 1500
SC	Tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak	350 – 750
SD	Tanah sedang	175 – 350
SE	Tanah lunak	<175

Sumber : SNI 1726:2019

Nilai V_{s30} ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$V_{s30} = \frac{30 (m)}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{V_{s_i}}}$$

Keterangan :

d_i = Ketebalan setiap lapisan

V_{s_i} = Kecepatan gelombang geser pada setiap lapisan

n = Jumlah lapisan

Model Atenuasi *NGA-Subduction*

NGA-Subduction merupakan model atenuasi yang digunakan untuk menghitung percepatan spektral dan percepatan puncak

tanah di setiap lokasi. Beberapa peneliti di Indonesia telah melakukan penelitian menggunakan *NGA-Subduction*. Mase dkk., (2023) meneliti analisis respon tanah dan potensi kerusakan seismik pada struktur di daerah sekitar Sesar Cimandiri di Jawa Barat, Indonesia, menggunakan gempa bumi terbaru, yaitu Gempa Bumi Cianjur berkekuatan M 5,6 di Indonesia. Mereka menghasilkan percepatan spektral dari NGA-West2. untuk memperkirakan percepatan tanah puncak. Taruna dkk., (2025) menentukan GMM yang paling sesuai berdasarkan catatan percepatan tanah gempa kerak dangkal di wilayah NTB. Penelitian ini mencakup perbandingan kinerja dua model atenuasi, yaitu NGA-West1 dan NGA-West2. Sunardi dkk., (2022) meneliti estimasi bahaya gempa di Tasikmalaya dengan fokus pada percepatan tanah maksimum (PGA) dan percepatan spektral di permukaan. Mereka menggunakan NGA-West2 untuk memperkirakan percepatan tanah pada peristiwa gempa megathrust.

Percepatan spektral dari *NGA-Subduction* dipilih sebagai target pencocokan spektral. Metode pencocokan spektral diterapkan untuk menghasilkan percepatan tanah di setiap lokasi karena tidak ada catatan percepatan tanah yang tersedia di lokasi yang diteliti. Mase & Likitlersuang (2021) juga menerapkan metode ini untuk menghasilkan percepatan tanah untuk nonlinier analisis untuk mendapatkan PGA di permukaan yang dapat digunakan untuk menganalisis potensi likuifaksi di Thailand Utara. Metode pencocokan percepatan spektral digunakan untuk memperoleh percepatan tanah yang relevan dengan kondisi lokasi setempat. Percepatan spektral yang telah dicocokkan tersebut kemudian diterapkan sebagai masukan untuk memodelkan respon tanah terhadap gempa di setiap lokasi yang diteliti.

Permodelan Nonlinear Perambatan Gelombang Seismik Satu Dimensi

Perambatan secara vertikal untuk gelombang geser horizontal yang melewati lapisan-lapisan tanah dapat dilakukan dengan analisis gelombang seismik satu dimensi. Permodelan dari perambatan gelombang seismik satu dimensi disebut dengan *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH). Model ini pertama kali diperkenalkan oleh Duncan dan Chang, selanjutnya dimodifikasi oleh sejumlah peneliti dan kemudian Hashash dan Park mengembangkannya dengan *software DeepSoil V7.0* (Hashash dkk., 2017). Hashash (2017) menyebutkan bahwa setiap lapisan tanah harus memiliki frekuensi minimum 30 Hz. Model PDH adalah penerapan fungsi hiperbolik dalam mereplikasi perilaku nonlinier tanah yang diakibatkan oleh beban dinamik. Model PDH mengutamakan *hysteresis loop* saat pembebanan siklik sebagai *backbone curve* yang diinterpretasi sebagai fungsi hiperbolik. Tegangan geser (t) dan regangan geser (γ) dapat direpresentasikan secara realistis oleh *backbone curve* yang bergantung pada kondisi asli tanah selama proses pembebanan siklik (Utami dkk., 2023). Model nonlinier digunakan di lokasi penelitian yang memiliki data tanah yang komprehensif. Oleh karena itu, model nonlinier umumnya digunakan untuk menganalisis respon tanah karena relatif lebih sesuai untuk memodelkan perilaku nonlinier tanah selama gempa bumi.

Parameter Gelombang Gempa

Parameter gelombang gempa menjadi bagian penting dalam data kegempaan yang digunakan untuk merancang bangunan tahan gempa (Saputro & Momot, 2020). Parameter gelombang gempa yang akan dihasilkan meliputi :

1. Peak Ground Acceleration (PGA)

Akselerasi puncak tanah (PGA) merupakan parameter penting yang digunakan untuk memperkirakan tingkat kerusakan dari wilayah sasaran. PGA mencerminkan secara langsung

intensitas percepatan tanah dan mempunyai korelasi yang baik dengan intensitas dan bencana, yang banyak digunakan untuk menentukan kerusakan seismik, seperti penilaian bencana gempa bumi, analisis bencana seismik probabilistik (Liu dkk., 2024). *Peak Ground Acceleration* (PGA) digunakan sebagai parameter fundamental dalam proses penentuan percepatan batuan dasar (bedrock acceleration) pada praktik perencanaan struktural di Indonesia, yang kemudian secara sistematis dikembangkan dan diolah menjadi spektra respon desain sesuai dengan ketentuan yang diatur dalam standar nasional SNI 1726:2019.

2. Respon Spektra

Grafik yang menunjukkan hubungan antara respon maksimum struktur pada sumbu vertikal dan periode getar struktur pada sumbu horizontal adalah respon spektra. Respon maksimum pada sistem dengan derajat kebebasan tunggal (*single degree of freedom*) dapat berupa percepatan, kecepatan, dan perpindahan (Kristiyanto dkk., 2022). Respon spektra dijadikan dasar penentuan beban gempa rencana sesuai ketentuan SNI 1726:2019 dalam praktik perencanaan struktural di Indonesia. Desain respon spektra digunakan dalam perhitungan gaya gempa, baik melalui metode statik ekuivalen maupun analisis dinamik seperti *Response Spectrum Analysis* (RSA). Parameter utama seperti percepatan spektral pada periode pendek (0,2 detik) dan periode 1 detik, memainkan peran krusial dalam penentuan respon struktur terhadap gempa bumi.

