

Studi Perbandingan Linier Ekuivalen dan Nonlinier pada Respon Seismik di Daerah Pesisir

Comparative Study of Linear Equivalent and Nonlinear Seismic Response in Coastal Areas

Annisa Zahara, Lindung Zalbuin Mase, Fepy Supriani, Rena Misliniyati, Khairul Amri

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

Article Info

Article history:

Received 05, Juni, 2024

Revised 17, Oktober, 2024

Accepted 27, Oktober, 2024

Kata Kunci

Gempa bumi

Pemodelan linier ekuivalen

Pemodelan nonlinier

Pesisir

Respon seismik

Abstrak

Area pesisir Kota Bengkulu terletak pada posisi strategis di pertemuan lempeng Indo-Australia dan Eurasia, menjadikannya sebagai wilayah dengan risiko tinggi terhadap aktivitas seismik. Pertemuan lempeng ini menyebabkan intensitas gempa yang signifikan sehingga berdampak pada berbagai permasalahan geoteknik di kawasan tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan dua metode analisis, yaitu linier ekuivalen dan nonlinier dalam menilai respon seismik pada wilayah pesisir Kota Bengkulu serta menguji keandalannya dalam analisis respon seismik. Metodologi yang digunakan mencakup studi literatur, pengumpulan data, dan analisis respon seismik menggunakan perbandingan metode linier ekuivalen dan nonlinier model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) yang menghasilkan *Peak Ground Acceleration* (PGA), percepatan respon spektra, dan faktor amplifikasi. Hasil analisis mengindikasikan respon spektra melampaui spektra desain pada periode 0,1-0,4 detik, yang dapat membahayakan bangunan berlantai rendah. Metode nonlinier memiliki faktor amplifikasi sebesar 0,91–1,52g, sementara metode linier ekuivalen sebesar 1,01–1,60g, yang menunjukkan bahwa metode linier ekuivalen berpotensi menyebabkan kerusakan struktural yang lebih besar. Selain itu, metode linier ekuivalen menghasilkan nilai PGA yang lebih tinggi di permukaan, tetapi lebih rendah di lapisan bawah jika dibandingkan dengan metode nonlinier. Secara keseluruhan, metode linier ekuivalen memberikan hasil yang lebih konservatif, terutama dalam analisis struktur sederhana dengan nilai PGA kecil. Sebaliknya, metode nonlinier lebih akurat dalam memperhitungkan perilaku nonlinier tanah, terutama pada percepatan gempa besar. Penelitian ini mengindikasikan perlu adanya studi lanjutan mengenai analisis bangunan gedung pada kawasan pesisir kota Bengkulu untuk mengidentifikasi risiko yang lebih spesifik terkait infrastruktur yang ada.

Abstract

The coastal area of Bengkulu City is strategically located at the confluence of the Indo-Australian and Eurasian plates, making it a high-risk area for seismic activity. This plate confluence causes significant earthquake intensity that has an impact on various geotechnical problems in the area. This research aims to determine the comparison of two analysis methods equivalent linear and nonlinear, in assessing seismic response in the coastal area of Bengkulu City and test their reliability in seismic response analysis. The methodology used includes literature study, data collection, and

Keywords:

Earthquake

Linear equivalent modeling

Nonlinear modeling

Coastal

Seismic response

seismic response analysis using a comparison of equivalent linear and nonlinear methods with Pressure Dependent Hyperbolic (PDH) model that produces PGA, spectral response acceleration, and amplification factor. The analysis results indicate that the spectral response exceeds the design spectra at a period of 0,1–0,4 s, which could endanger low-floor buildings. The nonlinear method has an amplification factor of 0,91-1,52g, while the equivalent linear method is 1,01-1,60g, indicating that the equivalent linear method has the potential to cause greater structural damage. In addition, the equivalent linear method produces higher PGA values at the surface but lower in the lower layers when compared to the nonlinear method. Overall, the equivalent linear method provides more conservative results, especially in the analysis of simple structures with small PGA values. In contrast, the nonlinear method is more accurate in accounting for the nonlinear behavior of the soil, especially at large earthquake accelerations. This research indicates the need for further studies on the analysis of buildings in the coastal area of The Bengkulu City to identify more specific risks associated with existing infrastructure.

Corresponding Author: Mase, lmase@unib.ac.id

A. PENDAHULUAN

Kota Bengkulu termasuk dalam kategori kota yang rentan terhadap gempa di Indonesia. Hal ini disebabkan oleh daerahnya yang berada di dua jalur bencana akibat pertemuan lempeng aktif Indo-Australia dan Eurasia di Samudra Indonesia. Pertemuan lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia mempengaruhi Indonesia bagian barat, salah satunya Sumatera (Zebua, 2018). Selama dua dekade terakhir, tercatat berbagai kejadian gempa bumi di Bengkulu. Salah satunya adalah gempa bumi dengan magnitudo 7,9 M_w pada 12 September 2007 yang menyebabkan kerusakan berat intensitas 9-10 (Mase, 2015).

Peneliti terdahulu telah melakukan penelitian kegempaan di Kota Bengkulu. Mase, (2015) menyelidiki karakteristik gempa di Kota Bengkulu dan menyatakan bahwa gempa bumi 12 September 2007 adalah gempa dengan tingkat kerusakan tertinggi dalam 20 tahun terakhir. Mase, (2017) melakukan penelitian tentang likuifaksi dengan menggunakan konsep perambatan gelombang seismik di wilayah pesisir Provinsi Bengkulu, dan

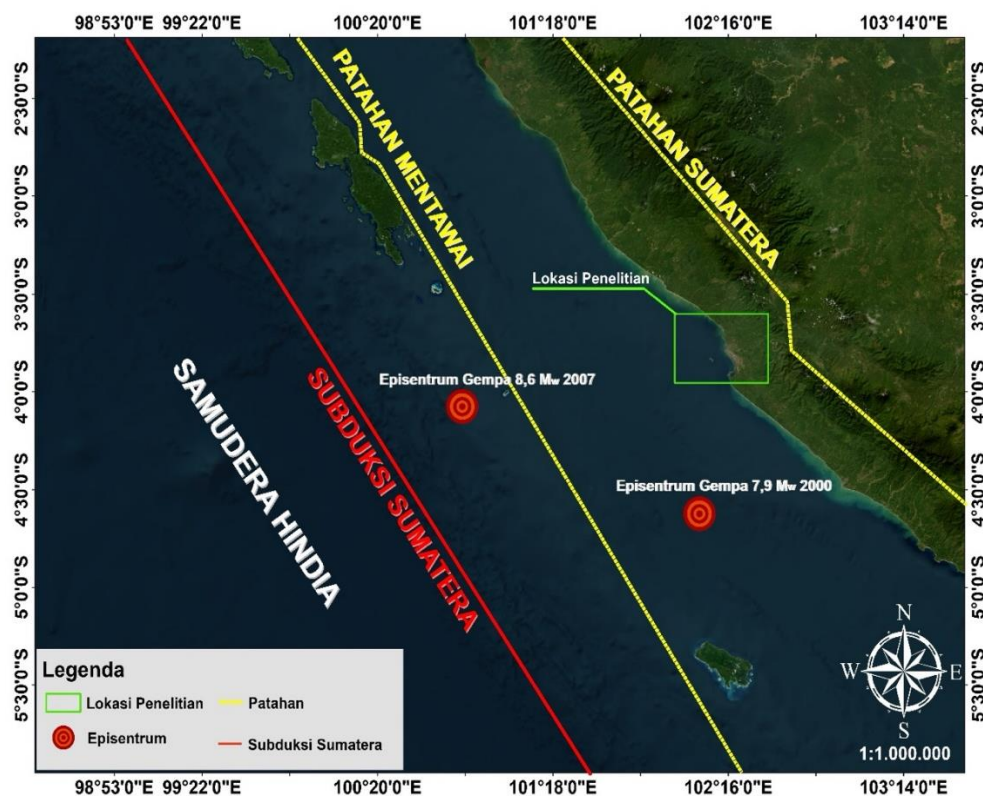
menyatakan bahwa Kota Bengkulu merupakan salah satu daerah yang sangat terdampak likuifaksi akibat gempa pada tahun 2007. Mase, (2018a) menyelidiki keandalan desain seismik SNI 03-1726-2012 untuk Kota Bengkulu, terutama di area yang mengalami kerusakan parah selama gempa 12 September 2007. Hasil penelitiannya menunjukkan bahwa gelombang seismik di permukaan cenderung melampaui desain seismik yang ada di Kota Bengkulu. Agustina, dkk., (2019) melakukan penelitian tentang analisis respon seismik di pusat Kota Bengkulu dan menyatakan bahwa lapisan tanah tersebut sangat sensitif. Mase, (2020) melakukan penelitian mengenai kerentanan bahaya seismik Kota Bengkulu dengan melakukan analisis respon seismik tanah satu dimensi nonlinear model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH).

