

Studi Perbandingan Respons Seismik Tanah Berdasarkan Metode Linier Ekuivalen dan Nonlinier

Comparative Study of Soil Seismic Response Based on Equivalent Linear and Nonlinear Methods

Debby Ariansyah Ahmad, Lindung Zalbuin Mase, Fepy Supriani, Rena Misliniyati, Khairul Amri

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

Article Info

Article history:

Received 05, Juni, 2024

Revised 24, Oktober, 2024

Accepted 27, Oktober, 2024

Kata Kunci

Analisis respons seismik tanah

Faktor amplifikasi

Peak ground acceleration

Respons spektra percepatan

Riwayat waktu percepatan gempa

Abstrak

Sejarah kegempaan Bengkulu mencatat bahwa gempa bumi berkekuatan 8,6 M_w tahun 2007 merupakan gempa terbesar yang melanda Provinsi Bengkulu. Gempa tersebut menimbulkan dampak yang besar sehingga banyak menelan korban jiwa dan menghancurkan fasilitas umum terutama di wilayah Pesisir Selatan Provinsi Bengkulu. Merujuk pada kejadian tersebut, diperlukan analisis respons seismik tanah. Penelitian bertujuan untuk membandingkan respons tanah terhadap gempa dengan metode linier ekuivalen dan metode nonlinier. Informasi yang berkaitan dengan profil tanah dan data gelombang gempa berdasarkan gempa yang pernah terjadi di Kota Bengkulu dikumpulkan. Tahapan analisis respons seismik linier ekuivalen dan nonlinier satu dimensi menggunakan program analisis respons seismik satu dimensi *DeepSoil*. *Peak ground acceleration* (PGA), riwayat waktu percepatan gempa, respons spektra percepatan, dan faktor amplifikasi dianalisis dalam studi ini. Hasil penelitian diperoleh bahwa metode linier ekuivalen menghasilkan nilai lebih tinggi dibandingkan metode nonlinier untuk semua parameter. Nilai PGA model nonlinier berkisar antara 0,31g hingga 0,51g sedangkan nilai PGA model linier ekuivalen berkisar antara 0,46g hingga 0,60g. Respons spektra percepatan telah melebihi desain seismik yang berlaku, dengan nilai maksimum pada periode 0,2 hingga 1 detik sebesar 0,10g hingga 2,74g. Faktor amplifikasi metode nonlinier adalah 0,94 - 1,65, sedangkan faktor amplifikasi metode linier ekuivalen adalah 1,38 - 1,82. Temuan yang diperoleh menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki tingkat kerentanan seismik yang tinggi dan perlu dilakukan pembaruan pada desain respons seismik untuk perencanaan bangunan di wilayah Pesisir Selatan Provinsi Bengkulu.

Abstract

The seismic history of Bengkulu records a magnitude 8.6 M_w earthquake in 2007 as the largest earthquake ever to strike the province. The earthquake caused significant impacts, resulting in numerous casualties and the destruction of public infrastructure, particularly in the southern coastal area of Bengkulu Province. In response to this event, a seismic site response analysis was carried out. This study aims to compare ground response to earthquakes using the equivalent linear and nonlinear methods. Relevant data related to soil profiles and ground motion records from past earthquakes in Bengkulu City were collected. The one-dimensional

Keywords:

Seismic ground response analysis

Amplification factor

Peak ground acceleration

Acceleration response spectra

Earthquake acceleration time history

equivalent linear and nonlinear site response analyses were conducted using the DeepSoil program. Peak Ground Acceleration (PGA), ground motion time history, acceleration response spectra, and amplification factors were analyzed in this study. The results show that the equivalent linear method produced higher values than the nonlinear method for all parameters. The PGA values for the nonlinear method ranged from 0,31g to 0,51g, while those for the equivalent linear method ranged from 0,46g to 0,60g. The acceleration response spectra exceeded the applicable seismic design standards, with peak values occurring at periods between 0,2 and 1 second, ranging from 0,10g to 2,74g. Amplification factors for the nonlinear method ranged from 0,94 to 1,65, while for the equivalent linear method they ranged from 1,38 to 1,82. These findings indicate a high level of seismic vulnerability in the study area, highlighting the need to update seismic response design provisions for building construction in the southern coastal region of Bengkulu Province.

Corresponding Author: Ahmad, debbyah22@gmail.com

A. PENDAHULUAN

Provinsi Bengkulu merupakan provinsi yang terletak di pesisir barat Pulau Sumatera. Bengkulu terletak pada pertemuan lempeng tektonik Indo-Australia dan Eurasia serta dilalui oleh Patahan Sumatra dan Patahan Mentawai (Mase, dkk., 2021b). Dalam kurun waktu 20 tahun terakhir, Provinsi Bengkulu telah mengalami dua kali gempa bumi berskala besar. Gempa bumi terbesar terjadi pada tahun 2000 dan 2007. Dengan kekuatan 7,9 M_w kekuatan 8,6 M_w (Mase, 2017a). Gempa bumi yang terjadi pada tanggal 12 September 2007 menunjukkan tingkat kerusakan paling tinggi dalam dua dekade terakhir (Mase, 2015). Gempa yang terjadi menyebabkan kerusakan besar pada bangunan dan fasilitas umum khususnya di sepanjang pantai wilayah administratif Bengkulu Selatan (Misliniyati, dkk., 2018). Perlu dilakukan upaya untuk meningkatkan mitigasi dan mengurangi kerusakan bangunan di Provinsi Bengkulu akibat dampak gelombang seismik (Mase, 2020).

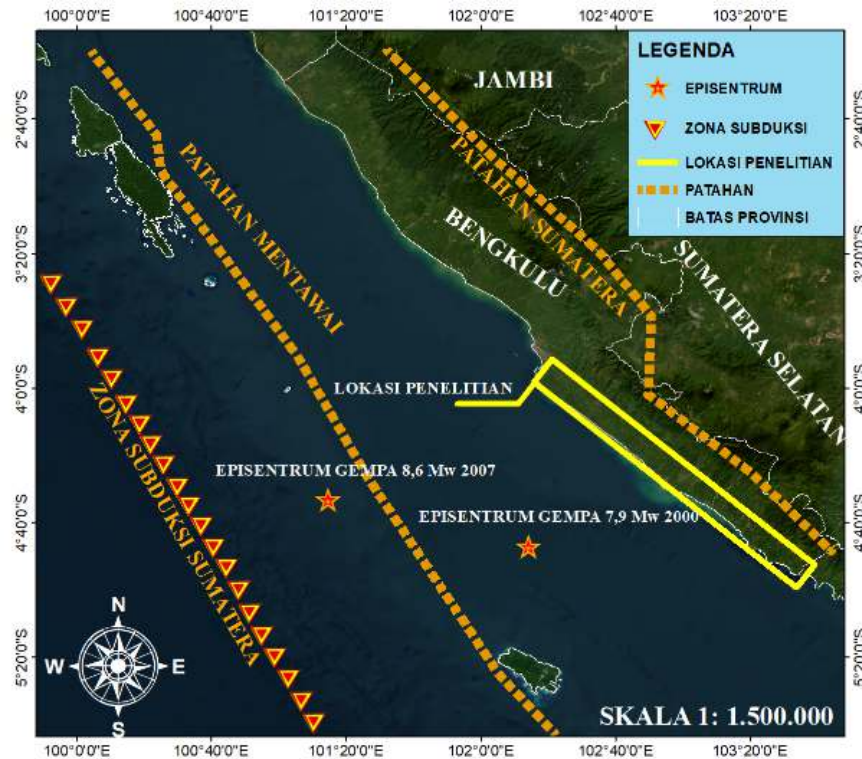
Gambar 1 menunjukkan peta kondisi tektonik Provinsi Bengkulu. Gambar 1 memperlihatkan Provinsi Bengkulu berada di sekitar beberapa

sumber gempa aktif dengan tiga sumber utama yaitu zona subduksi sumatera, sesar mentawai, dan sesar sumatera (Mase, 2020). Dampak dari ketiga sumber gempa tersebut mengakibatkan terjadinya bencana gempa bumi di daerah pesisir. Provinsi Bengkulu yang terletak dekat dengan sumber-sumber gempa tersebut kerap mengalami tingkat kerentanan seismik yang tinggi (Misliniyati, dkk., 2018).

Penelitian-penelitian terdahulu umumnya berfokus pada pemahaman karakteristik gempa bumi dan menyelidiki kerentanan kerusakan tanah saat gempa bumi. Mase, (2015) melakukan penyelidikan terkait karakteristik gempa di Kota Bengkulu. Hasil menunjukkan bahwa gempa bumi yang terjadi pada tanggal 12 September 2007 dengan tingkat kerusakan gempa tertinggi dalam 20 tahun terakhir. Mase, (2017a), melakukan penyelidikan terkait respons seismik tanah di wilayah pesisir Provinsi Bengkulu, termasuk Kota Bengkulu, dengan menggunakan data gempa berkekuatan 8,6 M_w yang terjadi pada September 2007. Studi ini menunjukkan bahwa wilayah Kota Bengkulu mengalami dampak likuifaksi yang signifikan akibat gempa tersebut.

Mase, (2018b) melakukan penyelidikan terkait respons seismik tanah pada wilayah pesisir Bengkulu menggunakan gelombang gempa berkekuatan 8,4 M_w yang terjadi pada bulan September 2007 dan

membandingkannya dengan desain seismik SNI 03-1726-2002 dan SNI 03-1726-2012. Hasil menunjukkan bahwa gelombang seismik di permukaan cenderung melampaui desain seismik yang ada di Kota Bengkulu.