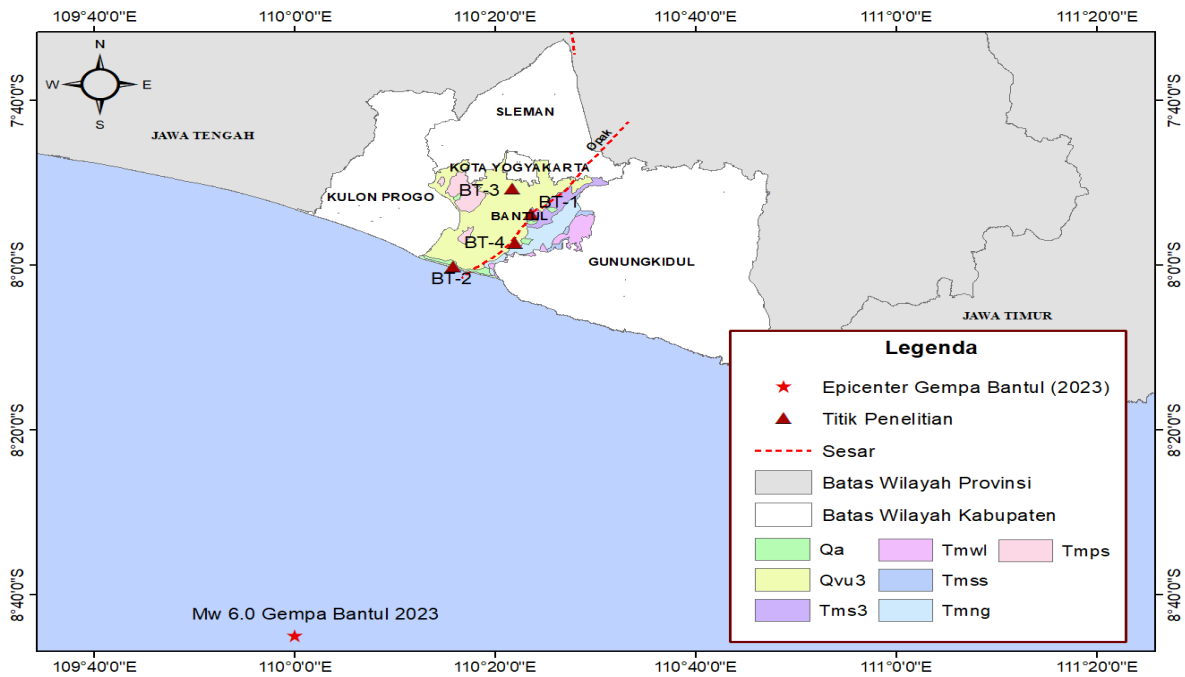
3. Faktor Amplifikasi

Parameter yang menggambarkan besarnya penguatan gelombang seismik ketika gelombang tersebut merambat dari lapisan yang lebih keras menuju lapisan yang lebih lunak disebut sebagai faktor amplifikasi. Besaran ini dipengaruhi oleh kontras impedansi antara sedimen permukaan dan batuan dasar, sehingga tanah yang lunak cenderung menghasilkan intensitas guncangan yang lebih besar dibandingkan batuan keras pada kondisi sumber gempa yang sama (Ariyanto dkk., 2024). Selain itu, nilai amplifikasi juga dapat berubah akibat kondisi fisik batuan, seperti tingkat deformasi dan pelapukan, serta dipengaruhi oleh sifat tanah setempat, misalnya ketebalan lapisan, densitas, jenis material, geometri, dan topografi. Oleh karena itu, faktor amplifikasi menjadi salah satu parameter penting dalam kajian respon tapak dan potensi kerusakan akibat gempa (Wibowo & Huda, 2020).

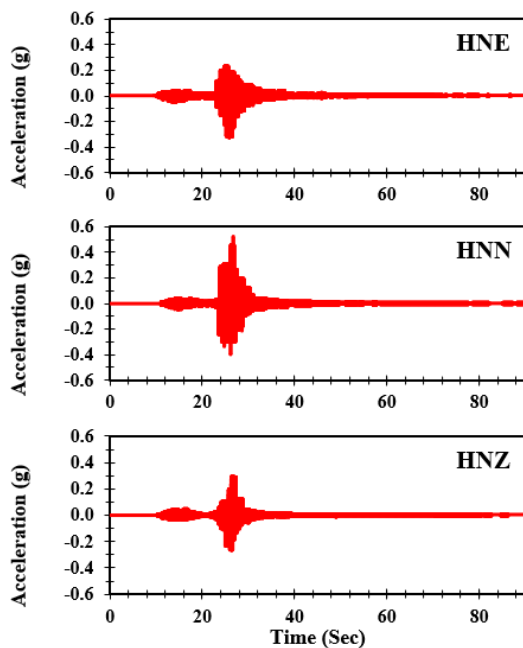
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Gambar 1 menyajikan peta lokasi dengan menunjukkan persebaran titik yang terletak di Kabupaten Bantul, yaitu Karang Semut di Kecamatan Imogiri (BT-1), Samas di Kecamatan Sanden (BT-2), Bangunharjo di Kecamatan Sewon (BT-3), dan Tempuran Sungai Opak dan Sungai Oyo di Kecamatan Imogiri (BT-4). Pengumpulan data tanah dilakukan melalui investigasi lapangan menggunakan metode *Standard Penetration Test* (SPT). Lokasi-lokasi pada titik tersebut juga menggambarkan kondisi geologi umum pada formasi Qa (Aluvium), Tms3 (Formasi Semilir), dan Qvu3 (Batuan Gunung Api Tak Terpisahkan). yang ada di Kabupaten Bantul. Selain itu, empat titik lokasi ini merupakan wilayah yang merasakan dampak gempa bumi yang cukup besar dari gempa Bantul 2023 (BPBD,2023).



Gambar 1. Peta Geologi dan Titik-Titik Lokasi Penelitian (dimodifikasi dari Indonesia Geospasial, 2020)



Gambar 2. Rekaman gempa Bantul (BMKG, 2023)

Rancangan Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan pengumpulan data SPT serta analisis data penyelidikan lokasi yang ada dari survei sebelumnya dan sumber-sumber resmi. Data peristiwa gempa (percepatan tanah dan informasi gempa) Gempa Bantul

diperoleh dari BMKG. Langkah selanjutnya adalah memperoleh prediksi percepatan tanah dan percepatan spektral dengan menggunakan model atenuasi generasi terbaru (*NGA- Subduction*) pada setiap lokasi yang diteliti. Dalam penelitian ini, rata-rata tertimbang dari tiga model *NGA-Subduction* diterapkan sebagai spektral pencocokan target. Tiga percepatan tanah digunakan untuk memperoleh percepatan spektral yang cocok pada setiap lokasi yang diselidiki. Percepatan spektral yang cocok kemudian diubah menjadi riwayat waktu percepatan. Percepatan yang dianggap sebagai gerakan masukan untuk setiap lokasi adalah gerakan masukan untuk setiap lokasi adalah percepatan tanah dengan nilai ketidakesesuaian minimum atau kurang dari 5%. Percepatan tanah yang cocok tersebut kemudian digunakan sebagai gerakan masukan untuk menganalisis respon tanah gempa pada setiap lokasi yang diselidiki. Beberapa hasil seperti profil percepatan puncak maksimum tanah, riwayat waktu percepatan, percepatan spektral di permukaan tanah, dan faktor amplifikasi situs, disajikan. Perbandingan percepatan spektral berdasarkan analisis respon tanah

juga disajikan untuk mengevaluasi keandalan Standar Desain Gempa Indonesia. Diagram alir analisis respon seismik ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian (penulis, 2026)

Pada penelitian ini, tiga model pergerakan tanah NGA-Sub digunakan untuk menghitung percepatan spektral dan percepatan puncak tanah di setiap lokasi: KBCG20 (Kuehn dkk., 2020), PSBAH20 (Parker dkk., 2020) dan AG22 (Abrahamson & Gulerce, 2022). Model-model ini memungkinkan perhitungan respon spektra elastis dengan redaman 5% untuk skenario individu. Penelitian ini menggunakan kombinasi rata-rata dari model KBCG20, PSBAH20, dan AG22 *NGA-Subduction* untuk membangun spektrum respon elastis target. Formulasi rata-rata tertimbang ini mengikuti implementasi yang dikembangkan oleh Mazzoni (2022) dalam alat *Excel/Visual Basic NGA-Subduction Ground-Motion Models*, yang memungkinkan

penggabungan beberapa model percepatan tanah untuk menggambarkan ketidakpastian epistemik dalam prediksi gerakan tanah. Hal ini didasari tidak adanya bukti yang meyakinkan yang mendukung satu model di atas yang lain untuk wilayah studi, dan sejalan dengan praktik umum dalam analisis bahaya gempa dan respon spesifik lokasi untuk mengurangi bias yang bergantung pada model. Selain itu, percepatan spektral dari rata-rata tertimbang ketiga model tersebut dipilih sebagai respon spektra yang digunakan dalam menganalisis respon seismik pada lapisan tanah.