Studi terbaru Mase, dkk., (2024) menyoroti kerentanan salah satu daerah di Kota Bengkulu, yaitu daerah Dendam Tak Sudah terhadap bahaya seismik. Danau Dendam Tak Sudah memiliki variasi kekakuan dan kecepatan gelombang geser yang signifikan, yang mempengaruhi respons seismik. Analisis

geofisika menunjukkan lapisan tanah dengan kecepatan gelombang geser rendah, yang dapat mengakibatkan amplifikasi gelombang seismik dan meningkatkan risiko kerusakan saat gempa.

Penelitian sebelumnya fokus pada dampak gempa, sementara respon seismik menggunakan perbandingan linier ekuivalen dan nonlinier di area pesisir Kota Bengkulu masih belum dilakukan secara spesifik. Penelitian membahas mengenai analisis respon seismik yang menghasilkan percepatan maksimum gempa, percepatan respon spektra, faktor amplifikasi.

Kota Bengkulu merupakan wilayah dengan tingkat kerawanan yang tinggi terhadap gempa. Salah satu diantaranya adalah kawasan pesisir Kota Bengkulu. Kawasan pesisir Kota Bengkulu terdiri dari Kecamatan Ratu Agung, Kecamatan Ratu Samban, dan Kecamatan Gading Cempaka. Berbagai sektor sedang mengalami perkembangan di wilayah ini, termasuk pariwisata, perdagangan, kesehatan, pendidikan. Tingginya risiko gempa di wilayah pesisir Kota Bengkulu disebabkan oleh faktor-faktor tektonis dan geologis yang dapat menyebabkan berbagai kerusakan besar. Peta kondisi tektonik provinsi Bengkulu ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta kondisi tektonik Provinsi Bengkulu

(Sumber : Modifikasi dari [Google Earth, 2024](#))

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Permodelan Perambatan Gelombang Gempa Satu Dimensi

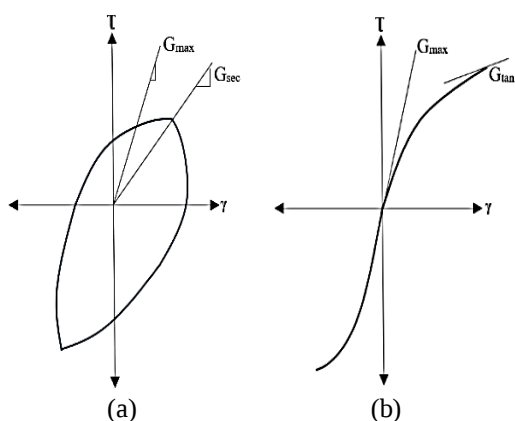
Permodelan perambatan gelombang yang digunakan adalah model

Pressure Dependent Hyperbolic (PDH) yang dikembangkan oleh [Hashash, \(2016\)](#), yang bertujuan untuk menyelesaikan permasalahan perambatan gelombang geser horizontal melalui lapisan tanah secara vertikal dengan

melakukan perbandingan linier ekuivalen dan nonlinier.

Linier ekuivalen merupakan suatu pendekatan untuk memodelkan tanah. Metode ini menggunakan pendekatan modulus geser ekuivalen (G) dan rasio redaman linier ekuivalen (ξ) untuk menggambarkan perilaku histeresis nonlinier tanah selama gempa.

Modulus geser dalam model ini diperkirakan dengan asumsi ekuivalen yang dihitung dengan G_{sec} . Estimasi modulus geser ditampilkan pada Gambar 2. Metode ini menghasilkan nilai percepatan permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan model tanah nonlinier terutama pada pasir lepas, pasir padat, lempung lunak, dan lempung kaku untuk gempa jarak pendek dan panjang (Yunita, dkk., 2015). Metode linier ekuivalen cenderung memiliki respon lebih kepada tanah terutama pada tekanan tinggi dan tidak mempertimbangkan efek plastisitas.



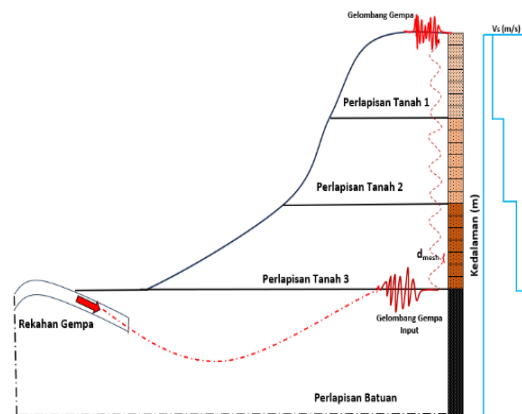
Gambar 2. Estimasi modulus geser
 (a). model linier ekuivalen (b). model nonlinier
 (Sumber : Mase, 2018b)

Model tanah menggunakan metode nonlinier merepresentasikan perilaku tanah nonlinier lebih baik daripada metode linier ekuivalen dalam menganalisa respons seismik. Metode ini mempertimbangkan perilaku nonlinier

tanah yang sebenarnya saat terkena getaran gempa, yaitu bagaimana modulus geser dan rasio redaman berubah seiring dengan peningkatan regangan (Yunita, dkk., 2015). Metode nonlinier lebih cocok untuk digunakan pada gempa dengan percepatan besar (Misliniyati, dkk., 2019).

2. Parameter Gelombang Gempa

Perambatan tersebut menggunakan analisa panjang gelombang yang dirambatkan dari batuan dasar hingga ke permukaan tanah. Pada Gambar 3 ditunjukkan skema perambatan gelombang gempa pada lapisan tanah yang dibagi menjadi beberapa *mesh*. Hashash, (2016) menyebutkan bahwa semua lapisan tanah harus memiliki frekuensi minimum 30 Hz. *Mesh* yang dihasilkan dari kecepatan gelombang yang dibagi menjadi 4 frekuensi dengan frekuensi yang dipakai adalah 33.



Gambar 3. Skema perambatan gelombang
 (Sumber : Modifikasi dari Mase, dkk., 2022)

Parameter gelombang gempa yang akan dihasilkan sebagai berikut :

- Peak ground acceleration* (PGA)
Peak ground acceleration (PGA) adalah nilai maksimum dari percepatan tanah yang terjadi di suatu daerah akibat getaran gempa selama periode tertentu (Ayubi, dkk., 2020). *Peak ground acceleration* (PGA) didapat dari nilai percepatan

gelombang seismik terbesar saat di permukaan tanah. Getaran seismik yang bergantung pada perambatan gelombang seismik dan sifat-sifat lapisan tanah menghasilkan percepatan tanah maksimum di suatu tempat (Utami dkk., 2023).

b. Faktor amplifikasi

Faktor amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan. Perbandingan nilai *peak ground acceleration* (PGA) di permukaan dan input motion menghasilkan nilai faktor amplifikasi. Faktor amplifikasi dapat mempengaruhi penyebaran dan interpretasi getaran gempa ke permukaan tanah, yang dapat meningkatkan kemungkinan kerusakan struktural pada bangunan. Gelombang seismik akan menjadi lebih besar saat merambat ke suatu medium awal yang dilaluinya (Wibowo & Huda, 2020).

c. Percepatan respon spektra

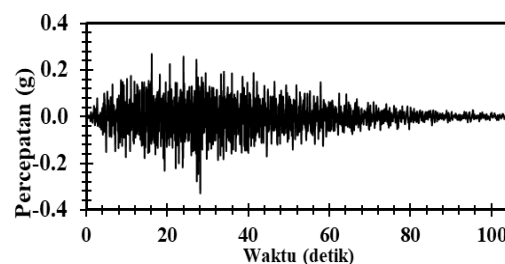
Percepatan respon spektra terdiri atas percepatan respon spektra pada periode panjang dan periode pendek. Berdasarkan penelitian Mase, (2020) periode T_n berguna untuk memperkirakan respons tanah yang mempengaruhi bangunan bertingkat rendah terutama pada bangunan dengan 1-2 lantai. Sementara itu, periode T_n sebesar 1 detik mencerminkan respon tanah yang mempengaruhi bangunan bertingkat tinggi dimana secara umum diprediksi dengan $n = T_n / 0,1$ dimana n merupakan jumlah lantai).

