



Model Respons Seismik Tanah di Kecamatan Selebar Akibat Perambatan Gelombang Gempa Satu Dimensi

Zhehan Fahrezi, Rena Misliniyati, Khairul Amri, *Lindung Zalbuin Mase, Hardiansyah

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu, Kota Bengkulu.

^{*)}lmase@unib.ac.id

Received: 10 Juni 2024 Revised: 22 Februari 2025 Accepted: 28 Februari 2025

Abstract

This study was conducted to determine the response of soil layers due to earthquake wave propagation in Selebar District, Bengkulu City. This study began with field investigations at six points. Seismic response analysis was built using a one-dimensional wave propagation model with linear and non-linear equivalent methods. The 2007 Bengkulu-Mentawai earthquake wave was applied as the input wave. This study compares PGA, spectral response acceleration, and amplification factors produced by the two methods. The PGA value created by the linear equivalent method is approximately 5%-30 % greater than the non-linear method. The amplification factor produced by the linear equivalent method experiences a greater amplification of roughly 3%-30 % than the non-linear method. Spectral acceleration has generally exceeded the seismic design applicable in the short period, with a value of 1.2g - 2.1g for the linear equivalent method and 1.1g - 1.6g for the non-linear method. Therefore, updating the seismic design for building planning in the Selebar District, Bengkulu City, is necessary.

Keywords: Equivalent linear, nonlinear, spectral acceleration, seismic response

Abstrak

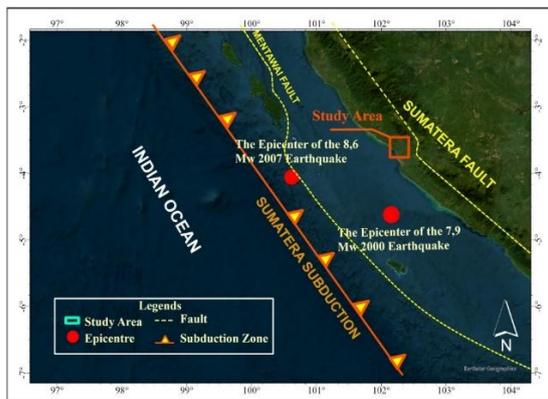
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui respons lapisan tanah akibat perambatan gelombang gempa di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu. Studi ini diawali dengan investigasi di lapangan pada enam titik. Analisis respons seismik dibangun berdasarkan model perambatan gelombang satu dimensi dengan metode ekuivalen linier dan non-linier. Gelombang gempa terskala Bengkulu-Mentawai tahun 2007 diterapkan sebagai gelombang input. Perbandingan PGA, percepatan respon spektra, dan faktor amplifikasi yang dihasilkan dari kedua metode disajikan dalam penelitian ini. Nilai PGA yang dihasilkan dengan metode ekuivalen linier lebih besar sekitar 5% - 30% dari metode non-linier. Faktor amplifikasi yang dihasilkan dengan metode ekuivalen linier mengalami penguatan lebih besar sekitar 3% - 30% dari metode non-linier. Percepatan spektra secara umum telah melewati desain seismik yang berlaku pada periode pendek, dengan nilai sebesar 1,2g – 2,1g untuk metode ekuivalen linier dan 1,1g – 1,6g untuk metode non-linier. Maka perlu adanya pembaharuan desain seismik untuk perencanaan bangunan gedung di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu.

Kata kunci: Ekuivalen linier, nonlinier, percepatan spectra, respon seismik

Pendahuluan

Kota Bengkulu merupakan salah satu wilayah yang dipengaruhi oleh aktivitas subduksi. Wilayahnya yang terletak di dekat zona subduksi lempeng samudera indo-australia dengan lempeng Eurasia mengakibatkan daerah ini rawan terhadap kejadian gempa. Bencana gempa sudah lama menjadi ancaman utama terhadap perkembangan kota Bengkulu. Mase (2018) melaporkan bahwa dalam

kurun waktu 20 tahun terakhir, telah terjadi dua kali gempa bumi kuat dengan magnitudo hingga 8,6 mW di Kota Bengkulu. Gempa pertama berkekuatan 7,9 Mw terjadi pada tanggal 4 Juni 2000 (Gempa Bengkulu Enggano) dan gempa kedua berkekuatan Mw 8,6 (Gempa Bengkulu–Mentawai) terjadi pada tanggal 12 September 2007. Kedua gempa tersebut menimbulkan dampak yang serius, seperti kerusakan struktur bangunan, korban meninggal dunia, dan likuifaksi di Kota Bengkulu.