Berikut persamaan yang digunakan untuk menganalisis respon seismik :

1. Menghitung ukuran *mesh* profil tanah

Menurut Hashash (2017), *mesh* atau ketebalan lapisan maksimum harus diperhitungkan dalam analisis.

$$d = \frac{V_s}{4f_{max}}$$

Keterangan :

- d = Mesh
- V_s = Kecepatan gelombang geser (m/s)
- f_{max} = Frekuensi maksimum

2. Menghitung faktor amplifikasi
Menurut Hashash (2017), faktor amplifikasi diperoleh dari persamaan berikut :

$$AF = \frac{PGA_{permukaan}}{PGA_{input}}$$

Keterangan :

- AF = Faktor amplifikasi
- $PGA_{permukaan}$ = Percepatan puncak tanah di permukaan tanah (g)
- PGA_{input} = Percepatan puncak tanah di batuan dasar (*input*) (g)

Gambar 4 menampilkan hasil penyelidikan tanah. Berdasarkan penentuan kelas situs SNI 1726:2019 menunjukkan bahwa area BT-1, BT-2, BT-3, dan BT-4 termasuk kategori tanah

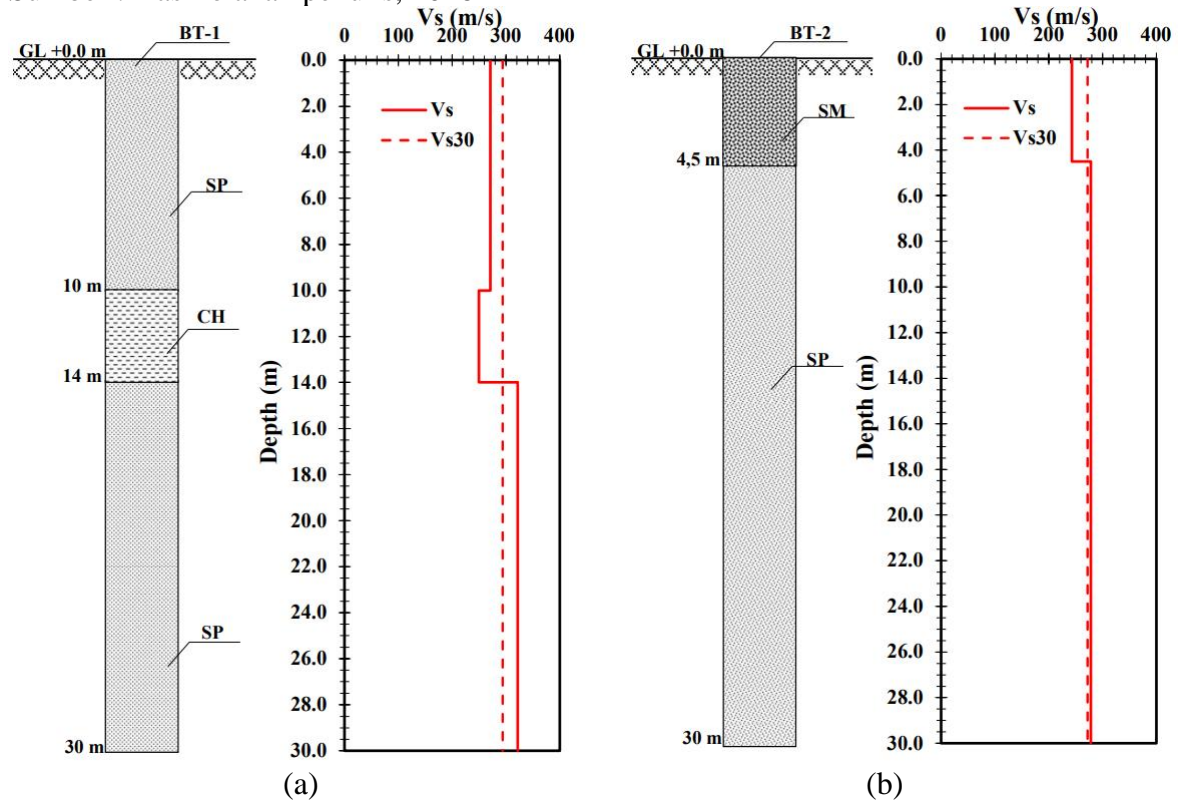
sedang (SD) dan tanah keras (SC). Area ini didominasi oleh perlapisan tanah pasir yang diklasifikasikan sebagai pasir bergradasi buruk (SP), pasir berlanau (SM), dan kerikil bergradasi buruk (GP).

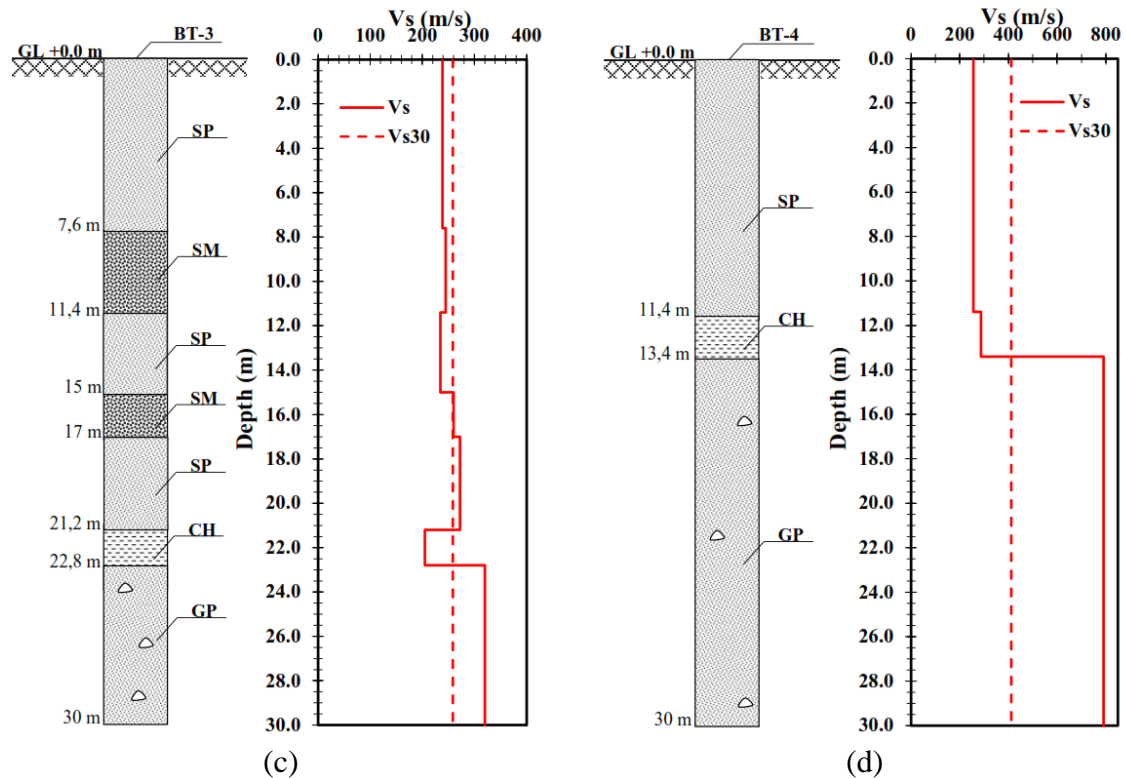
Beberapa titik lokasi yang diteliti juga ditemukan lapisan lempung tipis, yang diklasifikasikan sebagai lempung berplastisitas tinggi (CH).