Gambar 1. Peta kondisi tektonik Provinsi Bengkulu
(Sumber : Modifikasi dari Mase, 2018b)

Misliniyati, dkk., (2019b) melakukan penyelidikan terkait respons seismik satu dimensi berdasarkan kondisi seismik Kota Jakarta. Hasil respons spektra percepatan yang diperoleh sangat bergantung pada metode analisis yang digunakan, terutama ketika membandingkan metode linier dan nonlinier ekuivalen. Metode linier ekuivalen menunjukkan nilai respons spektra percepatan yang lebih tinggi di permukaan tanah dibandingkan metode nonlinier pada periode pendek (0,2 detik). Mase, dkk., (2024) melakukan investigasi kedalaman batuan dasar di sepanjang segmen hilir Sungai Muara Bangkahulu, Kota Bengkulu. Informasi batuan dasar

berguna untuk mensimulasikan analisis respon seismik tanah. Sehingga, penelitian respons seismik tanah selama gempa pada bulan September 2007 dengan perbandingan metode linier ekuivalen dan metode nonlinier pada area Pesisir Selatan Provinsi Bengkulu belum dilakukan meskipun interpretasi kasar mengenai dampak gempa telah dicapai.

Penelitian ini berfokus pada analisis respons seismik di pesisir selatan Provinsi Bengkulu. Analisis dilakukan menggunakan program analisis respons seismik satu dimensi metode linier dan nonlinier. Hasil penelitian akan dianalisis dan dibandingkan perbedaan antara hasil

yang diperoleh dari kedua metode analisis. Profil kecepatan gelombang geser (V_s) diperoleh dari hasil pengukuran mikrotremor yang dilakukan pada tahun 2023. Gelombang input dipilih untuk memperkirakan amplifikasi gerakan tanah, respons spektra percepatan dan *peak ground acceleration* (PGA). Gelombang input diambil berdasarkan pada respons seismik tanah pada gempa berkekuatan 8,6 M_w yang terjadi pada bulan September 2007 di Provinsi Bengkulu. PGA dan faktor amplifikasi dianalisis untuk mensimulasikan analisis respons seismik tanah satu dimensi pada lokasi. Selain itu, respons spektra percepatan di permukaan tanah yang diperoleh dianalisis dan dibandingkan dengan percepatan respons spektra yang dirancang yaitu [SNI 1726:2019](#).

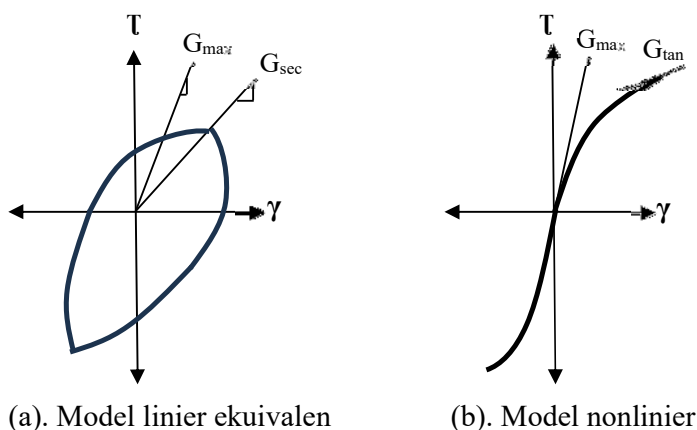
Studi ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai fenomena gempa bumi di Bengkulu dan dapat memberikan manfaat kepada para insinyur setempat untuk mempertimbangkan nilai desain terhadap kemungkinan terulangnya gempa bumi di masa mendatang sehingga dapat meminimalisir dampak gelombang gempa yang terjadi.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Permodelan Perambatan Gelombang Seismik Satu Dimensi

Dua metode terkenal digunakan dalam bidang respons seismik yaitu metode linier ekuivalen dan metode nonlinier. Model linier ekuivalen menerapkan asumsi ekuivalen untuk mendekati tegangan geser dengan regangan geser nonlinier. Modulus geser dalam model ini diperkirakan dengan asumsi linier ekuivalen yang dihitung dengan G_{sec} . Namun, faktanya tegangan geser dan regangan geser tidak linier ekuivalen. Oleh karena itu, kebutuhan untuk memodelkan kondisi yang tepat pada beban dinamis atau siklik mengarah ke model tanah dengan perilaku nonlinier. Model nonlinier mengimplementasi regangan geser nonlinier dengan tegangan geser menggunakan G_{tan} berdasarkan kurva *backbone* hiperbolik ([Mase, 2018b](#); [Yoshida, 2015](#)). Estimasi modulus geser dapat dilihat pada Gambar 2.

Permodelan nonlinier satu dimensi memberikan asumsi yang akurat atau mendekati dalam menentukan tegangan efektif setiap lapisan tanah. Dalam penelitian ini, digunakan model *pressure dependent hyperbolic* (PDH) sebagai permodelan nonlinier satu dimensi.



Gambar 2. Estimasi modulus geser
(Sumber : Modifikasi dari [Mase, 2018b](#))

Permodelan PDH sangat sesuai dalam memperkirakan respons tanah selama terjadinya gempa (Likitlersuang, dkk., 2019; Mase, dkk., 2018a; Qodri, dkk., 2019). Hasil simulasi numerik dari permodelan ini umumnya konsisten dengan hasil analisis respons tanah selama peristiwa gempa (Mase, 2017a; Pender, dkk., 2016). Beberapa kasus seperti gempa bumi Bengkulu-Mentawai pada tahun 2007 mendukung keakuratan permodelan nonlinier ini. Metode nonlinier dalam menentukan tegangan efektif sejalan dalam memprediksi respons tanah selama terjadinya gempa bumi (Misliniyati, dkk., 2019a).

2. Parameter Gelombang Gempa

Faktor-faktor yang memengaruhi dalam menentukan *ground motion* meliputi karakteristik tanah, gelombang seismik, dan respons terhadap getaran tanah. Parameter *ground motion* yang diamati meliputi percepatan maksimum gempa atau *peak ground acceleration* (PGA), respons spektra percepatan pada periode pendek (0,2 detik), respons spektra percepatan pada periode panjang (1 detik) dan faktor amplifikasi (Ma, dkk., 2019). Teori mengenai dari masing-masing parameter dijelaskan sebagai berikut.

a. *Peak ground acceleration* (PGA)

Penentuan suatu risiko gempa yang terjadi di daerah berdasarkan pemetaan dari nilai percepatan tanah maksimum (*peak ground acceleration*) (Permatasari, dkk., 2016). *Peak ground acceleration* adalah nilai maksimum percepatan tanah yang terjadi pada permukaan tanah akibat getaran seismik dalam periode waktu tertentu. Percepatan tanah permukaan diakibatkan oleh getaran seismik yang bergantung pada perambatan gelombang seismik dan karakteristik perlapisan tanah. Risiko bahaya gempa bumi juga semakin

besar pada suatu daerah apabila nilai PGA semakin besar (Suhartini, dkk., 2019).

b. Respons spektra percepatan

Respons spektra percepatan digunakan untuk menganalisis struktur. Dengan memperkirakan tingkatan bangunan, respons spektra dapat menggambarkan periode alami suatu struktur. Nilai respons spektra ini akan dijadikan ke dalam bentuk grafik untuk mengetahui respons spektra percepatan serta mengetahui nilai maksimum di periode tertentu (Salsabil, dkk., 2018). Hasil desain respons spektra yang diperoleh dapat memberikan rekomendasi desain bangunan yang lebih mempertimbangkan pengaruh beban gempa (Mase, 2018b).

c. Faktor amplifikasi

Nilai faktor amplifikasi mengacu pada perbandingan nilai PGA permukaan dan nilai PGA lapisan yang diteliti. Nilai faktor amplifikasi yang tinggi berisiko menimbulkan kerusakan bangunan disekitarnya. Risiko bahaya terkena gelombang seismik dapat ditentukan berdasarkan ketebalan lapisan tanah dan faktor amplifikasi. Kedua parameter ini dapat digunakan sebagai indikator risiko paparan gelombang seismik (Wibowo, dkk., 2018).

C. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berfokus pada beberapa area yang dipetakan pada Gambar 3. Terdapat 8 area yang diteliti, yakni S-1 dan S-2 yang mewakili area Kota Bengkulu, S-3 dan S-4 yang mewakili area Kabupaten Seluma, S-5 dan S-6 yang mewakili area Kabupaten Bengkulu Selatan, dan S-7 dan S-8 mewakili area Kabupaten Kaur. Kabupaten Seluma, Kabupaten Bengkulu Selatan dan Kabupaten Kaur merupakan kawasan industri yang memiliki banyak tempat usaha seperti pabrik dan bisnis

industri. Sedangkan Kota Bengkulu mewakili kawasan pusat pemerintahan di Provinsi Bengkulu.