Gambar 1. Kondisi Seismotektonik di Provinsi Bengkulu (Dimodifikasi dari Mase, (2018)).

Provinsi Bengkulu diapit oleh Sesar Sumatra, Sesar Mentawai dan Zona Subduksi Sumatra. Gempa bumi di Provinsi Bengkulu dan wilayah sekitarnya bisa di picu oleh aktivitas Zona Subduksi Sumatra, Sesar Mentawai, serta Sesar Sumatra. Oleh sebab itu, Provinsi Bengkulu menjadi salah satu wilayah di Indonesia yang rawan sekali mengalami bencana gempa bumi. Kondisi seismotektonik di Kota Bengkulu dapat dilihat pada Gambar 1.

Salah satu Kecamatan yang berada di Kota Bengkulu adalah Kecamatan Selebar. Kawasan ini merupakan Kawasan berkembang yang direncanakan sebagai sub pelayanan kota II dengan fungsi sebagai pusat pemerintahan kecamatan, pelayanan umum, pusat perdagangan dan jasa, pusat industri, kesehatan, pusat olahraga, dan simpul transportasi skala nasional. Fasilitas-fasilitas penting yang terdapat di kecamatan selebar antara lain Bandara Fatmawati Soekarno, Universitas Islam Negeri Fatmawati Soekarno, TOL Bengkulu-Taba Penanjung, dan Gedung-gedung perkantoran baik pemerintah maupun swasta.

Studi mengenai kegempaan sudah banyak dilakukan di Kota Bengkulu, salah satunya studi mengenai analisis respons seismik. Analisis respons seismik adalah perambatan gelombang seismik satu dimensi melalui lapisan tanah horizontal (Mase & Likitlersuang, 2021). Analisis respons seismik satu dimensi merupakan analisis yang digunakan untuk menyelesaikan perambatan vertikal gelombang geser horizontal melalui lapisan (Hashash & Park, 2001). Gelombang seismik merambat dari batuan dasar ke permukaan tanah. Analisis respons tanah nonlinier harus digunakan untuk memperhitungkan sifat dinamis tanah dengan nonlinier tinggi (Hashash *et al.*, 2010). Misliniyati *et al.* (2019) melakukan studi validasi respons seismik dari model tanah tersimulasi menjadi gambaran rekaman vertikal selama gempa berskala tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan model perambatan gelombang gempa yang paling sesuai.

Misliniyati *et al.* (2019) menyimpulkan bahwa model non-linier merupakan metode yang paling tepat untuk gempa bumi dengan percepatan seismik yang tinggi. Mase (2018) meneliti reabilitas percepatan spektral di area pesisir Kota Bengkulu dan menyimpulkan bahwa percepatan spektral untuk periode pendek telah melebihi percepatan spektral desain. Mase *et al.* (2022) melakukan penelitian respon seismik pada bangunan Lighthouse View Tower untuk mengamati kondisi kesehatan struktur setelah 10 tahun berdiri dan mendapati bahwa percepatan spektral respons tanah sebenarnya lebih rendah daripada desain percepatan spektral. Oleh karena itu, desain struktur dalam kondisi aman apabila diguncang gempa kuat.

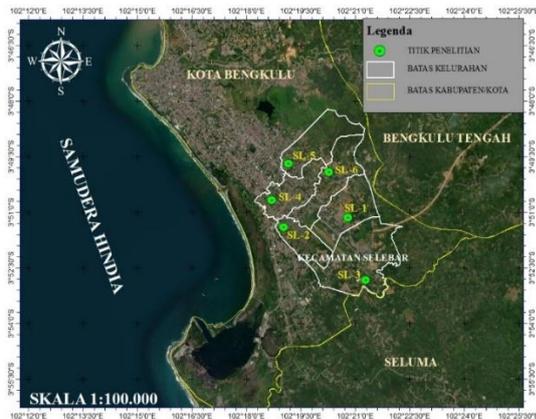
Penelitian-penelitian kegempaan banyak dilakukan di area-area pesisir dan vital di Kota Bengkulu, sedangkan pada Kecamatan Selebar masih sangat sedikit penelitian mengenai kegempaan dilakukan pada area ini. Mengingat perkembangan Kecamatan Selebar yang cukup pesat dan kedepannya akan direncanakan sebagai pusat pemerintahan Kota Bengkulu maka dari itu perlu dilakukan penelitian kegempaan di Kecamatan Selebar. Penelitian ini akan berfokus pada analisis respons seismik pada tanah di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu menggunakan konsep perambatan gelombang satu dimensi ekuivalen linier dan non-linier. Analisis penelitian ini menghasilkan percepatan riwayat waktu, Peak Ground Acceleration, percepatan respons spektra, serta faktor amplifikasi, dan membandingkan hasil antara ekuivalen linier dan nonlinier. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum mengenai kondisi respons seismik pada perlapisan tanah di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu. Hasil penelitian dapat menjadi pijakan awal dalam merencanakan tata ruang dan wilayah yang berbasis mitigasi bencana di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu.