Tabel 2. Hasil Klasifikasi Kelas Situs Berdasarkan Parameter Vs30

Titik	Lokasi	Kelas Situs (SNI 1726:2019)	Vs30 (m/s)
BT-1	Karang Semut, Imogiri, Bantul	SD	294
BT-2	Samas, Sanden, Bantul	SD	272
BT-3	Bangunharjo, Sewon, Bantul	SD	259
BT-4	Tempuran Sungai Opak Oyo, Imogiri Bantul	SC	412

Sumber : Hasil olahan penulis, 2026





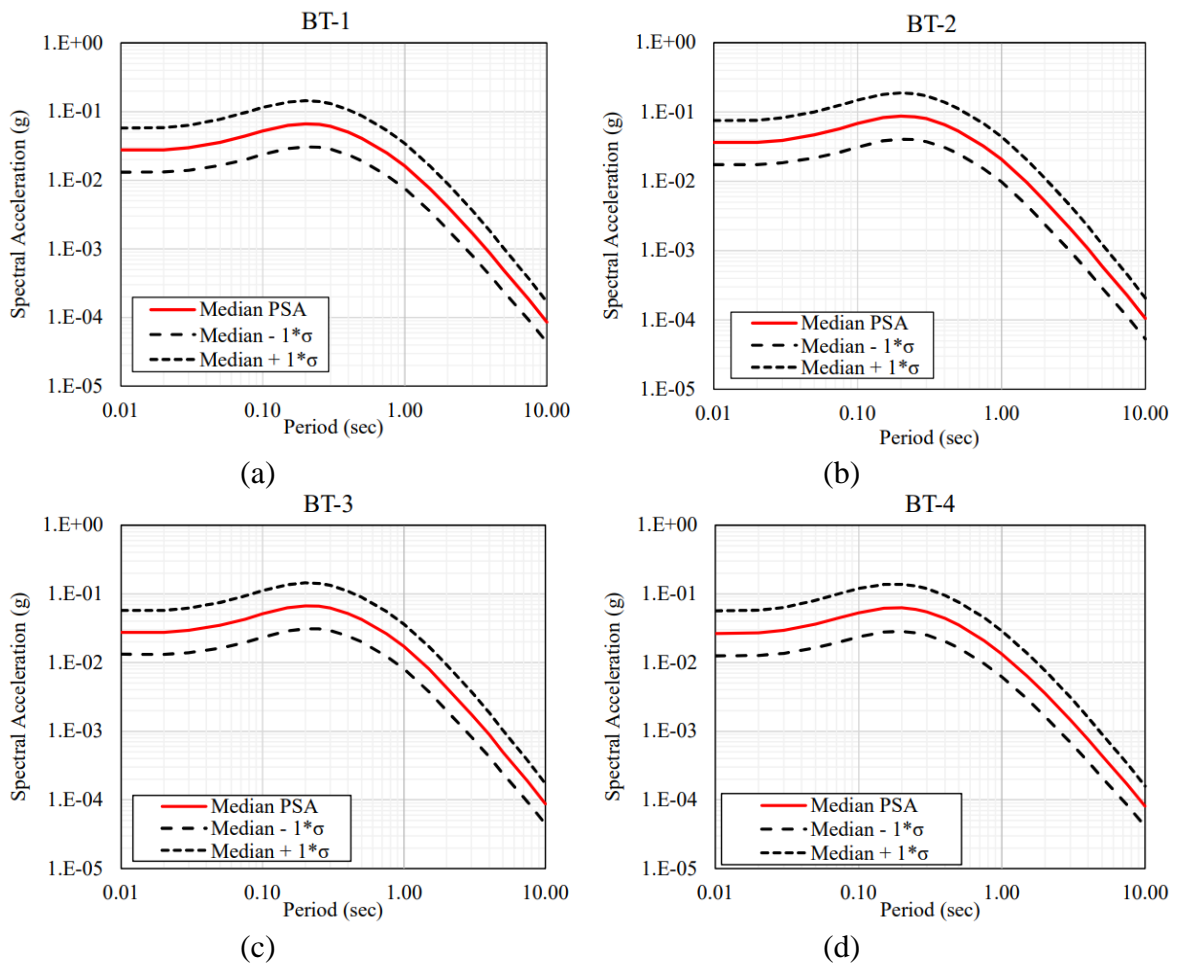
Gambar 4. Hasil penyelidikan tanah (a) BT-1, (b) BT-2, (c) BT-3, dan (d) BT-4 (penulis, 2026)

HASIL PENELITIAN

NGA-Subduction

Hasil analisis model *NGA-Subduction* untuk setiap lokasi yang diteliti disajikan pada Gambar 5. Pada Gambar 5, terdapat empat kurva respon spektra lokasi yang dihasilkan dari analisis model *NGA-Sub*. Akselerasi spektral pada setiap lokasi mencakup satu kurva median dan dua kurva deviasi standar. Berdasarkan analisis model *NGA-Subduction*, pada lokasi-lokasi yang diteliti, akselerasi tanah puncak (PGA) diamati bervariasi dari 0,027 g hingga 0,037 g. Nilai PGA maksimum ditemukan di BT-2 dan nilai PGA minimum terdapat pada BT-4. Nilai ini diperoleh karena posisi BT-2 dekat dengan pusat gempa,

sedangkan BT-4 lebih jauh dari pusat gempa. Percepatan tanah yang representatif dipilih menggunakan nilai selisih rata-rata minimum antara tiga percepatan tanah yang disajikan pada Gambar 2. Huruf tebal pada Tabel 3 menunjukkan percepatan tanah yang paling cocok di setiap lokasi. Gerakan HNN dapat diandalkan untuk gerakan berskala pada BT-2 dan BT-4. Gerakan HNE dapat diandalkan untuk gerakan berskala pada BT-1. Gerakan HNZ dapat diandalkan untuk gerakan berskala pada BT-3. Percepatan tanah yang digunakan sebagai *input motion* pada setiap lokasi yang diteliti berbeda-beda. Berdasarkan hasil analisis, *Peak Ground Acceleration* (PGA) dari analisis pencocokan spektral diamati bervariasi dari 0,041 g hingga 0,060 g.