Profil tanah diperoleh dari data mikrotremor tahun 2023 yang dikumpulkan secara langsung dalam kegiatan survei lapangan. Profil tanah ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum, area yang diteliti didominasi oleh perlapisan pasir sampai dengan kedalaman 26,4 m. Namun, pada titik PS-3 didominasi oleh perlapisan lempung

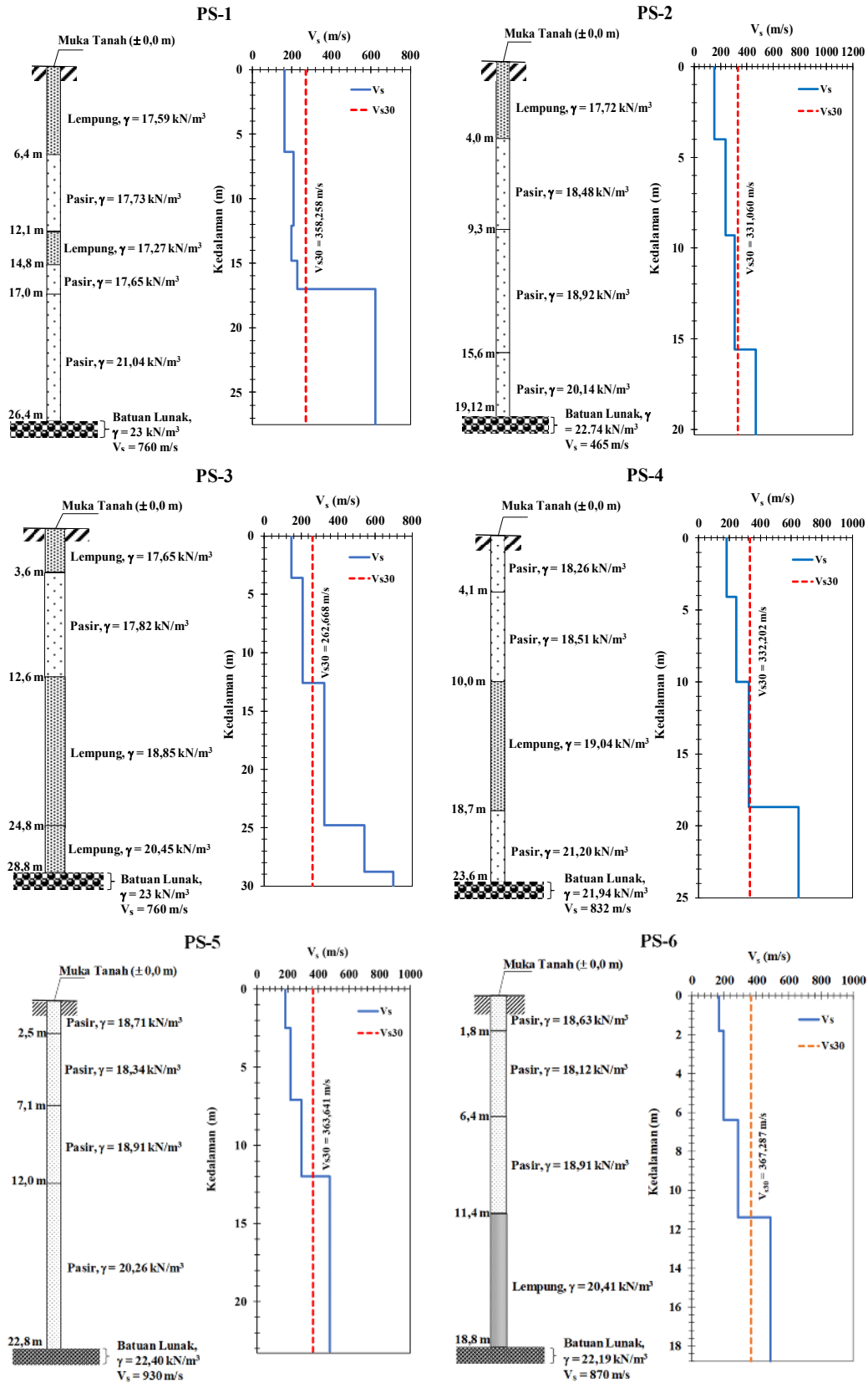
hingga kedalaman 28,8 m. Klasifikasi kelas situs tanah berdasarkan kecepatan gelombang geser dan mengkaitkannya dengan kelas situs tanah yang telah dikembangkan oleh *National Earthquake Hazard Reduction Program* atau NEHRP (1998). Sehingga, area penelitian pada titik PS-1, PS-2, PS-3, dan PS-4 sebagai kelas situs D dengan V_{s30} sebesar 262,7 m/s sampai 358,3 m/s. Sedangkan area penelitian pada titik PS-5, PS-6, PS-7, dan PS-8 sebagai kelas situs C dengan V_{s30} sebesar 363,6 m/s sampai 568,7 m/s.



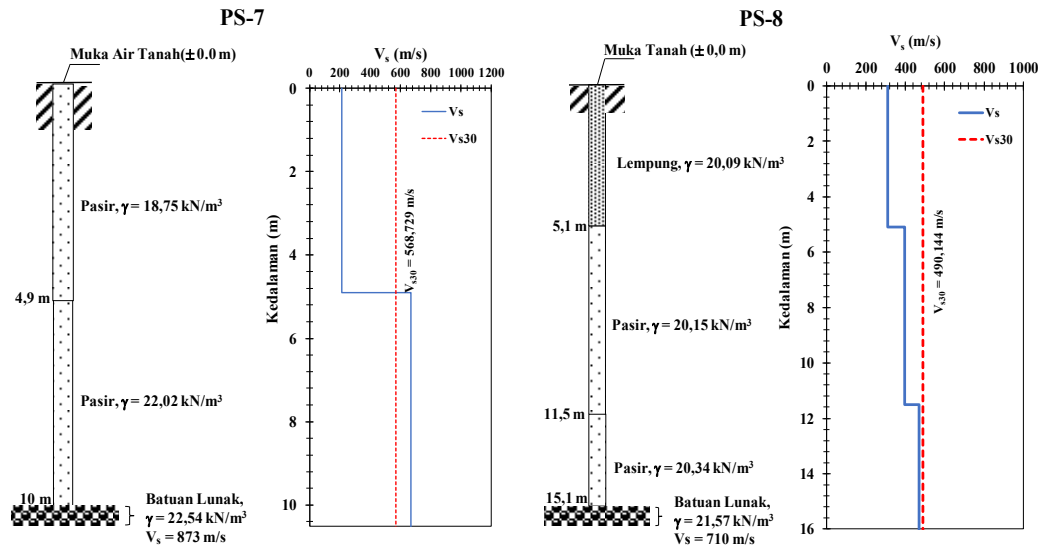
Gambar 3. Peta lokasi penelitian
(Sumber : Modifikasi dari Mase, 2018b)

Parameter input yang digunakan adalah data perlapisan tanah, profil kecepatan gelombang geser (V_s), dan data gelombang gempa. Penyelidikan perilaku tanah selama gempa September 2007 menggunakan analisis respons seismik tanah satu dimensi. Ilustrasi model respons tanah seismik untuk area Pesisir Selatan Provinsi Bengkulu disajikan pada Gambar 5.

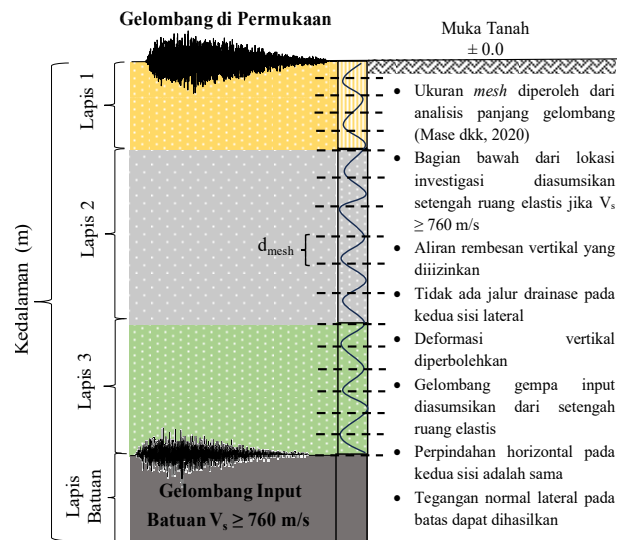
Kerangka tanah satu dimensi yang diterapkan dalam penelitian ini dikembangkan berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Pender, dkk., 2016) dan (Mase, dkk., 2019). Metode elemen hingga digunakan untuk mensimulasikan analisis respons tanah. *Mesh* pada profil tanah diperoleh berdasarkan analisis panjang gelombang. Semua lapisan tanah harus mempunyai frekuensi minimal (f) sebesar 30 Hz (Hashash, dkk., 2015).



Gambar 4. Profil tanah



Gambar 4. Profil tanah (lanjutan)



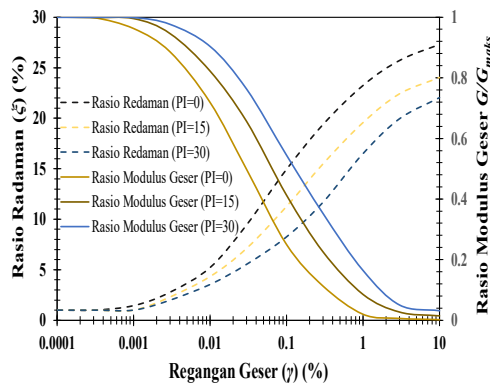
Gambar 5. Skema perambatan gelombang 1D
 (Sumber : Modifikasi dari Mase, dkk., 2022a)

Sehingga, derivasi *mesh* dapat diperoleh dengan menggunakan asumsi seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1) :

$$d = \frac{V_s}{4f_{\text{maks}}} \quad (1)$$

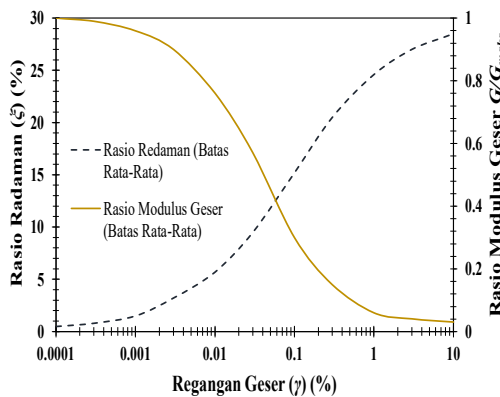
Untuk d diasumsikan sebagai ukuran *mesh* dan f_{maks} adalah frekuensi maksimum yang digunakan sebesar 33 Hz dan V_s adalah kecepatan gelombang geser (Hashash, dkk., 2015).