C. METODE PENELITIAN

1. Metode Penelitian

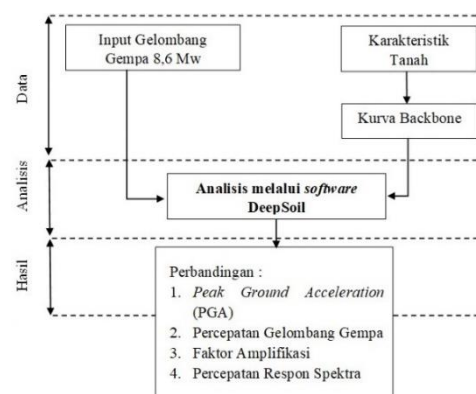
Tahapan penelitian terdiri dari studi pustaka, pengumpulan material, analisis respon seismik dari perambatan

gelombang seismik, serta interpretasi hasil. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak *DeepSoil* untuk menganalisis dampak gempa Bengkulu-Mentawai 2007 terhadap struktur tanah. Gelombang gempa input Bengkulu-Mentawai 2007 terskala ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Gelombang gempa input Bengkulu-Mentawai 2007 terskala
(Sumber : Mase, 2017)

Input utama berupa data gempa dan data perlapisan tanah untuk menghasilkan output berupa parameter penting seperti *peak ground acceleration* (PGA), percepatan gelombang gempa, dan faktor amplifikasi. Diagram alir analisis respon seismik ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram alir analisis respon seismik

Untuk analisis respon seismik, penelitian ini menggunakan persamaan berikut:

a. Perambatan gelombang gempa

Perambatan gelombang gempa dirambatkan dari batuan dasar hingga ke permukaan tanah. Lapisan tanah

dibagi menjadi beberapa *mesh* atau pembagian domain tanah. Berdasarkan Hashash, (2016) *mesh* dapat diperoleh dengan menggunakan asumsi seperti pada persamaan (1) berikut :

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

Keterangan :

D = *Mesh*
 Vs = Kecepatan gelombang geser (m/s)
 F_{max} = Frekuensi maksimum

b. Faktor amplifikasi

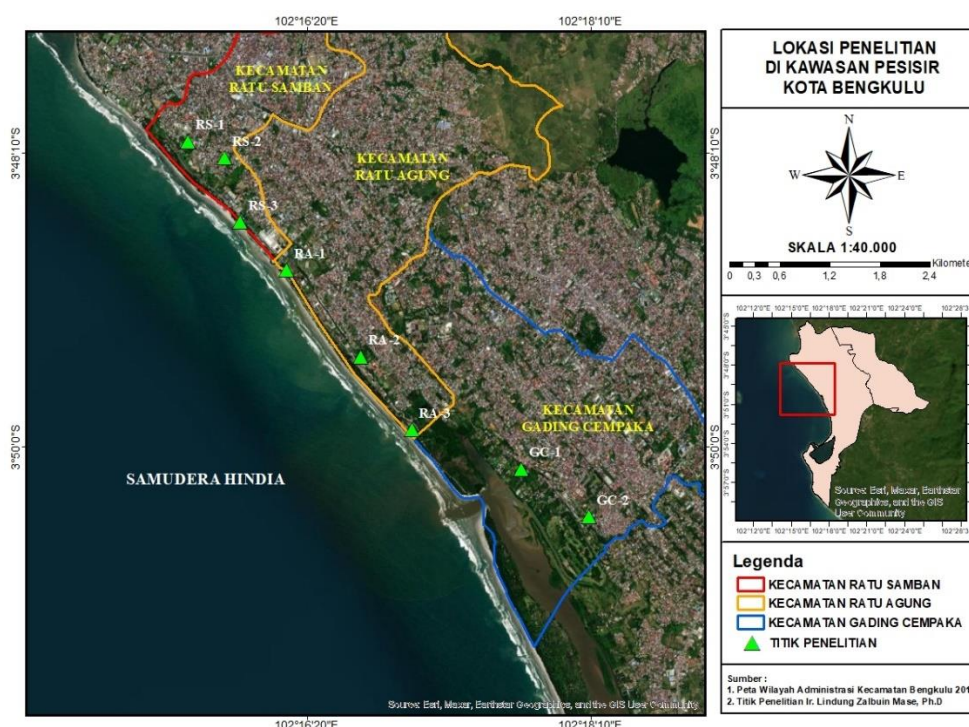
Menurut Hashash, (2016), faktor amplifikasi diperoleh dengan persamaan (2) berikut :

$$A = \frac{PGA_{\text{permukaan}}}{PGA_{\text{input}}} \quad (2)$$

Keterangan :

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

Gambar 6 menyajikan peta lokasi dengan memberikan gambaran posisi geografis penelitian. Peta lokasi mencakup 3 kecamatan yaitu Kecamatan Ratu Samban (RS-1, RS-2, RS-3), Kecamatan Ratu Agung (RA-1, RA-2, RA-3), dan Kecamatan Gading Cempaka (GC-1, GC-2).



Gambar 6. Peta lokasi penelitian
 (Sumber : Modifikasi dari Google Earth, 2024)

Gambar 7 menampilkan hasil penyelidikan tanah, yang memberikan visualisasi detail mengenai karakteristik tanah di lokasi tersebut yang diperoleh dari investigasi geoteknik.

Metode perilaku tanah Robertson & Cabal, (2010) digunakan untuk menghasilkan perlapisan tanah. Material terdiri dari 8 data perlapisan tanah dan kedalaman batuan dasar yang tersebar di