Gambar 5. Hasil Analisis *NGA-Subduction* (a) BT-1, (b) BT-2, (c) BT-3, dan (d) BT-4 (penulis, 2026)

Tabel 3. Hasil Pencocokan Percepatan Spektral dan Percepatan Tanah

Lokasi	Percepatan Tanah	Status	Ketidaksesuaian Minimum
BT-1	HNE	Converged	3,40%
	HNN	<i>Converged</i>	3,40%
	HNZ	<i>Non Converged</i>	1,80%
BT-2	HNE	<i>Converged</i>	3,50%
	HNN	Converged	2,80%
	HNZ	<i>Converged</i>	5,50%
BT-3	HNE	<i>Non Converged</i>	8,40%
	HNN	<i>Converged</i>	4,50%
	HNZ	Converged	2,40%
BT-4	HNE	<i>Non Converged</i>	5,80%
	HNN	<i>Converged</i>	4,60%
	HNZ	<i>Non Converged</i>	7,60%

Sumber : Hasil analisis penulis, 2026

Peak Ground Acceleration (PGA)

Hasil analisis *Peak Ground Acceleration* (PGA) metode nonlinear pada titik BT-1 hingga BT-4 dapat dilihat pada Gambar 7. Secara keseluruhan, nilai PGA di permukaan tanah yang diperoleh

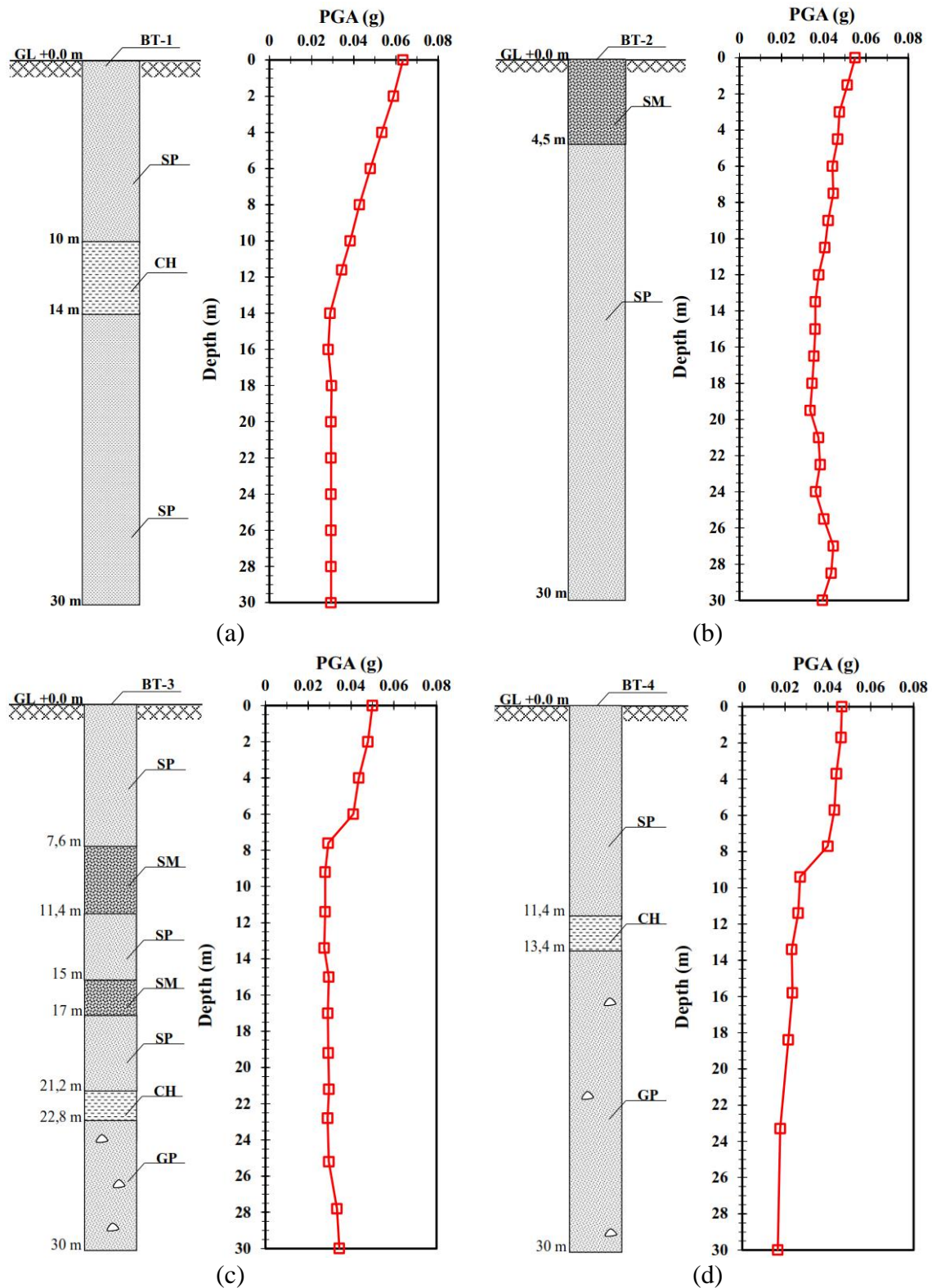
lebih tinggi daripada PGA di lapisan bawah. Nilai PGA di permukaan tanah bervariasi antara 0,047 g hingga 0,063 g. BT-1 memiliki nilai PGA permukaan tertinggi, yaitu sekitar 0,074 g, sedangkan BT-4 memiliki nilai PGA terendah, yaitu

sekitar 0,047 g. Berdasarkan tingkat guncangan, nilai PGA 0,047 g - 0,063 g termasuk gempa sedang. Berdasarkan karakteristik tanah, BT-1 dengan nilai V_{S30} sebesar 294 m/s memperoleh nilai PGA permukaan sebesar 0,063 g, lebih tinggi dibandingkan PGA input sebesar 0,052 g. Respon ini menunjukkan bahwa tanah pada lokasi tersebut masih cukup responsif terhadap perambatan gelombang seismik. Kombinasi lapisan pasir bergradasi buruk (SP) dan lempung plastis tinggi (CH) menghasilkan perbedaan kekakuan yang kontras, sehingga mendorong peningkatan percepatan akibat interaksi gelombang antar lapisan. Nilai V_{S30} yang berada pada kategori tanah sedang turut mengindikasikan bahwa tanah memiliki kapasitas deformasi dinamik yang cukup besar. Berbeda dengan kondisi tersebut, BT-2 dengan nilai V_{S30} sebesar 272 m/s menunjukkan PGA permukaan sebesar 0,055 g, yang justru lebih rendah dibandingkan PGA input sebesar 0,060 g. Hal ini mengindikasikan bahwa respon percepatan di permukaan tidak mengalami peningkatan. Profil tanah yang relatif homogen, didominasi oleh pasir berlanau (SM) dan pasir (SP), menyebabkan gelombang merambat secara lebih stabil tanpa mengalami interaksi yang signifikan antar lapisan. Dengan demikian, meskipun nilai V_{S30} tergolong rendah, ketiadaan kontras impedansi yang kuat membatasi peningkatan respon percepatan. Pada BT-3, nilai V_{S30} sebesar 259 m/s yang merupakan nilai terendah di antara seluruh titik penelitian berkorelasi dengan PGA permukaan sebesar 0,050 g dari PGA input sebesar 0,040 g. Kondisi ini mencerminkan respon tanah yang lebih sensitif terhadap beban dinamik. Profil tanah yang tersusun atas kombinasi SP, SM, CH, dan GP menunjukkan tingkat heterogenitas yang tinggi, sehingga memperbesar peluang terjadinya interaksi gelombang yang kompleks. Nilai V_{S30}