Metode

Tujuan penelitian ini untuk mengetahui respons seismik pada Kecamatan Selebar Kota Bengkulu. Penelitian diawali dengan investigasi lapangan pada beberapa lokasi di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu untuk memperoleh gambaran perlapisan tanah. Perambatan gelombang satu dimensi dilakukan pada penelitian ini dengan menggunakan bantuan perangkat lunak *Deepsoil v6.1*. Gelombang input yang digunakan didapat dari Mase (2017). Hasil perambatan gelombang, seperti percepatan gempa, percepatan spektra, faktor amplifikasi dan perbandingan hasil ekuivalen linier dan non-linier disajikan pada penelitian ini. Perbandingan respons spektra gempa hasil analisis terhadap respons spektra desain SNI-1726-2019 (2019) dilakukan pula pada penelitian ini.

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu yang terdapat enam titik, setiap titik mewakili satu Kelurahan yang berada di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu. Kelurahan tersebut antara lain adalah Kelurahan Pekan Sabtu (SL-1), Kelurahan Bumi Ayu (SL-2), Kelurahan Betungan (SL-3), Kelurahan Pagar Dewa (SL-4), Kelurahan Sumur Dewa (SL-5), Kelurahan Sukarami (SL-6). Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Lokasi Penelitian Pada Kecamatan Selebar Kota Bengkulu

Data Penelitian

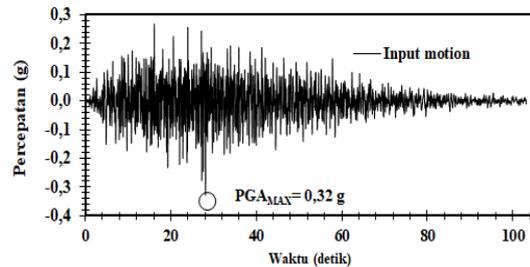
Penelitian diawali dengan melakukan investigasi lapangan menggunakan microtremor di lokasi penelitian yang sudah ditentukan. Selanjutnya, hasil diolah lebih lanjut untuk memperoleh gambaran perlapisan tanah, kecepatan gelombang geser (V_s) dan kecepatan primer (V_p) pada setiap perlapisan. Data tanah dapat dilihat pada Gambar 3.

Klasifikasi kelas situs tanah dapat ditentukan dengan menggunakan V_s rata-rata pada kedalaman 30 m (V_{s30}), V_{s30} dihitung dengan rumus 1. SNI 1726:2019 (2019) mengatakan untuk tanah yang memiliki V_s rata-rata sebesar 350 m/s – 750 m/s termasuk tanah keras (SC), 175 m/s – 350 m/s termasuk tanah sedang (SD), dan untuk V_s rata-rata < 175 m/s termasuk tanah lunak (SE). Berdasarkan hal tersebut kelas situs tanah pada titik SL-1, SL-2, SL-3, SL-4, dan SL-5 termasuk tanah keras (SC), sedangkan untuk SL-6 termasuk tanah sedang (SD).

$$V_{s30} = \frac{\sum di}{\sum ti} = \frac{30}{\sum (\frac{di}{V_{si}})} \quad (1)$$

Selain profil perlapisan tanah, kecepatan gelombang geser (V_s) dan kecepatan gelombang primer (V_p), data yang digunakan adalah gelombang input yang dirambatkan dari batuan dasar. Gelombang input yang digunakan adalah gelombang terskala dari penelitian Mase (2017).