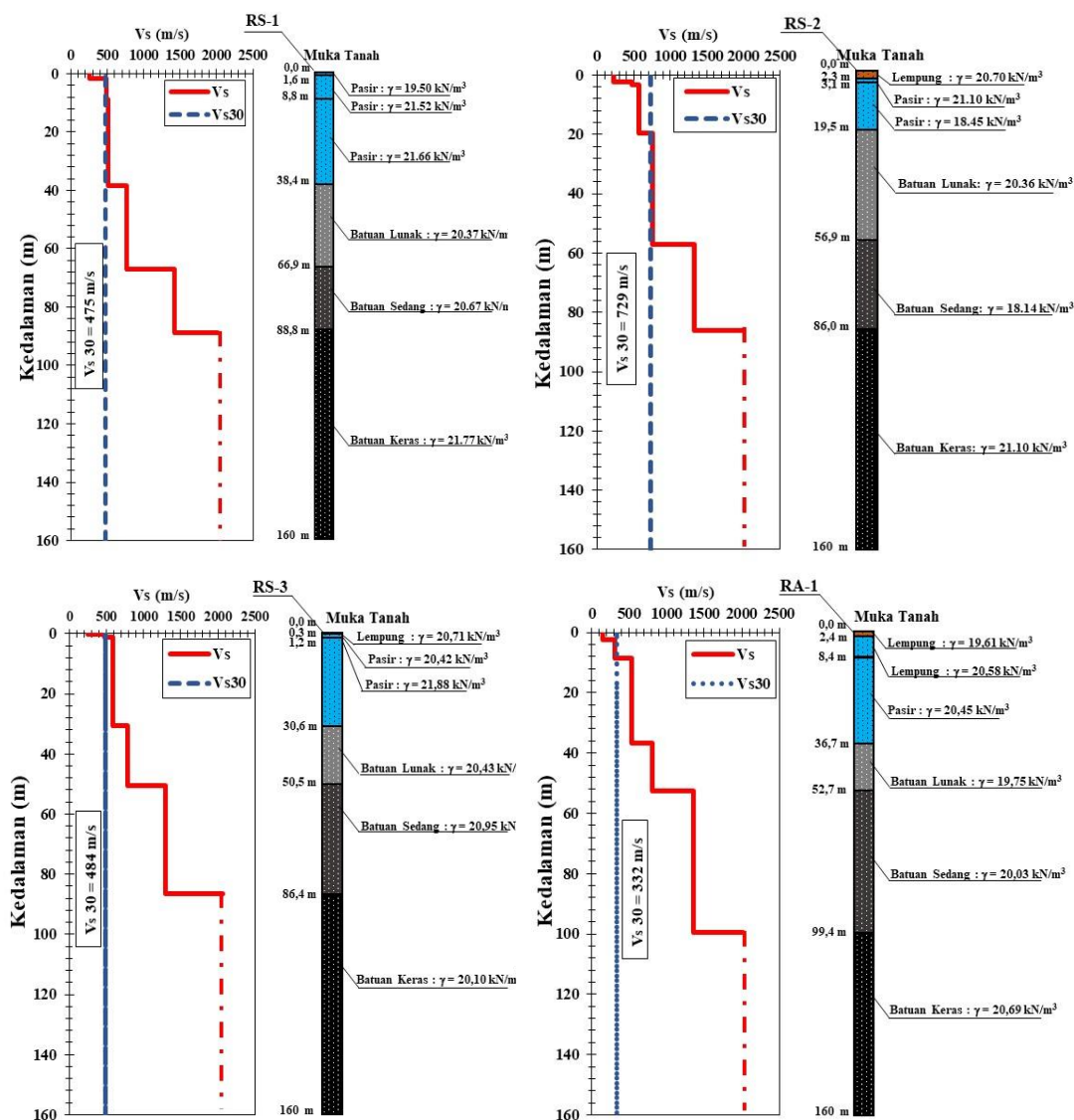
3 kecamatan di kota Bengkulu serta satu gelombang gempa. Hasil penyelidikan tanah yang diteliti berdasarkan penentuan kelas situs [SNI 1726:2019](#) menunjukkan bahwa area RS-1, RS-2, RS-3, RA-2, RA-3 GC-1, dan GC-2 termasuk pada jenis tanah keras (SC). Sementara area RA-1 merupakan area yang termasuk pada jenis tanah sedang (SD). Area-area ini didominasi oleh perlapisan tanah pasir, dimana tanah pasir memiliki karakteristik yang tidak rapat sehingga dapat meredam gelombang gempa. Namun, dalam beberapa kondisi, terutama pada lapisan pasir yang cukup tebal dan berada di lapisan tanah yang lebih keras,

gelombang gempa sering kali mengalami amplifikasi yang artinya mengindikasikan gelombang gempa bisa menjadi lebih kuat di permukaan.

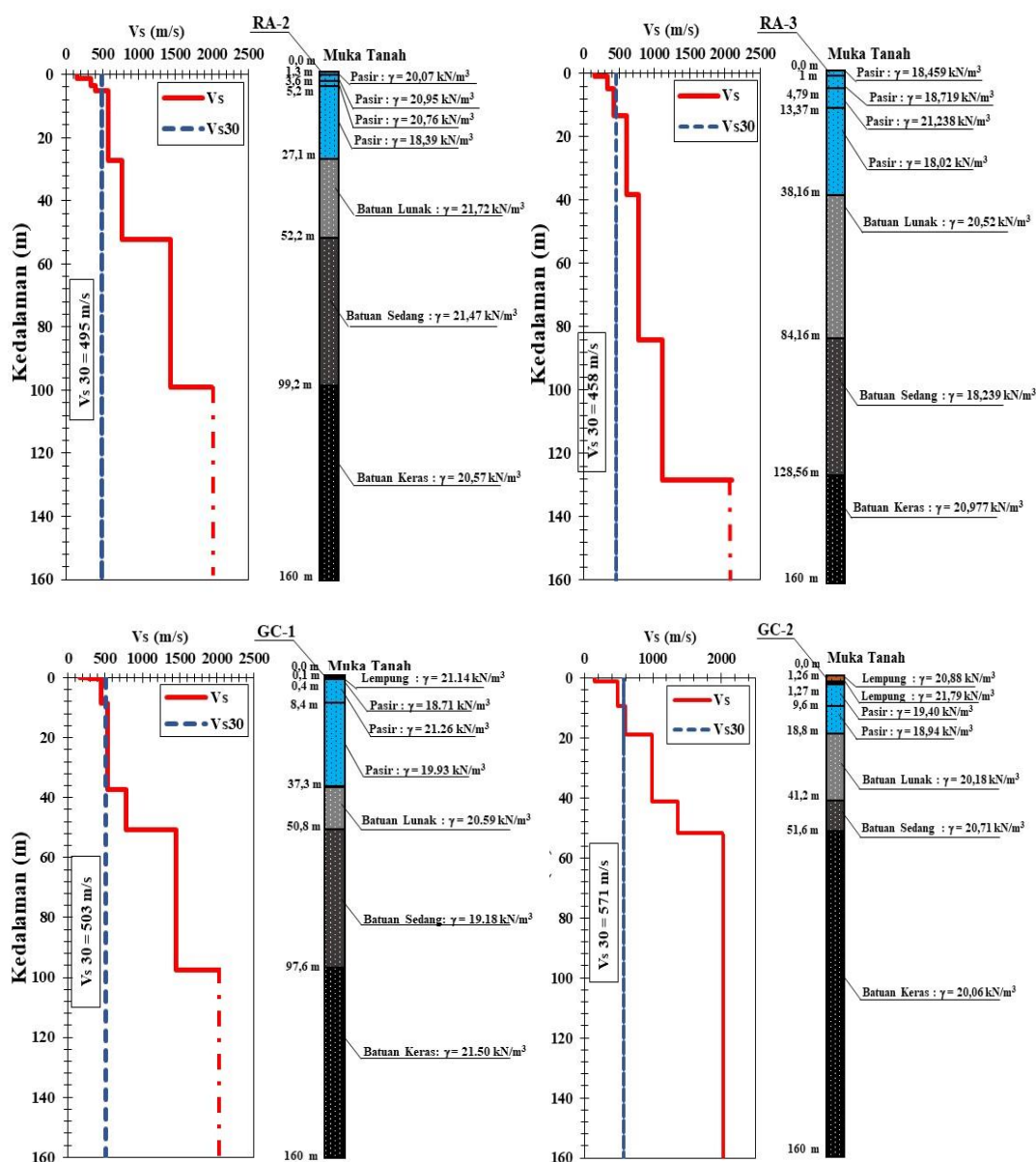
D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Peak Ground Acceleration (PGA)

Hasil analisis perbandingan *Peak Ground Acceleration* (PGA) metode linier ekuivalen dan nonlinier pada titik RS-1 hingga GC-2 dapat dilihat pada Gambar 8. Nilai PGA tertinggi terdapat pada lapisan permukaan, sedangkan nilai PGA terendah terdapat pada lapisan bawah.