yang rendah semakin memperkuat kecenderungan tersebut, karena tanah dengan kekakuan rendah cenderung mengalami deformasi yang lebih besar. Sementara itu, BT-4 memiliki nilai V_{S30} sebesar 412 m/s yang termasuk dalam kelas situs C. Pada lokasi ini, PGA permukaan sebesar 0,047 g relatif lebih rendah dibandingkan titik lainnya, dengan PGA input sebesar 0,041 g. Kondisi ini mencerminkan karakteristik tanah yang lebih kaku, sehingga respon terhadap gelombang gempa menjadi lebih terkendali. Nilai V_{S30} yang tinggi menunjukkan bahwa tanah memiliki kemampuan yang lebih baik dalam meredam energi gelombang, sehingga amplitudo percepatan di permukaan tidak mengalami peningkatan yang signifikan.

Faktor Amplifikasi

Perbesaran gelombang yang terjadi saat gempa dapat dipengaruhi oleh formasi geologi yang beragam, sifat fisis, dan ketebalan lapisan batuan (Aditama dkk, 2020). Pada BT-1 yang berada pada satuan Tms3 (Formasi Semilir), nilai faktor amplifikasi 1,23 menunjukkan adanya penguatan sedang. Kondisi ini sejalan dengan karakteristik profil tanah yang terdiri dari kombinasi SP dan CH, yang menciptakan kontras impedansi yang cukup jelas. Nilai V_{S30} sebesar 294 m/s menunjukkan bahwa tanah berada pada kondisi sedang, sehingga masih memungkinkan terjadinya peningkatan respon dinamik akibat interaksi antar lapisan. Formasi Semilir secara regional tersusun oleh material vulkaniklastik seperti tuf, tuf lapili, lapili batuapung, breksi batuapung, batupasir tufan, dan serpih, sehingga bila lapisan dangkalnya telah mengalami pelapukan atau tersusun oleh material yang lebih lepas, responnya tetap dapat bersifat memperkuat gelombang.



Gambar 6. Hasil Analisis Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) (a) BT-1, (b) BT-2, (c) BT-3, dan (d) BT-4 (penulis, 2026)

BT-1 merepresentasikan kondisi tanah sedang yang belum cukup kaku untuk meredam rambatan gelombang secara signifikan. BT-2 yang terletak pada

satuan Qa (Alluvium), secara geologi unit ini umumnya tersusun oleh lempung, lumpur, lanau, pasir, kerikil, kerakal, dan berangkal, sehingga pada banyak kasus

alluvium memang identik dengan material permukaan yang lebih lepas. Namun pada titik ini faktor amplifikasinya justru 0,91, artinya PGA permukaan sedikit lebih kecil daripada PGA input. BT-2 memiliki profil tanah yang lebih seragam atau kontras impedansinya tidak terlalu besar, sehingga gelombang tidak mengalami pembesaran yang kuat. Meskipun nilai V_{S30} sebesar 272 m/s termasuk dalam kategori tanah sedang, profil tanah yang relatif homogen menyebabkan energi gelombang tidak terfokus pada lapisan tertentu. Hal ini menghasilkan respon yang lebih stabil dan tidak menunjukkan peningkatan amplitudo yang signifikan. Perbedaan yang menarik terlihat pada BT-3 dan BT-4, karena keduanya sama-sama berada pada satuan Q_{vu3} yang diidentifikasi sebagai batuan gunung api tak terpisahkan. Secara umum, endapan gunung api muda di Yogyakarta/Merapi dapat terdiri atas lava, breksi vulkanik, lapili, tuf, abu, aglomerat, dan material gunung api lain yang bercampur, sehingga sifat geotekniknya dapat berubah cukup besar dari satu lokasi ke lokasi lain. BT-3 termasuk kategori kelas situs D, dan faktor amplifikasi sebesar 1,25, sedangkan BT-4 dikategorikan kelas situs C dan faktor amplifikasi sebesar 1,13. Artinya,

walaupun keduanya masih berada dalam satuan geologi regional yang sama, BT-3 berperilaku lebih lunak dan lebih responsif terhadap penguatan gelombang, sedangkan BT-4 lebih kaku sehingga amplifikasinya lebih kecil. Pada BT-3, nilai V_{S30} sebesar 259 m/s diindikasikan sebagai tanah yang lebih lunak dan lebih mudah mengalami deformasi. Heterogenitas lapisan yang tinggi semakin memperkuat kondisi ini, karena perbedaan sifat mekanik antar lapisan meningkatkan potensi terjadinya penguatan gelombang. BT-4 dengan nilai V_{S30} sebesar 412 m/s mencerminkan kondisi tanah yang lebih kaku, sehingga respon dinamik menjadi lebih terkendali. Meskipun masih terjadi amplifikasi, besarnya relatif lebih kecil karena kemampuan tanah dalam meredam energi gelombang lebih baik. Hasil ini menunjukkan bahwa nama formasi geologi regional tidak selalu langsung berbanding lurus dengan nilai amplifikasi pada satu titik. Geologi regional memberi kerangka awal, tetapi respon gempa di tiap titik lebih tepat ditentukan oleh kombinasi antara litologi lokal, profil tanah, dan nilai V_{S30} .

Tabel 4. Hasil Analisis PGA dan Nilai Faktor Amplifikasi

Titik	PGA Permukaan (g)	PGA Input (g)	Faktor Amplifikasi
BT-1	0,063	0,052	1,23
BT-2	0,055	0,060	0,91
BT-3	0,050	0,040	1,25
BT-4	0,047	0,041	1,13