Penelitian ini menggunakan model kurva G/G_{max} dan rasio redaman. Kurva ini menggambarkan hubungan antara reduksi modulus geser, atau rasio redaman, dan regangan geser. Penggunaan tanah pasir untuk referensi Seed & Idriss, (1991) (*mean limit*) dan tanah lempung untuk referensi Vucetic & Dobry, (1991). Kurva Vucetic & Dobry, (1991) dan Seed & Idriss, (1991) (*mean limit*) dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6. Kurva G/G_{max} dan rasio redaman untuk lempung

(Sumber : Modifikasi dari Mase, 2017a dan Vucetic & Dobry, 1991)



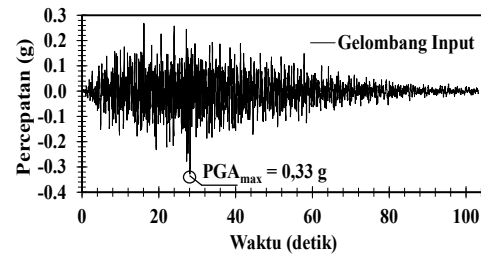
Gambar 7. Kurva G/G_{maks} dan rasio redaman untuk tanah berpasir

(Sumber : Modifikasi dari Mase, 2017a dan Seed & Idriss, 1991)

Data gelombang gempa yang digunakan adalah gelombang gempa Bengkulu-Mentawai 2007 terskala yang dikembangkan oleh Mase, (2017a). Gelombang gempa ini merupakan gelombang gempa terbesar yang terjadi di Bengkulu pada tahun 2007 dalam kurun waktu 20 tahun terakhir. Gelombang gempa input berskala dapat dilihat pada Gambar 8. Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai PGA_{maks} yang diperoleh adalah 0,33g.

Tahapan awal penelitian yang dilakukan berupa tinjauan pustaka. Tinjauan pustaka berguna untuk

memahami ilmu dan informasi yang terkait tentang gempa, kondisi tektonik dan geologi Provinsi Bengkulu, perambatan gelombang seismik satu dimensi, dan parameter seismik. Dimulai dengan memahami riwayat gempa di Provinsi Bengkulu tahun 2007 melalui penelitian Mase, (2017a), kondisi tektonik dan geologi Provinsi Bengkulu melalui penelitian Misliniyati, dkk., (2018) dan Mase, (2018b) serta beberapa studi terdahulu tentang permodelan satu dimensi linier ekuivalen dan nonlinier gelombang gempa.



Gambar 8. Gelombang input terskala
(Sumber : Mase, 2017a)

Selanjutnya, tahapan pengumpulan data berupa data perlapisan tanah dari data mikrotremor dan gelombang gempa Bengkulu 2007 dari penelitian Mase, (2017a). Data yang didapat akan diolah melalui tahapan analisis respons seismik linier ekuivalen dan nonlinier satu dimensi menggunakan program analisis respons seismik satu dimensi *DeepSoil*.

Penelitian ini menghasilkan perambatan gelombang, seperti *peak ground acceleration* (PGA), riwayat waktu percepatan, faktor amplifikasi dan respons spektra percepatan. Faktor amplifikasi akan dianalisis menggunakan persamaan (2), yaitu :

$$FA = \frac{PGA_{Permukaan}}{PGA_{Input}} \quad (2)$$

Dimana PGA_{maks} adalah PGA yang terjadi pada permukaan tanah. PGA_{input} adalah PGA yang terjadi pada lapisan dasar tanah.

Perbandingan respons spektra percepatan gempa metode linear ekuivalen hasil analisis terhadap nonlinear serta desain respons spektra SNI 1726:2019 dilakukan pula pada penelitian ini sehingga didapat kesimpulan dari analisis yang dilakukan.

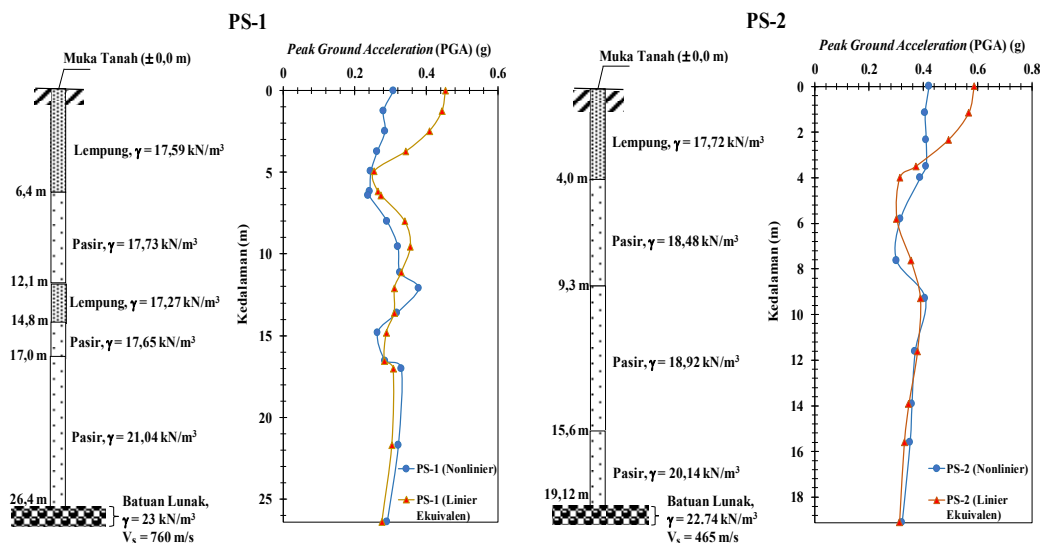
D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Peak Ground Acceleration (PGA)

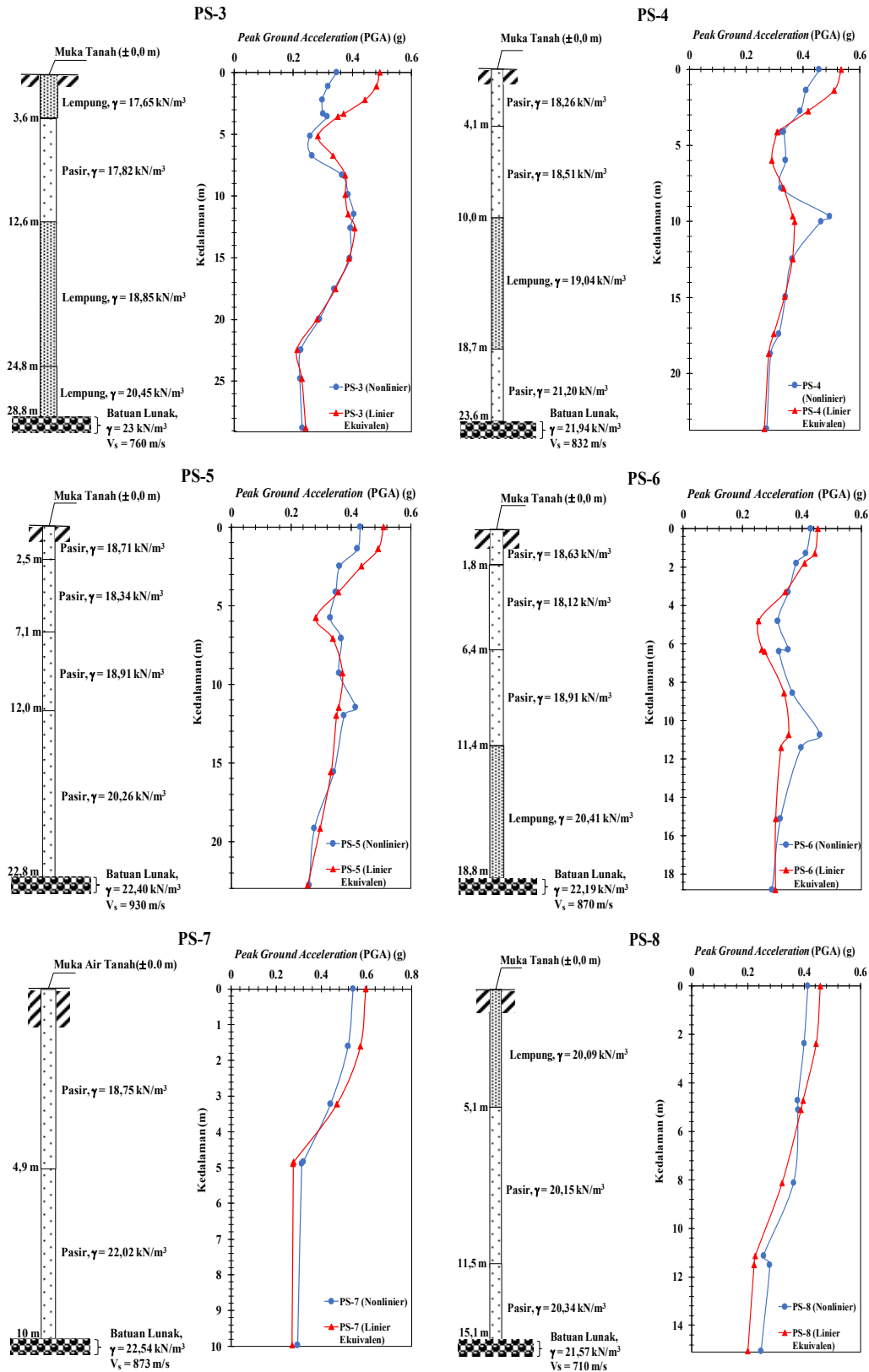
Peak Ground Acceleration (PGA) merupakan parameter penting untuk mengamati karakteristik gerakan tanah (Misliniyati, dkk., 2019a). Dalam penelitian ini, percepatan maksimum setiap lapisan hasil pada analisis respons seismik dapat dilihat pada Gambar 9. Terlihat pada pada titik PS-1 sampai titik PS-8 nilai PGA tertinggi ditunjukkan pada lapisan permukaan linier ekuivalen. Sedangkan nilai PGA terendah terletak pada lapisan terbawah. Nilai lapisan terbawah yang paling rendah terdapat pada ekuivalen linier. Nilai PGA berfungsi untuk mengetahui tingkatan risiko gempa dengan nilai PGA yang berada pada 0,3g-0,4g termasuk kedalam risiko yang tinggi, dan nilai PGA > 0,4g termasuk

kedalam risiko yang sangat tinggi (Fathani, dkk., 2008). Mengacu pada penelitian Fathani, dkk., (2008), nilai PGA nonlinier pada PS-1 dan PS-3 itu berada direntang 0,31g - 0,35g sehingga termasuk ke dalam risiko yang tinggi. Sedangkan nilai PGA nonlinier pada PS-2, PS-4, PS-5, PS-6, PS-7, dan PS-8 berada direntang 0,42g – 0,51g dan sehingga termasuk ke dalam risiko yang tinggi. Nilai PGA linier ekuivalen pada seluruh area penelitian berada direntang 0,46g - 0,60g sehingga termasuk ke dalam risiko yang sangat tinggi.