Gambar 7. Hasil penyelidikan tanah pada 8 titik penelitian

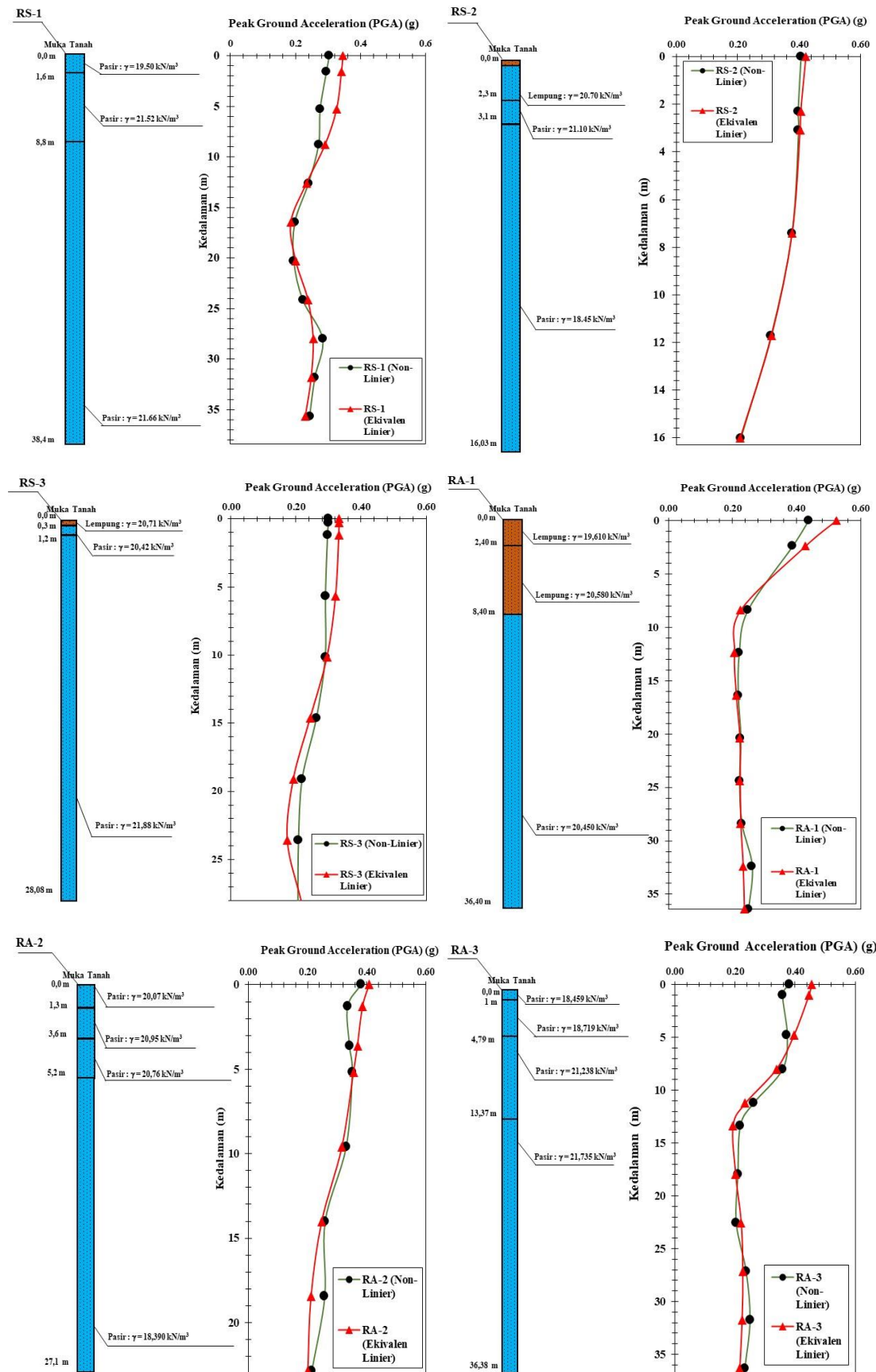


Gambar 7. Hasil penyelidikan tanah pada 8 titik penelitian (lanjutan)

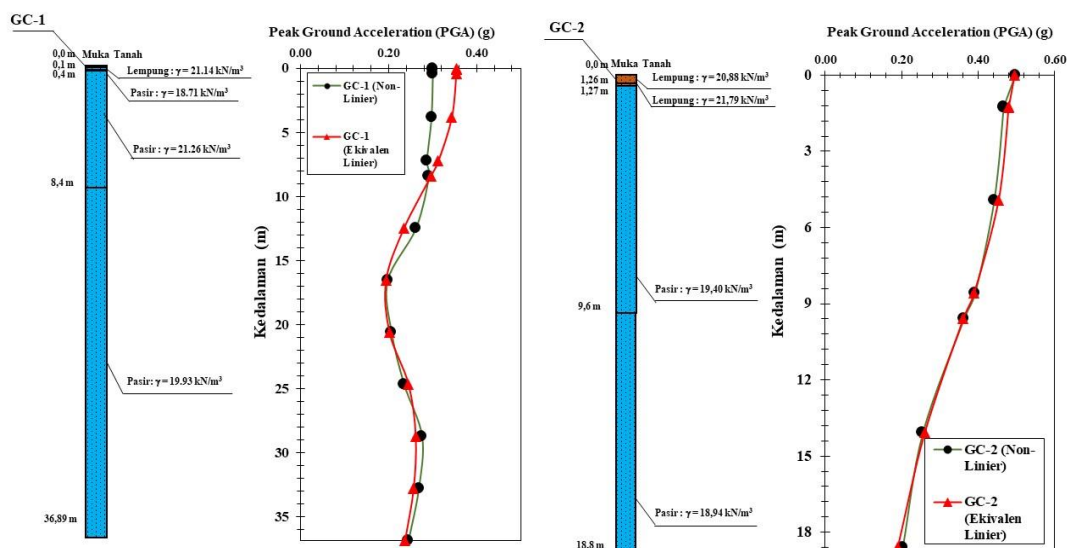
Saat dibandingkan, model linier ekuivalen memiliki nilai PGA yang lebih tinggi di permukaan, tetapi lebih rendah pada lapisan bawah dibandingkan dengan model nonlinier. Metode linier ekuivalen cenderung melebihkan pergerakan tanah.

Nilai PGA digunakan sebagai indikator dalam menilai tingkat risiko gempa. Nilai PGA yang berada dalam kisaran 0,3g-0,4g dianggap memiliki risiko yang tinggi, dan nilai PGA > 0,4g dianggap memiliki risiko yang sangat tinggi.

Hasil penelitian dengan nilai PGA model nonlinier pada kisaran 0,19-0,49g, dan nilai PGA model linier ekuivalen berkisar 0,17-0,52g menunjukkan bahwa area tersebut memiliki tingkat risiko gempa yang sangat tinggi terhadap kerusakan struktur bangunan. kawasan pesisir Kota Bengkulu memiliki risiko dampak kerusakan bangunan yang tinggi saat terjadi gempa. Nilai PGA yang tinggi ini sejalan dengan formasi geologi yang dominan menyusun kawasan pesisir.



Gambar 8. Hasil analisis perbandingan nilai PGA model linier ekuivalen dan nonlinier



Gambar 8. Hasil analisis perbandingan nilai PGA model linier ekuivalen dan nonlinier (lanjutan)