Sumber : Hasil analisis penulis, 2026

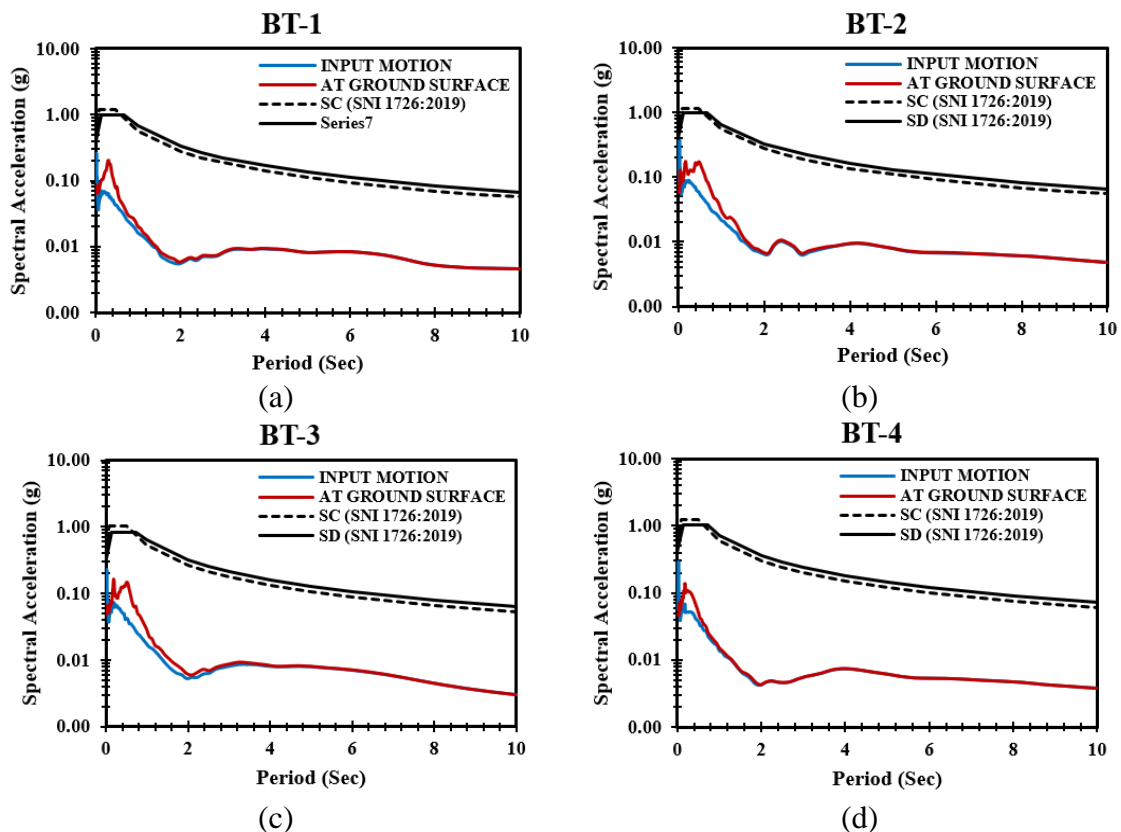
Percepatan Respon Spektra

Gambar 7 menyajikan perbandingan hasil analisis percepatan respon spektra terhadap SNI 1726:2019. Hasil analisis percepatan respon spektra memperlihatkan bahwa respon di permukaan tanah cenderung lebih besar dibandingkan *input motion*, terutama pada periode pendek, yang berkaitan dengan

karakteristik tanah dan nilai V_{S30} di masing-masing lokasi. Pada BT-1 peningkatan respon spektra pada periode pendek cukup jelas, yang mencerminkan dominasi respon pada frekuensi tinggi. Hal ini berkaitan dengan keberadaan lapisan tanah dengan kekakuan sedang yang masih mampu memperkuat gelombang, terutama akibat interaksi

dengan lapisan yang lebih lunak di dekat permukaan. Pada BT-2 respon spektra cenderung lebih rendah dan tidak menunjukkan puncak yang menonjol. Profil tanah yang homogen menyebabkan distribusi frekuensi alami menjadi lebih seragam, sehingga tidak terjadi amplifikasi yang signifikan pada periode tertentu. Pada BT-3 respon spektra menunjukkan peningkatan yang paling menonjol, terutama pada periode pendek hingga menengah. Kondisi ini mencerminkan sensitivitas tanah terhadap gelombang seismik akibat kombinasi antara nilai V_{S30} yang rendah dan heterogenitas lapisan yang tinggi.

Sebaliknya, pada BT-4 respon spektra relatif lebih stabil dengan amplitudo yang lebih kecil. Kondisi tanah yang lebih kaku menyebabkan respon terhadap gelombang gempa menjadi lebih terkendali, sehingga tidak terjadi peningkatan yang signifikan pada periode pendek. Jika dibandingkan dengan spektra desain berdasarkan SNI 1726:2019, seluruh hasil respon spektra masih berada di bawah kurva desain. Hal ini menunjukkan bahwa respon seismik pada lokasi penelitian secara umum masih berada dalam batas yang diakomodasi oleh standar perencanaan.



Gambar 7. Hasil Analisis Respon Spektra (a) BT-1, (b) BT-2, (c) BT-3, dan (d) BT-4 (penulis, 2026)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, respon seismik nonlinier di Kabupaten Bantul akibat Gempa Bantul 2023 menunjukkan bahwa perilaku rambatan gelombang seismik sangat

dipengaruhi oleh kombinasi antara karakteristik percepatan tanah yang diperoleh dari model *atenuasi NGA-Subduction* dan kondisi tanah lokal yang direpresentasikan melalui nilai V_{S30} , kelas situs, serta profil stratigrafi. Variasi nilai V_{S30} pada empat titik penelitian yang berkisar antara 259–412 m/s

mengindikasikan adanya perbedaan kekakuan tanah yang cukup signifikan, dengan dominasi kelas situs D dan satu titik termasuk kelas C, sehingga menghasilkan variasi respon dinamik tanah di setiap lokasi. Nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) permukaan yang diperoleh berada pada rentang 0,047–0,063 g yang termasuk dalam kategori guncangan sedang, namun distribusi nilai tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh jarak terhadap sumber gempa, melainkan juga oleh kondisi lapisan tanah yang mengontrol proses amplifikasi maupun deamplifikasi gelombang. Lokasi dengan lapisan tanah yang heterogen dan memiliki kontras impedansi yang tinggi cenderung mengalami peningkatan percepatan di permukaan, sedangkan lokasi dengan profil tanah yang lebih homogen menunjukkan respon yang lebih stabil atau bahkan mengalami penurunan amplitudo. Nilai faktor amplifikasi yang berkisar antara 0,91–1,25 menunjukkan bahwa respon tanah tidak selalu mengalami penguatan, tetapi sangat bergantung pada sifat fisik tanah, ketebalan lapisan, serta interaksi antar lapisan selama perambatan gelombang seismik. Hasil analisis percepatan respon spektra memperlihatkan bahwa respon di permukaan tanah umumnya mengalami peningkatan pada periode pendek, yang berkaitan dengan karakteristik tanah dangkal yang lebih responsif terhadap frekuensi tinggi, meskipun seluruh kurva respon spektra yang dihasilkan masih berada di bawah spektra desain SNI 1726:2019 sehingga secara umum masih berada dalam batas aman untuk perencanaan struktur. Dengan demikian, tujuan penelitian untuk mengidentifikasi parameter gelombang gempa serta mengevaluasi pengaruh kondisi tanah lokal terhadap respon seismik telah tercapai. Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah berupa penerapan pendekatan terintegrasi antara model atenuasi *NGA-Subduction* dan analisis respon tanah nonlinier untuk

menghasilkan estimasi respon seismik yang lebih representatif berbasis kondisi lokasi spesifik, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam evaluasi bahaya gempa, pengembangan kajian mikrozonasi seismik, serta perencanaan bangunan tahan gempa yang lebih adaptif terhadap kondisi geologi lokal di Kabupaten Bantul lebih adaptif terhadap kondisi tanah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Unit Penelitian Bahaya Geoteknik Fakultas Teknik Universitas Bengkulu yang telah membantu pengolahan data dalam penelitian penulis.