Gelombang gempa ini diambil dari peristiwa gempa Bengkulu-Mentawai tahun 2007. Gambar 4 menunjukkan percepatan tanah maksimum (PGA) yang diperoleh adalah 0,32 g.



Gambar 4. Lokasi gelombang gempa terskala saat kejadian gempa Bengkulu-Mentawai Tahun 2007 (Dimodifikasi dari Mase (2017))

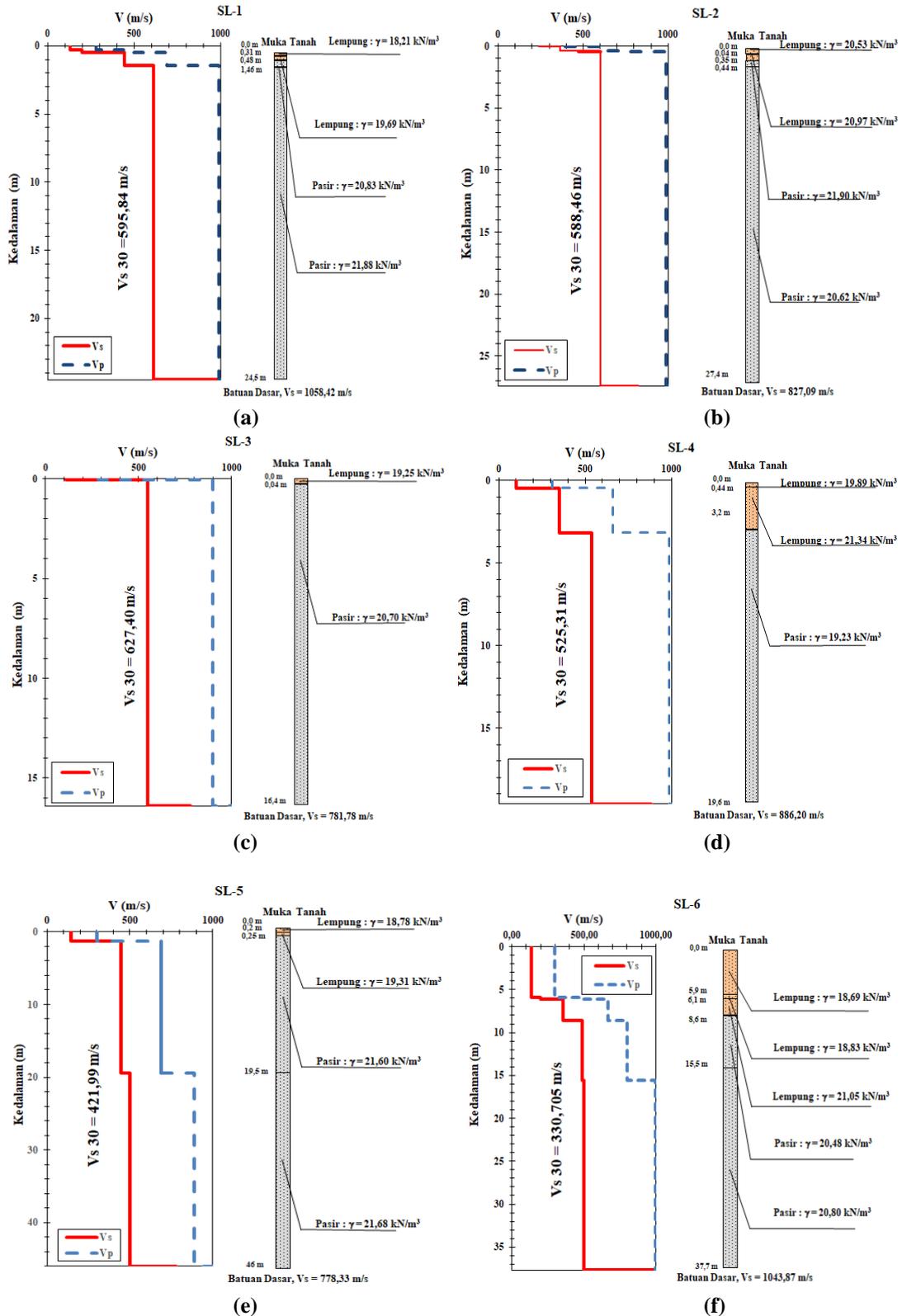
Analisis Perambatan Gelombang Gempa Metode Ekuivalen Linier

Metode ekuivalen linier merupakan metode yang umum digunakan dalam analisis respons seismik karena membutuhkan properti tanah yang relatif tersedia dan proses komputasi yang sederhana. Proses komputasi ini berkaitan dengan analisis yang dibangun berdasarkan domain frekuensi (Hashash *et al.*, 2010). Metode ini dianggap baik untuk menganalisis model perilaku tanah pada tingkat regangan kecil karena masih dapat menghasilkan prediksi respons seismik tanah yang masuk akal.