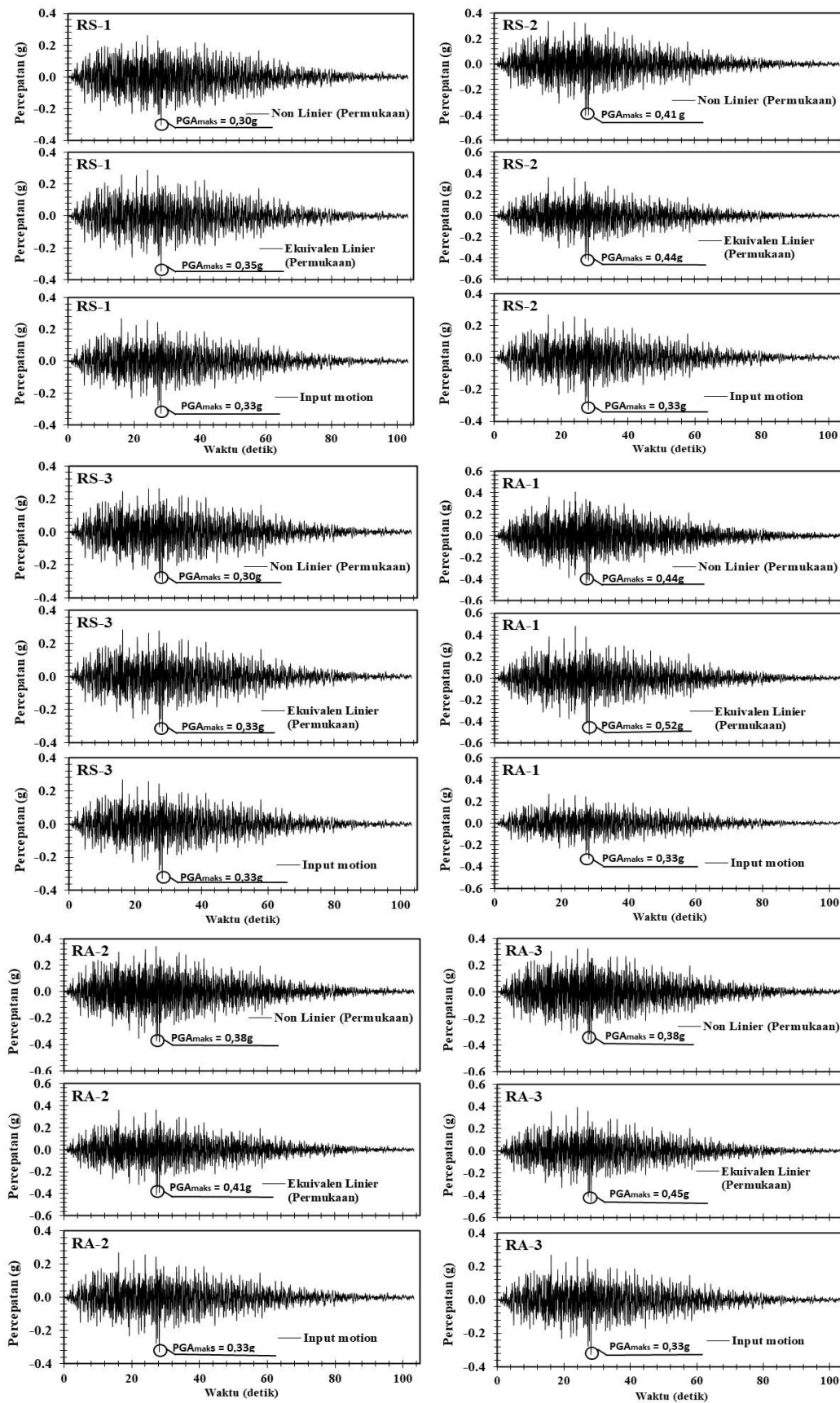
Gambar 8 memperlihatkan perbandingan antara nilai *peak ground acceleration* (PGA) yang diperoleh dengan metode linier ekuivalen dan nonlinier. Hasil perbandingan tersebut menunjukkan bahwa metode linier ekuivalen menghasilkan nilai PGA yang lebih tinggi di permukaan dibandingkan dengan metode nonlinier. Hal ini mengindikasikan bahwa metode linier ekuivalen cenderung memberikan estimasi yang lebih besar terhadap pergerakan tanah. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Mase, dkk., (2020), yang menyatakan bahwa metode linier ekuivalen dapat menghasilkan overestimate pada nilai PGA, khususnya dalam hal tegangan geser yang terjadi setelah regangan geser mencapai kondisi plastis sempurna (Yoshida, 2015). Pada lokasi tersebut, amplifikasi seismik yang terjadi menyebabkan percepatan puncak tanah (PGA) di permukaan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan kedalaman bawah permukaan. Fenomena amplifikasi ini dipengaruhi oleh kondisi geologi lokal, yang berperan signifikan dalam menentukan besarnya PGA yang tercatat di permukaan (Mase, 2020). Formasi geologi di kawasan penelitian

memainkan peran utama dalam nilai PGA yang dihasilkan.

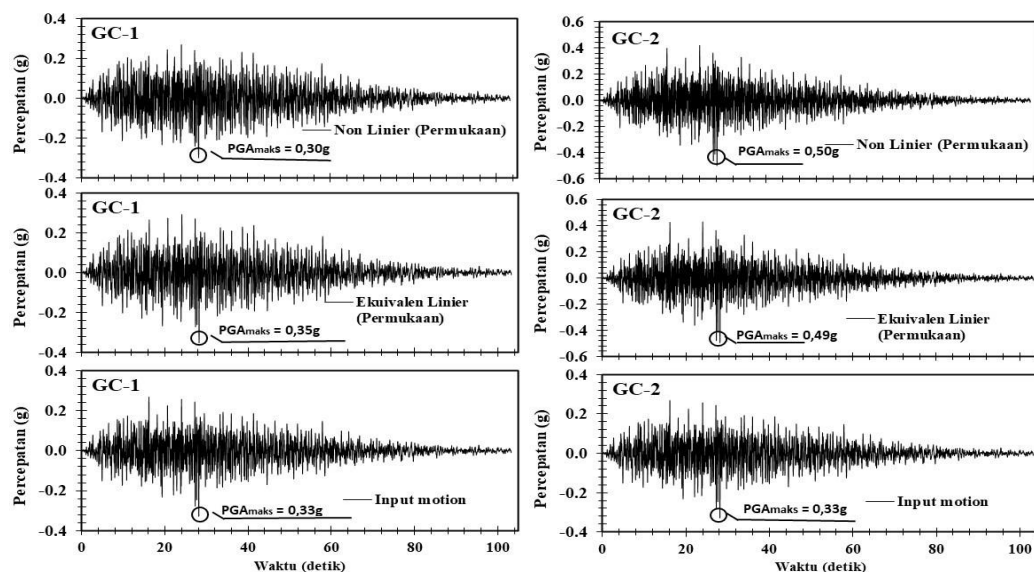
2. Percepatan Gelombang Gempa Untuk Analisa Riwayat Waktu

Grafik perbandingan antara waktu percepatan gelombang gempa dipermukaan tanah yang dihasilkan dari perambatan gelombang gempa dapat dilihat pada Gambar 9. Nilai percepatan gelombang gempa terbesar secara keseluruhan didominasi oleh metode linier ekuivalen jika dibandingkan dengan nonlinier.

Pada metode linier ekuivalen, percepatan gelombang gempa terbesar berada di area RA-1 sebesar 0,52g serta nilai terkecilnya terletak pada area RS-3 0,33g. Sedangkan pada metode nonlinier, nilai percepatan gelombang gempa terbesar terletak pada area GC-2 sebesar 0,49g, serta nilai terkecilnya terdapat pada area GC-1 sebesar 0,30g. Analisis perbandingan percepatan gelombang gempa metode linier ekuivalen permukaan, nonlinier permukaan, dan *input motion* pada 8 titik penelitian dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Hasil analisis perbandingan percepatan gelombang gempa metode linier ekuivalen permukaan, nonlinier permukaan dan *input motion* pada 8 titik penelitian



Gambar 9. Hasil analisis perbandingan percepatan gelombang gempa metode linier ekuivalen permukaan, nonlinier permukaan, dan *input motion* pada 8 titik penelitian (lanjutan)

Gambar 9 menunjukkan grafik percepatan rambat gelombang gempa. Gerakan input yang diterapkan pada setiap lokasi di bagian bawah umumnya cenderung mengalami penguatan saat mencapai permukaan tanah. Hasil penelitian menunjukkan bahwa percepatan terbesar terjadi dengan metode linier ekuivalen, sementara percepatan terkecil tercatat pada input motion. Metode linier ekuivalen memiliki nilai yang lebih besar karena adanya perkiraan berlebihan terhadap tegangan geser dan adanya lapisan lunak dengan resistensi yang relatif rendah dan mengakibatkan peningkatan percepatan gelombang di permukaan (Mase, 2018a). Hasil perambatan gelombang dengan metode linier ekuivalen cenderung menghasilkan percepatan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan metode nonlinier. Hal ini disebabkan karena adanya estimasi berlebih pada tegangan geser yang juga menyebabkan nilai PGA menjadi lebih signifikan. Selain itu, pengaruh lapisan lunak dengan

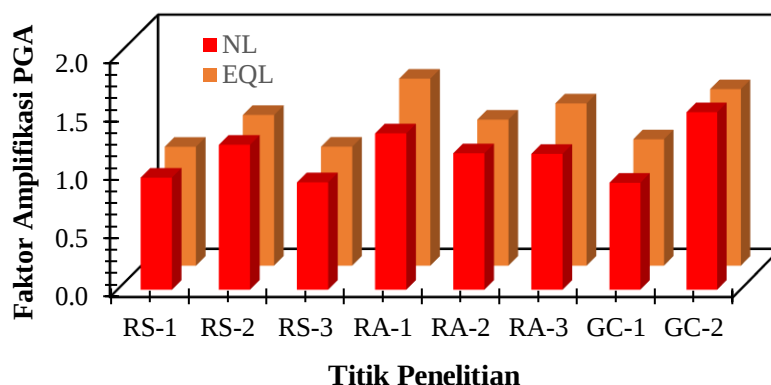
karakteristik resistansi yang relatif rendah.