DAFTAR PUSTAKA

- Abrahamson, N. A., & Gulerce, Z. (2022). Summary of the Abrahamson and Gulerce NGA-SUB ground-motion model for subduction earthquakes. *Earthquake Spectra*, 38(4), 2638–2681. <https://doi.org/10.1177/87552930221114374>
- Agus Ariyanto, A. F., , Yudha Styawan , Intan Andriani Putri, W. E. J., Prasetyo, N., & , Reza Rizki, R. W. (2024). Kemiling Dan Sekitarnya Seismic Vulnerability Microzonation Through Hvsr Microtremor Analysis in the Kemiling. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(02).
- Badan Standardisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Nongedung*. Jakarta: BSN.
- BMKG. (2023). *Ulasan Gempa Bantul 30 Juni 2023*. <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/ulasan-guncangan-tanah/ulasan-guncangan-tanah-akibat-gempabumi-barat-daya-bantul-diy-30-juni-2023>
- BPBD Daerah Istimewa Yogyakarta.

- (2023). *Laporan situasi gempa bumi DIY (30 Juni 2023)*. [https://bpbdd.jogjaprovo.go.id/berita/laporan-situasi-gempa-bumi-diy-30-juni-2023-\[1 Juli 2023\]](https://bpbdd.jogjaprovo.go.id/berita/laporan-situasi-gempa-bumi-diy-30-juni-2023-[1%20Juli%202023])
- Bustari, A. A., & Wibowo, N. B. (2023). Pemetaan sebaran nilai Vs30, faktor amplifikasi tanah, dan peak ground acceleration wilayah Bantul timur. *Cakrawala Jurnal Ilmiah Bidang Sains*, 1(2). <https://doi.org/10.28989/cakrawala.v1i2.1436>
- Geospasial, I. (2020). Download Shapefile Geologi Seluruh Indonesia. In *Indonesia Geospasial*. <https://www.indonesia-geospasial.com/2020/03/download-data-shapefile-shp-geologi-se.html>
- Hashash, Y. M. A., Musgrove, M. I., Harmon, J. A., Ilhan, O., Groholski, D. R., Phillips, C. A., & Park, D. (2017). *DEEPSOIL 7.0, User Manual*. University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Kristiyanto, M., Pramono, S., Pariatmono, & Wallansha, R. (2022). Pengembangan Spektra Respon Elastis Gempa Mamuju Sebagai Rekomendasi Spektra Respon Untuk Bangunan Gedung di Indonesia. *Syntax Literate: Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(8.5.2017), 2929–2942.
- Kuehn, N. M., Bozorgnia, Y., Campbell, K. W., & Gregor, N. (2020). Partially Non-Ergodic Ground-Motion Model for Subduction Regions using the NGA-Subduction Database. *PEER Report 2020/04, September*, 1–187.
- Liu, Y., Zhao, Q., & Wang, Y. (2024). Peak ground acceleration prediction for on-site earthquake early warning with deep learning. *Scientific Reports*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56004-6>
- Mase, L. Z., & Likitlersuang, S. (2021). Implementation of Seismic Ground Response Analysis in Estimating Liquefaction Potential in Northern Thailand. *Indonesian Journal on Geoscience*, 8(3), 371–383. <https://doi.org/10.17014/ijog.8.3.371-383>
- Mase, L. Z., Somantri, A. K., Chaiyaput, S., Febriansya, A., & Syahbana, A. J. (2023). Analysis of ground response and potential seismic damage to sites surrounding Cimandiri Fault, West Java, Indonesia. In *Natural Hazards* (Vol. 119, Nomor 3). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06157-w>
- Mazzoni, S. (2022). *NGA-Subduction Ground-Motion Models Excel/VisualBasic R221103*. The B. John Garrick Institute for the Risk Sciences. <https://doi.org/10.34948/N3J01B>
- Parker, G. A., Stewart, J. P., Boore, D. M., Atkinson, G. M., & Hassani, B. (2020). *PACIFIC EARTHQUAKE ENGINEERING RESEARCH CENTER NGA-Subduction Global Ground-Motion Models with Regional Adjustment Factors. August*.
- R, S. R., & Madrinovella, I. (2024). Spatial and Temporal B-Value Analysis of the Yogyakarta Region Using Earthquake Data 1960 – 2024. *JGE (Jurnal Geofisika Eksplorasi)*, 10(3), 191–203. <https://doi.org/10.23960/jge.v10i3.468>
- Saputra, A., Gomez, C., Delikostidis, I., Zawar-Reza, P., Hadmoko, D. S., Sartohadi, J., & Setiawan, M. A. (2018). Determining earthquake susceptible areas southeast of yogyakarta, Indonesia—outcrop analysis from structure from motion (SfM) and geographic information system (GIS). *Geosciences (Switzerland)*, 8(4). <https://doi.org/10.3390/geosciences8040132>
- Saputro, I. T., & Momot, H. (2020). Pemutakhiran Peta Sebaran Gempa

- Bumi Berdasarkan Magnitudo Dan Kedalaman Di Wilayah Provinsi Papua Barat Pada 50 Tahun Terakhir. *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi)*, 10(1), 1–9.
- Setiawan, A., Sholeha, D. Z., Kausari, A., Hadi, A. I., Fisika, J., Bengkulu, U., Limun, K., & Bangkahulu, M. (2023). Analisis potensi likuifaksi berdasarkan kecepatan gelombang seismik kota Bengkulu. *18(1)*, 80–93.
- Sunardi, B., Ngadmanto, D., Rohadi, S., Susanti, D. B., & Imani, R. (2022). Seismic hazard analysis of surface level in Tasikmalaya City. *International Journal of Dynamics in Engineering and Sciences*, 7(2), 161–171.
- Susri Nurhaci, D., Setianto, A., & Wilopo, W. (2024). Analysis and Evaluation of Earthquake Hazard Zones Based on Spatial Models for Regency Regional Development Bantul. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1373(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1373/1/012014>
- Taruna, R. M., Sungkono, S., Mase, L. Z., Lestari, S., Septiadhi, A., Pramono, S., & Mashuri, M. (2025). Evaluation of Shallow Crustal Ground Motion Models for West Nusa Tenggara Region, Indonesia. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 12(5). <https://doi.org/10.1007/s40515-025-00604-w>
- Tidiesya, T., Jasmine, K. A., Khairunnisa, N., & Jalaludin, M. (2025). Analysis of Vulnerability to Earthquake Hazard in Bantul Regency, Yogyakarta. *Jurnal Penelitian Geografi*, 13(1), 63–76. <https://doi.org/10.23960/jpg.v13.i1.32579>
- Utami, F., Mase, L. Z., Supriani, F., & Mahendra, Y. (2023). Pemanfaatan Analisis Perambatan Gelombang Seismik dan Implementasinya pada Struktur Bangunan. *Potensi: Jurnal Sipil Politeknik*, 25(1), 9–14. <https://doi.org/10.35313/potensi.v25i1.4583>
- Wibowo, N. B., & Huda, I. (2020). ANALYSIS OF AMPLIFICATION, SEISMIC VULNERABILITY INDEX AND SOIL CLASIFICATION BASED ON Vs30 IN YOGYAKARTA. *Buletin Meteorologi, Klimatologi, Dan Geofisika*, 1(2), 21–31. <http://usgs.maps.arcgis.com/apps/web>