Analisis Perambatan Gelombang Gempa Metode Non-Linier

Permodelan non-linier satu dimensi menggunakan asumsi yang akurat atau hampir tepat dalam menentukan tegangan efektif pada setiap lapisan tanah. Hutabarat (2016) mengatakan metode non-linier mampu untuk merepresentasikan perilaku nonlinier tanah yang sebenarnya secara lebih akurat, terutama pada tingkat regangan yang besar. Penelitian ini menerapkan permodelan non-linier satu dimensi menggunakan model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH). Menurut Pender *et al.* (2016) dan Mase *et al.* (2017), hasil simulasi numerik dari permodelan ini pada umumnya sesuai dengan respons tanah yang teramati saat terjadi gempa.

Tahapan pemodelan gelombang seismik satu dimensi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Deepsoil v6.1*. Data input yang diperlukan pada langkah ini adalah data perlapisan tanah, data kedalaman batuan dasar dan data gelombang gempa terskala (Mase, 2017) sebagai gelombang input. Berikut tahapan pemodelan gelombang seismik menggunakan model *Pressure Dependent Hyperbolic*:



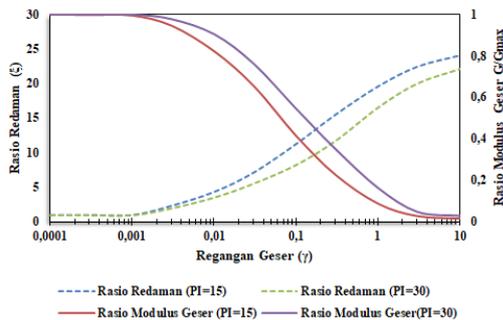
Gambar 3. Profil perlapisan tanah, kecepatan gelombang geser (V_s), dan kecepatan gelombang primer (V_p) di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, (a) SL-1, (b) SL-2, (c) SL-3, (d) SL-4, (e) SL-5, (f) SL-6.

(1) membuat profil tanah yang dibuat dengan memasukkan lapisan tanah, berat volume tanah

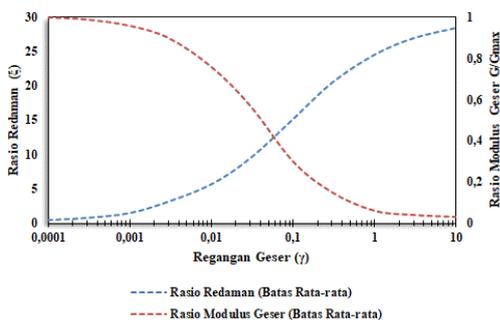
(γ sat) dan kecepatan gelombang geser (V_s). Selain itu, parameter dinamis dan nilai indeks plastisitas

(PI) juga dimasukkan. Parameter dinamis seperti modulus geser (G/G_{max}) dan rasio redaman (ξ) ditentukan berdasarkan tipe tanah dengan merujuk pada kurva referensi. Untuk tanah kohesif, digunakan kurva G/G_{max} Vucetic dan Dobri (Mase, 2017b) dengan batas PI antara 15 – 30 yang sesuai dengan PI pada lokasi penelitian (Gambar 5), sementara untuk tanah granular, digunakan kurva G/G_{max} Seed dan Idriss (Mase, 2017b) dengan batas rata-rata (Gambar 6). Kurva referensi tersebut dipilih karena dapat menghasilkan percepatan permukaan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kurva lainnya. Penggunaan kurva lain memerlukan informasi properti tanah yang lebih rinci sebagai input untuk mendapatkan parameter dinamis. Kurva yang dikembangkan oleh Vucetic dan Dobri (Mase, 2017b) serta Seed dan Idriss (Mase, 2017b) masih relevan digunakan dalam analisis respon seismik dengan model *Pressure Dependent Hyperbolic*;

$$PI = -16,491 \ln V_p + 121,95 \quad (2)$$



Gambar 5. Kurva G/G_{max} dan Rasio Redaman untuk Tanah Kohesif (Dimodifikasi Dari Mase (2017b)).