Hasil analisis menggunakan metode linier ekuivalen menunjukkan nilai yang lebih besar dari metode nonlinier. Hal ini sejalan dengan penelitian Finn, dkk., (1978) dan Mase, dkk., (2018b). Hal ini disebabkan adanya *overestimate* tegangan geser yang terlalu tinggi sehingga menyebabkan nilai PGA menjadi besar. Selain itu, pengaruh lapisan lunak dengan sifat resistif yang relatif rendah meningkatkan percepatan gelombang seismik mendekati permukaan.



Gambar 9. Hasil analisis perbandingan *peak ground acceleration* (PGA) model linier ekuivalen, nonlinier dan gelombang input



Gambar 9. Hasil analisis perbandingan *peak ground acceleration* (PGA) model linier ekuivalen, nonlinier dan gelombang input (lanjutan)

Hal serupa dijelaskan dalam penelitian Yoshida, (2015) yang menjelaskan bahwa metode linier ekuivalen menganalisis respons seismik tanah tanpa mempertimbangkan sifat mekanis tanah. Sedangkan metode nonlinier dapat mempertimbangkan perubahan sifat mekanis tanah dalam menganalisis respons seismik tanah. Sifat mekanis tanah dapat berubah dari waktu ke waktu Yoshida, (2015). Sehingga, penerapan metode ini berkurang ketika sifat material berubah secara monoton atau berubah secara signifikan. Masalah likuifaksi sesuai dengan kondisi ini, dimana kekakuan dan kekuatan berkurang seiring dengan penurunan tegangan efektif yang berubah secara signifikan hingga mendekati nol ketika likuifaksi terjadi. Peristiwa tersebut menyebabkan tanah mengalami keruntuhan dan berperilaku seperti cairan (*liquid*) yang terjadi akibat getaran gempa bumi (Mase, 2017a). Perubahan sifat mekanis tanah yang terjadi seperti fenomena likuifaksi yang diakibatkan getaran gempa bumi menunjukkan metode linier ekuivalen tidak dapat digunakan dalam metode likuifaksi (Yoshida, 2015).

Lapisan tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh lapisan pasir. Kramer & Stewart, (2024), menyebutkan bahwa potensi likuifaksi bisa tinggi pada lokasi yang memiliki lapisan pasir tebal pada kedalaman kurang dari 20 m. Pada Kramer & Stewart, (2024); Mase, (2017b); Mase, dkk., (2021b) menyebutkan bahwa PGA minimal 0,10g dan gempa 5 M_w dapat memicu likuifaksi pada tanah berpasir. Sejalan dengan hal tersebut, terlihat bahwa PGA pada lapisan berpasir teramati bervariasi antara 0,31g hingga 0,51g pada metode nonlinier dan 0,45g - 0,59g pada metode linier ekuivalen. Hal ini mengindikasikan kemungkinan terjadinya likuifaksi di lokasi tersebut. Oleh karena itu, efek guncangan tanah bisa saja memicu

terjadinya likuifaksi. Penyelidikan lebih lanjut akan disajikan dalam penelitian selanjutnya.

2. Riwayat Waktu Percepatan

Perbandingan percepatan di permukaan tanah yang dihasilkan dari analisis respons seismik metode linier, nonlinier dan gelombang input dapat dilihat pada Gambar 10. Gelombang input pada setiap lokasi yang diterapkan di bagian bawah secara umum cenderung menguat di permukaan tanah. Secara keseluruhan, percepatan terbesar terjadi pada metode linier ekuivalen. Percepatan terendah terjadi pada gelombang input. Nilai riwayat waktu percepatan metode nonlinier terbesar terdapat di area Kabupaten Seluma (PS-4) sebesar 0,46g sedangkan nilai yang terendah terdapat di Kota Bengkulu (PS-1) sebesar 0,31g. Nilai percepatan gelombang gempa metode linier ekuivalen terbesar terdapat di area Kota Bengkulu (PS-2) sebesar 0,59g sedangkan nilai yang terendah terdapat di Kabupaten Kaur (PS-7) sebesar 0,43g.

Hasil analisis secara keseluruhan menunjukkan bahwa hasil riwayat waktu percepatan berdasarkan pendekatan linier ekuivalen cenderung menghasilkan percepatan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan pendekatan nonlinier. Hal serupa juga dilaporkan oleh Adampira, dkk., (2015) untuk studi kasus perlapisan tanah di Iran dan penelitian Yunita, dkk., (2015) untuk studi kasus perlapisan tanah di Banda Aceh. Hal ini disebabkan karena metode linier ekuivalen cenderung memperbesar nilai tegangan geser yang terjadi. Kuat geser pada lapisan terlemah mengontrol percepatan maksimum yang menunjukkan perkiraan yang berlebihan terhadap percepatan maksimum tanah di permukaan.

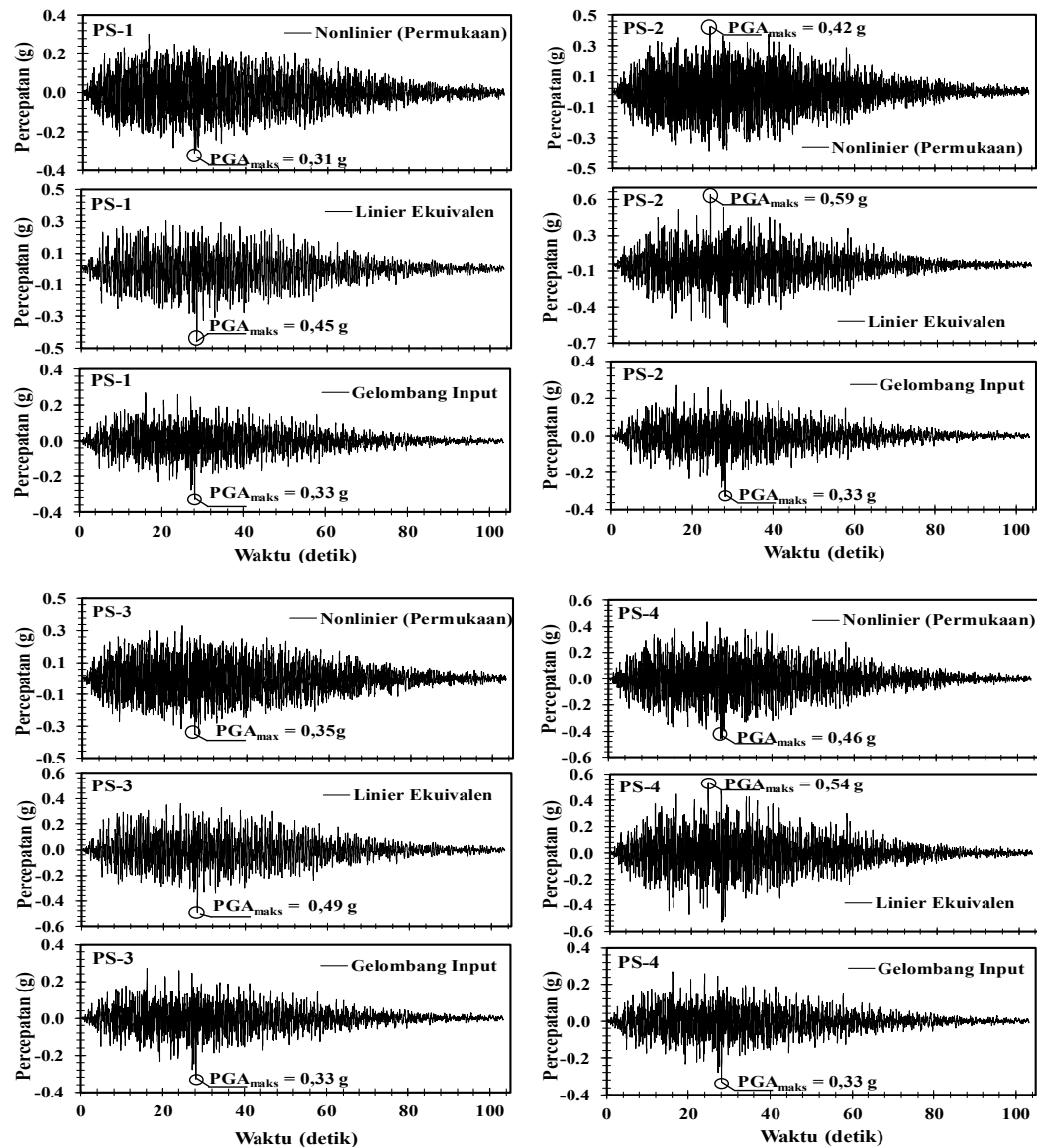
Diperlukan adanya perhatian khusus terhadap pembangunan yang akan

dilakukan. Wilayah pesisir selatan Provinsi Bengkulu merupakan wilayah industri dan pariwisata di Provinsi Bengkulu sehingga pembangunan di masa mendatang akan banyak dilakukan. Selama gempa pada September 2007, daerah ini selalu mengalami dampak kerusakan yang besar. Peninjauan ulang terhadap struktur bangunan yang telah dibangun dan yang akan dibangun sangat diperlukan agar meminimalisir terjadinya