3. Faktor Amplifikasi

Gambar 10 menunjukkan perbandingan nilai faktor amplifikasi. Faktor amplifikasi nonlinier memiliki rentang 0,91–1,52, sedangkan faktor amplifikasi linier ekuivalen memiliki rentang 1,01–1,60. Sehingga linier ekuivalen memiliki potensi kerusakan struktural bangunan yang lebih tinggi akibat gempa bumi dibandingkan dengan nonlinier. Yoshida, (2015) menyebutkan pembesaran gelombang di permukaan dipengaruhi keberadaan lapisan lepas yang memiliki ketebalan yang signifikan seperti dijumpai pada titik RA-1 dan GC-2. titik tersebut memiliki perlapisan lempung yang cukup tebal, sehingga berpotensi memperbesar nilai PGA, khususnya pada perlapisan yang dekat dengan permukaan. Hasil serupa juga dilaporkan oleh Putri, dkk., (2017) yang menyatakan perlapisan lunak yang tebal mengalami pembesaran nilai amplifikasi PGA. Semakin tinggi nilai faktor amplifikasi, maka semakin besar potensi

kerusakan struktural akibat gempa bumi karena tanah yang mengalami amplifikasi

cenderung memperkuat intensitas getaran gempa.



Gambar 10. Hasil analisis perbandingan faktor amplifikasi model linier ekuivalen dan nonlinier

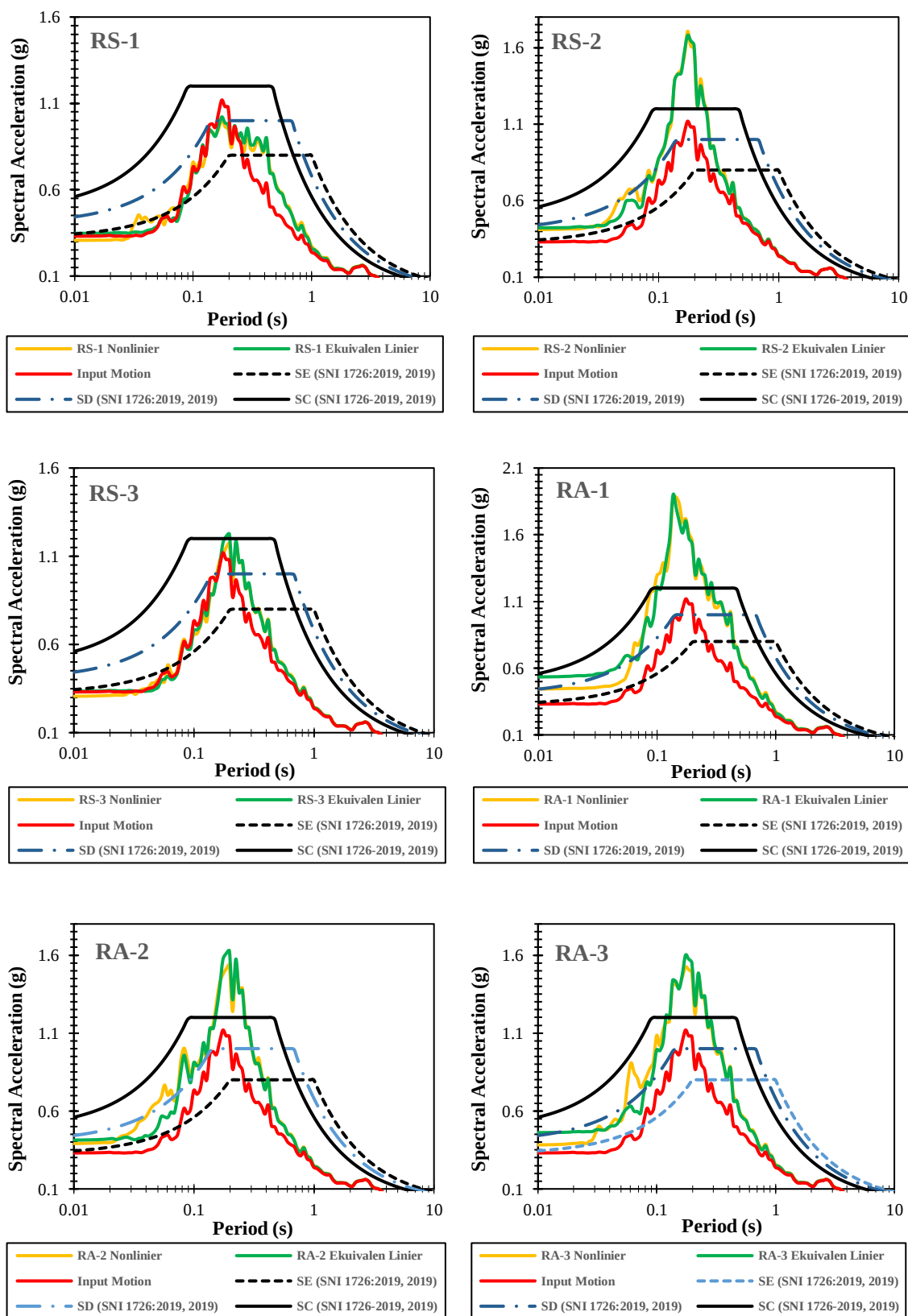
Gambar 10 menunjukkan grafik nilai faktor amplifikasi pada setiap titik pada area penelitian. Semakin tinggi nilai faktor amplifikasi, maka semakin besar pula potensi kerusakan struktur akibat gempa bumi. Tanah yang teramplifikasi cenderung memperkuat intensitas getaran gempa, yang dapat menyebabkan kerusakan yang lebih parah pada infrastruktur yang berdiri di atasnya. Merujuk pada penelitian [Partono, dkk., \(2013\)](#), nilai faktor amplifikasi linier ekuivalen lebih besar daripada nonlinier, sehingga memiliki potensi kerusakan struktur bangunan yang tinggi pada saat terjadi gempa.

4. Percepatan Spektra

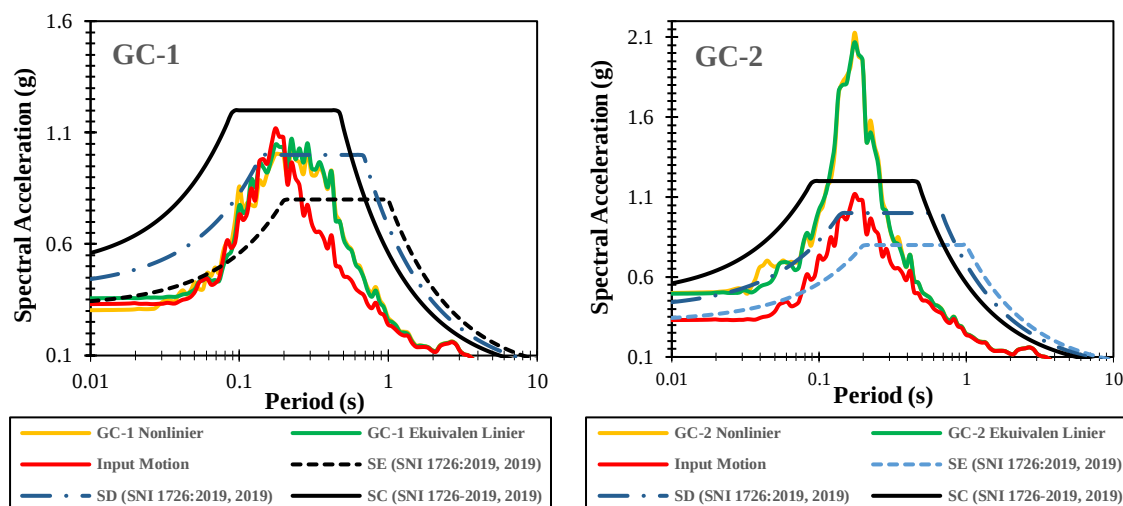
Pada Gambar 11 memuat perbandingan hasil analisis percepatan respon spektra terhadap [SNI 1726:2019](#). Nilai percepatan respon spektra mayoritas melampaui [SNI 1726:2019](#) khususnya pada kelas situs tanah sedang (SD) dan lunak (SE) pada periode pendek seperti pada area RS-2, RS-3, RA-1, RA-2, RA-3, dan GC-2. Respon spektra dari perambatan gelombang seismik melewati spektra desain pada periode pendek, yaitu pada rentang 0,1 sampai 0,4 detik, yang

mana menurut [International Code Council, \(2006\)](#) periode tersebut menunjukkan periode bangunan rendah sampai dengan sedang, seperti bangunan berlantai 2 sampai dengan 4. Dapat diartikan bahwa efek gelombang lebih dominan terjadi pada bangunan berlantai rendah. Maka perlu dilakukan peninjauan ulang pada struktur bangunan berlantai rendah pada area tersebut.