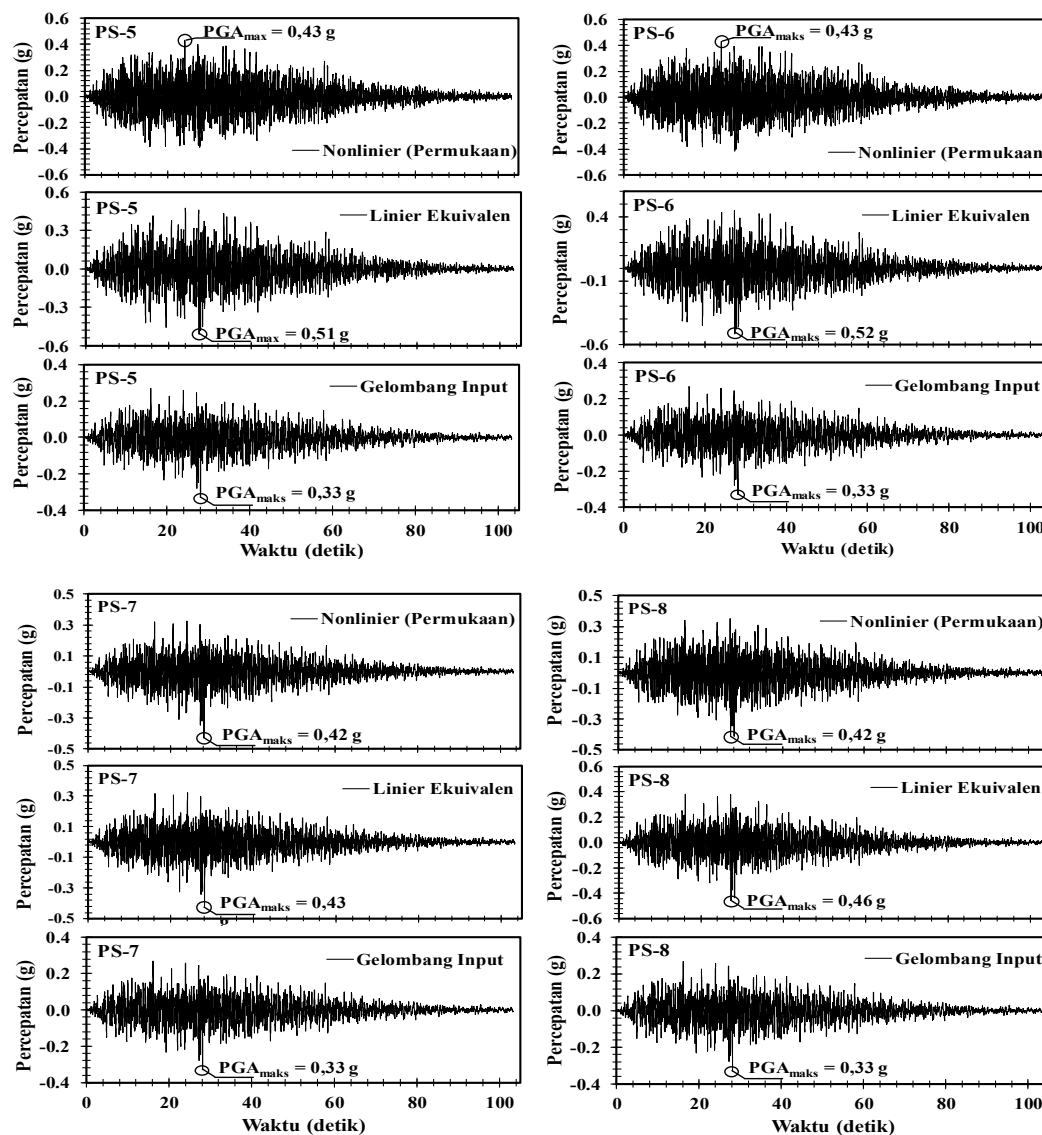
kegagalan struktur akibat gelombang gempa yang akan terjadi di masa mendatang.

3. Respons Spektra Percepatan

Respons spektra percepatan yang diperoleh dari hasil penelitian ini menunjukkan nilai yang berbeda-beda pada setiap periodenya seperti terlihat pada Gambar 11.



Gambar 10. Perbandingan riwayat waktu percepatan metode linier ekuivalen, nonlinier di permukaan tanah dan gelombang input



Gambar 10. Perbandingan riwayat waktu percepatan metode linier ekuivalen, nonlinier di permukaan tanah dan gelombang input (lanjutan)

Analisis mengindikasikan bahwa respons spektra percepatan gelombang input meningkat secara perlahan hingga mencapai puncak pada periode 0,2 detik dan 1 detik. Pada nilai percepatan linier dan nonlinier menunjukkan peningkatan percepatan spektra dibandingkan dengan gelombang input.

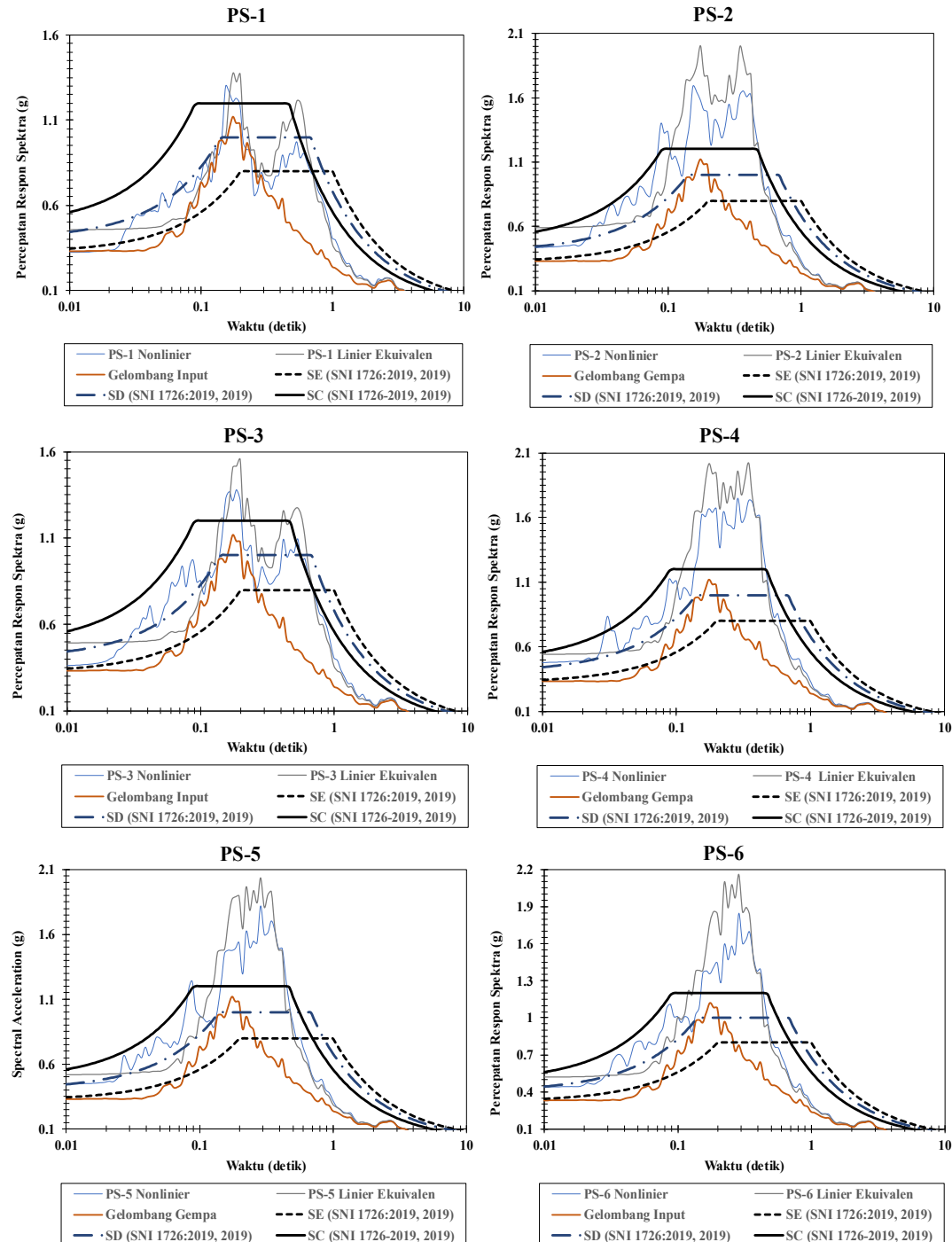
Menurut [International Building Code \(IBC\), \(2021\)](#), periode alami (T_n) suatu bangunan dapat diperkirakan menggunakan pendekatan empiris berdasarkan tinggi bangunan dan jenis

strukturnya. Sebagai pendekatan sederhana, T_n juga sering diperkirakan sebesar $0,1n$, dimana n merupakan jumlah lantai bangunan gedung. Nilai T_n sebesar 0,2 detik umumnya mewakili respons tanah terhadap bangunan berlantai rendah (1-2 lantai), sedangkan nilai 1 detik mewakili respons tanah yang diterima pada bangunan berlantai tinggi ([Mase, dkk., 2020](#)).