Gambar 11 juga menunjukkan hasil perambatan gelombang linier ekuivalen mayoritas lebih tinggi dibandingkan dengan nonlinier karena respon linier ekuivalen yang cenderung elastis dibandingkan dengan respon nonlinier. Hal ini mengindikasikan adanya amplifikasi gerakan tanah yang signifikan dan berkaitan erat dengan karakteristik tanah yang lebih lunak dan tidak padat. Dengan demikian, bahwa untuk lokasi-lokasi yang melebihi batas yang ditetapkan oleh [SNI 1726:2019](#), perlu dilakukan peninjauan kembali terhadap desain bangunan bertingkat rendah. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa nilai T_n sebesar 0,2 detik digunakan untuk memprediksi respons tanah pada bangunan berlantai rendah, dengan estimasi untuk bangunan bertingkat 1 hingga 2 ([Mase, 2020](#)).



Gambar 11. Hasil analisis percepatan respon spektra terhadap SNI 1726:2019



Gambar 11. Hasil analisis percepatan respon spektra terhadap SNI 1726:2019 (lanjutan)

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan, maka dapat disimpulkan bahwa area penelitian yang tersebar pada kecamatan Ratu Agung, Ratu Samban, Gading Cempaka didominasi oleh perlapisan tanah pasir dengan kepadatan rendah yang diartikan dapat memberikan dampak berupa rendahnya daya dukung tanah dan likuifaksi. Penelitian menghasilkan nilai *Peak Ground Acceleration* (PGA), faktor amplifikasi, dan percepatan respon spektra yang menunjukkan adanya kerusakan bangunan yang tinggi akibat risiko gempa bumi serta menunjukkan bahwa metode linier ekuivalen memiliki hasil analisis yang lebih konservatif dibandingkan dengan nonlinier. Namun, metode nonlinier menganalisis lebih realistis dengan mempertimbangkan perilaku nonlinier dari tanah. Pada implementasinya, metode nonlinier lebih cocok digunakan pada percepatan gempa yang besar dibandingkan dengan metode linier ekuivalen. Sementara metode linier ekuivalen dapat digunakan pada analisa struktur sederhana dengan nilai PGA yang kecil. Oleh karena itu, untuk keperluan desain dan asesmen pada lokasi yang telah berdiri infrastruktur,

maka analisis nonlinier sangat dianjurkan.

Mengontemplasikan pada hasil penelitian, penulis menganjurkan untuk mempertimbangkan desain spektra berdasarkan standar yang berlaku untuk menghindari dampak yang lebih besar pada bangunan khususnya bangunan berlantai rendah di kawasan pesisir kota Bengkulu. Studi ini belum mempertimbangkan bangunan gedung yang berdiri pada titik yang diinvestigasi. Hasil studi ini dapat menjadi informasi dalam melakukan asesmen bangunan gedung pada area yang diteliti. Studi terkait akan disajikan pada studi di masa yang akan datang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Tasya Aulia Farazak, S.T, dan Yuni Nurul Sukmawati, S.T, serta tim riset grup Teknik Kegempaan Laboratorium Geoteknik Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Bengkulu yang telah membantu penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Agustina, S., dkk. (2019). Analisis

- Respon Seismik Area Sentral Di Kota Bengkulu. *Prosiding 6th ACE Conference* (pp. 891–901). Padang, Indonesia : Jurusan Teknik Sipil, Universitas Andalas.
https://repository.uniba.ac.id/432/1/prosiding_ACE6_2019_2.pdf
- Ayubi, S. S. A., Karyanto, Haerudin, N., Rasimeng, S., & Wibowo, R. C. (2020). Zonasi Site Effect Dan Analisis Bahaya Penguatan Gempa Menggunakan Metode Dsha Untuk Menentukan Pga Di Kabupaten Sumba Barat Daya. *Indonesian Physical Review* 3(2), 38–53.
https://repository.uniba.ac.id/432/1/prosiding_ACE6_2019_2.pdf
- Badan Standarisasi Nasional. (2019). *SNI 1726:2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung*.
<https://shorturl.at/gD3rY>
- Google Earth. (2024). *Zona Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu*.
<https://shorturl.at/xuoqe>
- Hashash, Y. M. A. (2016). *User Manual Deepsoil Version 7.1 Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns*, Departement of Civil and Environmental Engineering, University of Illinois Urbana-Champaign, Illinois, United States.
https://deepsoil.cee.illinois.edu/Files/deepsoil_User_Manual_v7.pdf
- International Code Council. (2006). *International Building Code*, United States.
<https://codes.iccsafe.org/content/IBC2006>
- Mase, L. Z. (2015). Karakteristik Gempa di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmiah Bidang Sains - Teknologi Murni Disiplin dan Antar Disiplin*, II(15), 25–34.
<https://shorturl.at/GpyPt>
- Mase, L. Z. (2017). 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. (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. (2020). Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 5433–5455.
<https://doi.org/10.1007/s10706-020-01375-6>
- Mase, L. Z., Amri, K., Ueda, K., Apriani, R., Utami, F., Tobita, T., & Likitlersuang, S. (2024). Geophysical Investigation on The Subsoil Characteristics of The Dendam Tak Sudah Lake Site in Bengkulu City, Indonesia. *Acta Geophysica*, 72(2), 893–913.
<https://doi.org/10.1007/s11600-023-01158-6>
- Mase, L. Z., Likitlersuang, S., Tobita, T., Chaiprakaikeow, S., & Soralump, S. (2020). Local Site Investigation of Liquefied Soils Caused by Earthquake in Northern Thailand. *Journal of Earthquake Engineering*, 24(7), 1181–1204.

- <https://doi.org/10.1080/13632469.2018.1469441>
- Mase, L. Z., Yundrismein, R., Nursalam, M. A., Putra, S. M., Shelina, A., & Nugroho, S. H. (2022). A Study of Building Performance Inspection Based on a Combination of Site-Specific Response Analysis and Structural Analysis (A Case Study of The Lighthouse View Tower in Bengkulu City, Indonesia). *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 37(3), 197–209.
<https://doi.org/10.17794/rgn.2022.3.14>
- Misliniyati, R., Mase, L. Z., Irsyam, M., Hendriyawan, & Sahadewa, A. (2019). 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>
- Partono, W., Irsyam, M., Prabandiyani, S., & Maarif, S. (2013). Aplikasi Metode HVSR pada Perhitungan Faktor Amplifikasi Tanah di Kota Semarang. *Jurnal Ilmu Dan Terapan Bidang Teknik Sipil*, 19(2), 125–134.
<https://doi.org/10.14710/mkts.v19i2.8421>
- Putri, A., Purwanto, M. S., & Widodo, A. (2017). Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor I Jalur Sesar Kendeng. *Geosaintek*, 03(2), 107–114.
<http://dx.doi.org/10.12962/j25023659.v3i2.2966>
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2010). *Guide To Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*, Gregg Drilling & Testing, Greg Drilling & Testing, Inc, California.
- <https://www.cpt-robertson.com/PublicationsPDF/CP T GeoEnvironGuide 2010.pdf>
- Utami, F., Mase, L. Z., Supriyani, F., & Mahendra, Y. (2023). Pemanfaatan Analisis Perambatan Gelombang Seismik dan Implementasinya pada Struktur Bangunan. *Potensi : Jurnal Sipil Politeknik*, 25(1), 9–14.
<https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/potensi/article/view/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.
<https://shorturl.at/F5gDn>
- Yoshida, N. (2015). *Seismic Ground Response Analysis*, Springer, Berlin, Germany.
<https://link.springer.com/book/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>
- Zebua, A. W. (2018). Analisis Gaya Gempa Bangunan Rumah Tinggal Di Wilayah Gempa Tinggi. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 4(1), 23–35.
<https://doi.org/10.31849/siklus.v4i1.1128>



© 2024 Siklus Jurnal Teknik Sipil All rights reserved. This is an open access article distributed under the terms of the CC BY License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)