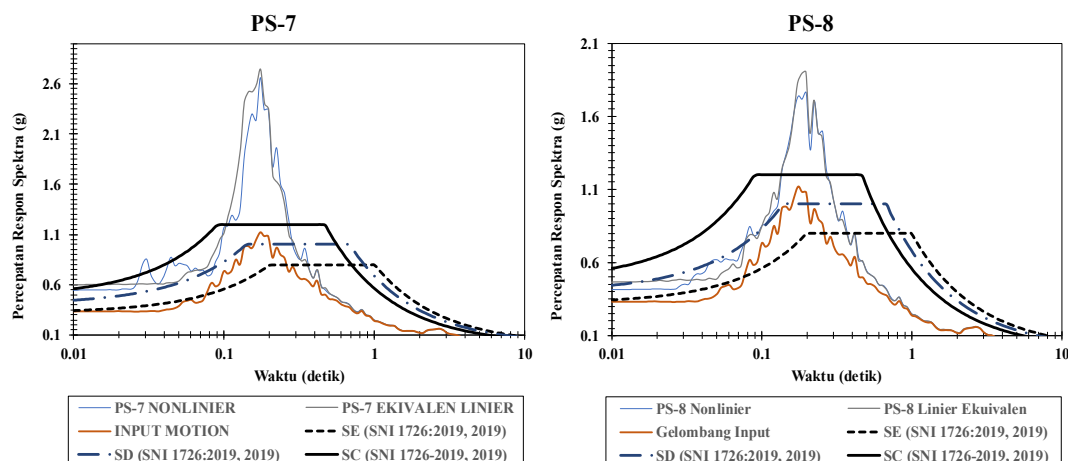
Nilai respons spektra percepatan metode linier ekuivalen cenderung melebihi metode nonlinier. Percepatan

respons spektra lapisan mencapai nilai maksimum pada periode 0,2 sampai 1 detik dengan nilai percepatan 0,10g sampai 2,74g. Hal ini akan memicu terjadinya keruntuhan bangunan yang

masif yang berpotensi ditemukan di lapangan. Nilai respons spektra percepatan gempa di permukaan tanah telah melebihi nilai desain respons spektra percepatan SNI 1726:2019.



Gambar 11. Perbandingan respons spektra percepatan linier ekuivalen, nonlinear dan gelombang input



Gambar 11. Perbandingan respons spektra percepatan linier ekuivalen, nonlinier dan gelombang input (lanjutan)

Akibatnya, pada area studi mengindikasikan bahwa bangunan rumah dan bangunan struktural lainnya berpotensi mengalami keruntuhan akibat guncangan gempa sehingga perlu mempertimbangkan desain spektra SNI 1726:2019. Hal ini didukung oleh penelitian Misliniyati, dkk., (2019a) yang menyatakan bahwa metode linier ekuivalen cenderung lebih konservatif dibandingkan metode nonlinier. Metode linier ekuivalen memberikan hasil respons spektra percepatan sangat tinggi dibandingkan dengan data yang tercatat. Metode linier ekuivalen memperkirakan percepatan puncak tanah secara berlebihan karena asumsi linearitas, terutama untuk estimasi regangan geser. Hasil menunjukkan nilai estimasi berlebihan terhadap gelombang rambat yang terjadi pada lapisan terlemah.

4. Faktor Amplifikasi

Faktor amplifikasi menggambarkan peningkatan percepatan gempa dari batuan dasar ke permukaan tanah akibat perbedaan karakteristik media. Kontras impedansi antara lapisan lunak seperti sedimen dan batuan dasar, serta kondisi geologi lokal seperti topografi dan

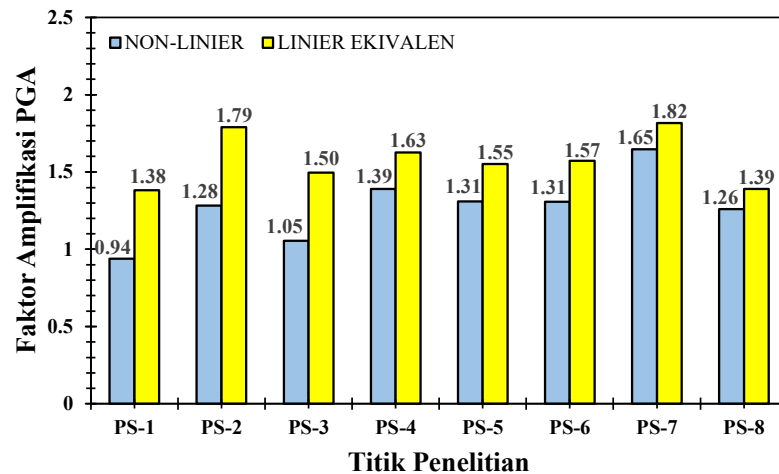
ketebalan lapisan tanah, berperan penting dalam menentukan besarnya penguatan gelombang. Faktor ini dapat memperbesar dampak kerusakan akibat gempa (Jannah, 2024). Semakin tinggi nilai faktor amplifikasi maka semakin besar juga potensi kerusakan struktural akibat gempa bumi. Tanah yang mengalami amplifikasi cenderung memperkuat intensitas dari getaran gempa yang bisa mengakibatkan kerusakan lebih parah pada infrastruktur yang berdiri di atasnya.

Gambar 12 menunjukkan grafik nilai faktor amplifikasi pada setiap titik daerah yang diteliti. Nilai faktor amplifikasi cenderung menguat pada permukaan. Secara keseluruhan nilai faktor amplifikasi metode linier ekuivalen lebih besar dari metode nonlinier. Nilai faktor amplifikasi metode linier ekuivalen terbesar terdapat di Kabupaten Kaur (PS-7) sebesar 1,82 dan yang terendah terdapat di Kota Bengkulu (PS-1) sebesar 1,38. Nilai faktor amplifikasi terbesar metode nonlinier terdapat di Kabupaten Kaur (PS-7) sebesar 1,65 dan yang terendah terdapat di Kota Bengkulu (PS-1) sebesar 0,94. Perlapisan pasir memiliki karakteristik yang tidak rapat sehingga dapat meredam gelombang gempa. Lapisan lepas yang

memiliki ketebalan yang signifikan mempengaruhi pembesaran gelombang yang ada di permukaan tanah (Yoshida, 2015).

PS-1 (Kota Bengkulu) mengalami de-amplifikasi sebesar 0,94 dengan menggunakan pendekatan metode nonlinier. Sedangkan pada pendekatan metode linier ekuivalen mengalami amplifikasi sebesar 1,38. Keberadaan lapisan lempung pada permukaan tanah yang cukup tebal yaitu 6,4 m memicu terjadinya de-amplifikasi pada area tersebut. (Yoshida, 2015) dan Mase, (2018b) menyebutkan bahwa faktor amplifikasi umumnya dikendalikan oleh

lapisan lemah. Lapisan lemah cenderung memiliki V_s yang lebih rendah. PS-1 memiliki lapisan lempung yang tebal dengan V_s rendah. Menurut Mase, dkk., (2022b) dan Hashash, dkk., (2015) baik V_s pada lapisan maupun ketebalan lapisan dapat mengontrol frekuensi gelombang yang merambat. Hal serupa dilaporkan oleh Somantri, dkk., (2022) yang menyimpulkan bahwa selama perambatan gelombang seismik, kekuatan tanah telah berkurang secara signifikan dan tanah mungkin menjadi lebih padat sehingga gerakan di permukaan tanah cenderung mengalami de-amplifikasi.



Gambar 12. Faktor amplifikasi PGA

E. KESIMPULAN

Penelitian ini fokus pada analisis respons seismik di wilayah pesisir Provinsi Bengkulu pada saat terjadinya gempa bumi berkekuatan 8,6 M_w yang terjadi pada tanggal 12 September 2007. Metode linier ekuivalen cenderung lebih konservatif dibandingkan metode nonlinier. Metode linier ekuivalen memberikan hasil yang paling konservatif, karena percepatan respons spektra sangat tinggi dibandingkan dengan data yang tercatat. Akibatnya, nilai *peak ground acceleration* (PGA), riwayat waktu percepatan, respons

spektra percepatan dan faktor amplifikasi dalam metode linier ekuivalen lebih besar dari pada metode nonlinier. Hal ini juga dikarenakan analisis linier ekuivalen tidak dapat mempertimbangkan sifat mekanis tanah yg berubah sesaat. Di sisi lain, analisis nonlinier dapat mempertimbangkan sifat mekanis yang berubah sesaat. Lapisan tanah lokasi penelitian didominasi oleh pasir yang memiliki daya dukung rendah serta rentan terjadinya likuifaksi. Sehingga metode linier ekuivalen kurang baik digunakan dalam menganalisis respons seismik karena sifat mekanis

tanah dapat berubah dari waktu ke waktu.

Secara umum, nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA) pada area penelitian tergolong sangat tinggi yaitu lebih dari 0,4g. Nilai PGA yang tinggi menunjukkan bahwa intensitas getaran tanah selama gempa bumi akan lebih besar, yang berarti struktur bangunan di Pesisir Selatan Provinsi Bengkulu harus didesain lebih kuat agar dapat bertahan dan tidak runtuh akibat getaran gempa.

Lokasi penelitian mengalami penguatan amplifikasi selama perambatan gelombang. Amplifikasi tersebut cenderung menguat dari 1,38 hingga 1,82 kali. PS-7 (Kabupaten Kaur) memiliki faktor amplifikasi tertinggi, sedangkan PS-1 (Kota Bengkulu) memiliki faktor amplifikasi terendah di wilayah penelitian. Keberadaan lapisan pasir dan lempung dengan ketahanan tanah dan kekuatan geser yang rendah pada kedalaman yang dangkal mengendalikan percepatan di permukaan tanah selama perambatan gelombang.

Percepatan spektra yang dihasilkan dari analisis respons tanah seismik umumnya melebihi nilai desain percepatan spektra SNI 1726:2019. Perbandingan ini dapat dijadikan acuan dalam mempertimbangkan respons spektra percepatan yang dirancang untuk menghindari kerusakan besar yang terjadi pada gempa bumi tahun 2007, terutama jika gempa bumi yang lebih kuat terjadi di wilayah studi di masa depan.

Struktur bangunan gedung belum dipertimbangkan dalam penelitian ini. Sehingga, hasil parameter seismik dalam penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam melakukan proses pembangunan pada area lokasi penelitian.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Tim Riset Kegempaan

Program Studi Teknik Sipil Universitas Bengkulu yang telah membantu pelaksanaan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adampira, M., Alielahi, H., Panji, M., & Koohsari, H. (2015). Comparison of Equivalent Linear and Nonlinear Methods in Seismic Analysis of Liquefiable Site Response Due to Near-fault Incident Waves: a Case Study. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5), 3103–3118. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-014-1399-6>
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*. <https://sitaba.pu.go.id/publikasi/6977fb4f>
- Fathani, T. F., Adi, A. D., Pramumijoyo, S., & Karnawati, D. (2008). The Determination of Peak Ground Acceleration at Bantul Regency, Yogyakarta Province, Indonesia. *The Yogyakarta Earthquake 2006*, 12(1), 12–15.
- Finn, W.D., Lee, M.K., & Martin, G.R. (1978). Comparison of Dynamic Analyses For Saturated Sands. In *Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, (pp. 472-491) (ASCE). <https://trid.trb.org/view/74561>
- Hashash, Y. M. A., Dashti, S., Romero, M. I., Ghayoomi, M., & Musgrove, M. (2015). Evaluation of 1-D Seismic Site Response Modeling of Sand Using Centrifuge Experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 78, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.07.003>

- International Code Council. (2021). *International Building Code (IBC)*, ICC, Washington, D.C.
<https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2>
- Jannah, D. M. (2024). Analisis Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Nilai V_{s30} Pada Zona Terdampak Gempa Bumi (Studi Kasus: Gempa Cianjur 21 November 2022). *Kurvatek*, 9(2), 107–116.
<https://doi.org/10.33579/krvtk.v9i2.4972>
- Kramer, S. L., & Stewart, J. P. (2024). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Second Edition. CRC Press, Boca Raton.
<https://doi.org/10.1201/9781003512011>
- Likitlersuang, S., Plengsiri, P., Mase, L. Z., & Tanapalungkorn, W. (2019). Influence of Spatial Variability of Ground on Seismic Response Analysis: a Case Study of Bangkok Subsoils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(1), 39–51.
<https://doi.org/10.1007/s10064-019-01560-9>
- Ma, J., Dong, L., Zhao, G., & Li, X. (2019). Focal Mechanism of Mining-Induced Seismicity in Fault Zones: A Case Study of Yongshaba Mine in China. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(9), 3341–3352.
<https://doi.org/10.1007/s00603-019-01761-4>
- Mase, L. Z. (2015). Karakteristik Gempa di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmiah Bidang Sains - Teknologi*. 2(15), 25–34.
<https://www.researchgate.net/publication/295908169>
- Mase, L. Z. (2017a). Liquefaction Potential Analysis Along Coastal Area of Bengkulu Province Due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu Earthquake. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 49(6), 721–736.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2>
- Mase, L. Z. (2017b). Shaking Table Test of Soil Liquefaction in Southern Yogyakarta. *International Journal of Technology*, 8(4), 747–760.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v8i4.9488>
- Mase, L. Z. (2018a). Reliability Study of Spectral Acceleration Designs Against Earthquakes in Bengkulu City, Indonesia. *International Journal of Technology*, 9(5), 910–924.
<https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i5.621>
- Mase, L. Z. (2018b). Seismic Response Analysis Along the Coastal Area of Bengkulu During the September 2007 Earthquake. *Makara Journal of Technology*, 22(1), 37–45.
<https://doi.org/10.7454/mst.v22i1.3457>
- Mase, L. Z., Likitlersuang, S., & Tobita, T. (2018a). Analysis of Seismic Ground Response Caused During Strong Earthquake in Northern Thailand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 114, 113–126.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.07.006>
- Mase, L. Z., Likitlersuang, S., & Tobita, T. (2018b). Non-linear Site Response Analysis of Soil Sites in Northern Thailand During the Mw 6.8 Tarlay

- Earthquake. *Engineering Journal*, 22(3), 291–303.
<https://doi.org/10.4186/ej.2018.22.3.291>
- Mase, L. Z., Likitlersuang, S., & Tobita, T. (2019). Cyclic Behaviour and Liquefaction Resistance of Izumio Sands in Osaka, Japan. *Marine Georesources and Geotechnology*, 37(7), 765–774.
<https://doi.org/10.1080/1064119X.2018.1485793>
- Mase, L. Z. (2020). Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38, 5433–5455.
<https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>
- Mase, L. Z., Fathani, T. F., & Adi, A. D. (2021a). A Simple Shaking Table Test to Measure Liquefaction Potential of Prambanan Area, Yogyakarta, Indonesia. *ASEAN Engineering Journal*, 11(3), 89–108.
<https://doi.org/10.11113/AEJ.V11.16874>
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021b). Seismic Hazard Microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(5), 1–17.
<https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>
- Mase, L. Z., Likitlersuang, S., & Tobita, T. (2022a). Verification of Liquefaction Potential During the Strong Earthquake at the Border of Thailand-Myanmar. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(4), 2023–2050.
<https://doi.org/10.1080/13632469.2020.1751346>
- Mase, L. Z., Tanapalungkorn, W., Likitlersuang, S., Ueda, K., & Tobita, T. (2022b). Liquefaction Analysis of Izumio Sands Under Variation of Ground Motions During Strong Earthquake in Osaka, Japan. *Soils and Foundations*, 62(5), 1–22.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101218>
- Mase, L. Z., Irsyam, M., Gustiparani, D., Noptapia, A. N., Syahbana, A. J., & Soebowo, E. (2024). Identification of Bedrock Depth Along a Downstream Segment of Muara Bangkahulu River, Bengkulu City, Indonesia. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(4).
<https://doi.org/10.1007/s10064-024-03591-3>
- Misliniyati, R., Mase, L. Z., Syahbana, A. J., & Soebowo, E. (2018). Seismic Hazard Mitigation for Bengkulu Coastal Area Based on Site Class Analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 212(2018), 1–10.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012004>
- Misliniyati, R., Mase, L. Z., Irsyam, M., Hendriyawan, & Sahadewa, A. (2019a). Seismic Response Validation of Simulated Soil Models to Vertical Array Record During a Strong Earthquake. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 51(6), 772–790.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.6.3>
- Misliniyati, R., Sahadewa, A., Hendriyawan, & Irsyam, M. (2019b). Parametric Study of One-Dimensional Seismic Site Response Analyses Based on Local Soil Condition of Jakarta. *Journal of*

- Engineering and Technological Sciences*, 51(3), 392–410.
<https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2019.51.3.7>
- Pender, M. J., Orense, R. P., Wotherspoon, L. M., & Storie, L. B. (2016). Effect of Permeability on the Cyclic Generation and Dissipation of Pore Pressures in Saturated Gravel Layers. *Geotechnique*, 66(4), 313–322.
<https://doi.org/10.1680/jgeot.SIP.15.P.024>
- Permatasari, N. I., Wibowo, N. B., & Darmawan, D. (2016). Intensitas Gempabumi Kecamatan Arjosari Pacitan Jawa Timur. *Jurnal Fisika*, 5(3), 198–204.
<http://dx.doi.org/10.21831/jifta.v5i3.953>
- Qodri, M. F., Mase, L. Z., Bengkulu, U., & Likitlersuang, S. (2019). Simulation of Seismic Ground Response at Bangkok Subsoil due to Si Sawat Fault. (July), 1–10.
<https://www.researchgate.net/publication/334469653>
- Salsabil, A. R., Hilyah, A., Purwanto, M. S., & Fajar, M. H. M. (2018). Zonasi Bahaya Kegempaan Akibat Patahan Aktif Di Wilayah Jawa Timur Dengan Pendekatan Deterministik Menggunakan Perhitungan Atenuasi Chiou-Youngs 2014 NGA. *Jurnal Geosaintek*, 4(3), 103–115.
<https://doi.org/10.12962/j25023659.v4i3.4508>
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1991). *Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses*. Earthquake Engineering Research Centre Report EERC. Berkeley, California.
<https://ntrl.ntis.gov/NTRL/>
- Somantri, A. K., Mase, L. Z., Susanto, A., Gunadi, R., & Febriansya, A. (2023). Analysis of Ground Response of Bandung Region Subsoils due to Predicted Earthquake Triggered by Lembang Fault, West Java Province, Indonesia. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(2), 1155–1181.
<https://doi.org/10.1007/s10706-022-02328-x>
- Suhartini, C. E., Mase, L. Z., & Farid, M. (2019). Mikrozonasi Percepatan Tanah Maksimum Akibat Gempabumi 12 September 2007 Di Kecamatan Ratu Agung Kota Bengkulu. In *Civil Engineering and Built Environment Conference*, (90–99). Bengkulu, Indonesia.
<https://www.researchgate.net/publication/338294019>
- Vucetic, M., & Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), 89–107.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1991\)117:1\(89\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1991)117:1(89))
- Wibowo, N. B., Darmawan, D., Utami, Z., & Patimah, S. (2018). Analisa Resiko Bahaya Seismik Berdasarkan Parameter Ketebalan Lapisan Sedimen dan Faktor Amplifikasi di Kecamatan Prambanan Dan Gantiwarno. *Jurnal Sains Dasar*, 7(2), 117–123.
<http://dx.doi.org/10.21831/jsd.v7i2.38553>
- Yoshida, N. (2015). *Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering Seismic Ground Response Analysis*. Springer, London.
<http://doi.org/10.1007/978-94-017-9460-2>

Yunita, H., Hendriyawan, & Apriadi, D.
(2015). An Overview of Soil Models
for Earthquake Response Analysis.
*Journal of Engineering and
Technological Sciences*, 47(1), 57–
75.
[https://doi.org/10.5614/j.eng.technol
.sci.2015.47.1.5](https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.1.5)



© 2025 Siklus Jurnal Teknik
Sipil All rights reserved. This
is an open access article
distributed under the terms of the CC BY
Licens
(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)