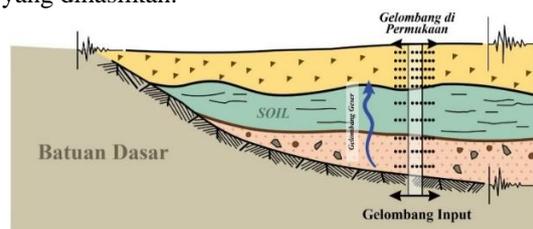
Gambar 6. Kurva G/G_{max} dan Rasio Redaman untuk Tanah Granular (Dimodifikasi Dari Mase (2017b)).

(2) Menginputkan data bedrock yang meliputi kecepatan gelombang geser (V_s), berat isi (γ), dan rasio redaman (ξ). K Memilih percepatan gelombang gempa yang digunakan, yaitu gelombang gempa terskala tahun 2007 (Mase, 2017); (4) Mendefinisikan small strain damping dengan memilih *frequency independent* pada tipe damping *matrix. frequency independent* dipilih untuk mengurangi *numerical damping* (Hashash,

2016); (5) Analisis pemodelan respon seismik dilakukan dengan merambatkan gelombang gempa dari batuan dasar hingga permukaan menggunakan model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH), yang menghasilkan percepatan dan respons spektra per periode (PSA) untuk setiap lapisan tanah.

Skema perambatan gelombang satu dimensi

Permodelan Gambar 7 menampilkan ilustrasi dari analisis respon seismik satu dimensi, dimana lapisan tanah dimodelkan sebagai kolom tanah yang digetarkan secara horizontal oleh input motion. Struktur geologi dan properti tanah setempat sangat mempengaruhi karakteristik respons seismik tanah yang dihasilkan.



Gambar 7. Skema perambatan gelombang satu dimensi (dimodifikasi dari Nikolaou dan Go, (2009))

Penentuan tebal lapisan tanah merupakan kriteria penting yang harus dipertimbangkan dalam analisis respon seismik. Diskretisasi lapisan tanah harus didesain agar lapisan mampu merambatkan gelombang gempa dengan frekuensi setidaknya 25 Hz. Hashash (2016) merekomendasikan frekuensi maksimum adalah sekitar 25 Hz – 50 Hz. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan respon yang lebih akurat. Pada penelitian ini digunakan frekuensi 33 Hz. Formula korelasi antara frekuensi dan tebal lapisan tanah dirumuskan pada Persamaan 3.

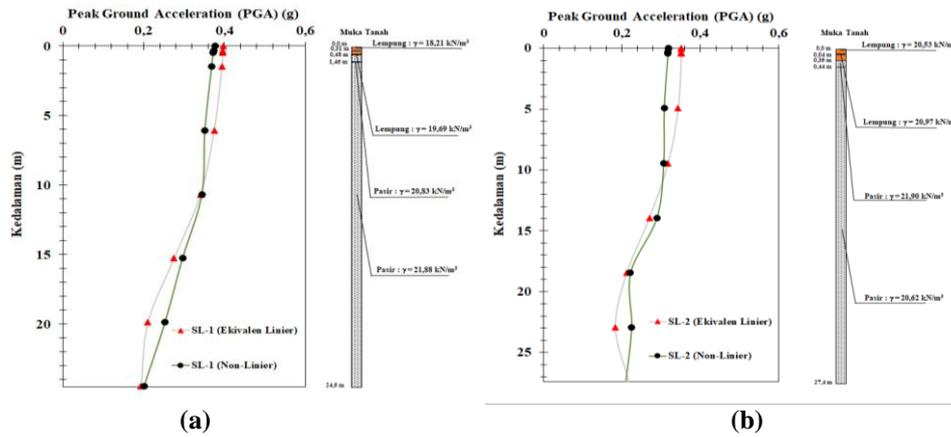
$$f_{max,i} = \frac{V_{s,i}}{4H_i} \quad (3)$$

Berdasarkan korelasi tersebut, maka tebal lapisan tanah yang harus digunakan untuk merambatkan frekuensi setidaknya 33 Hz adalah :

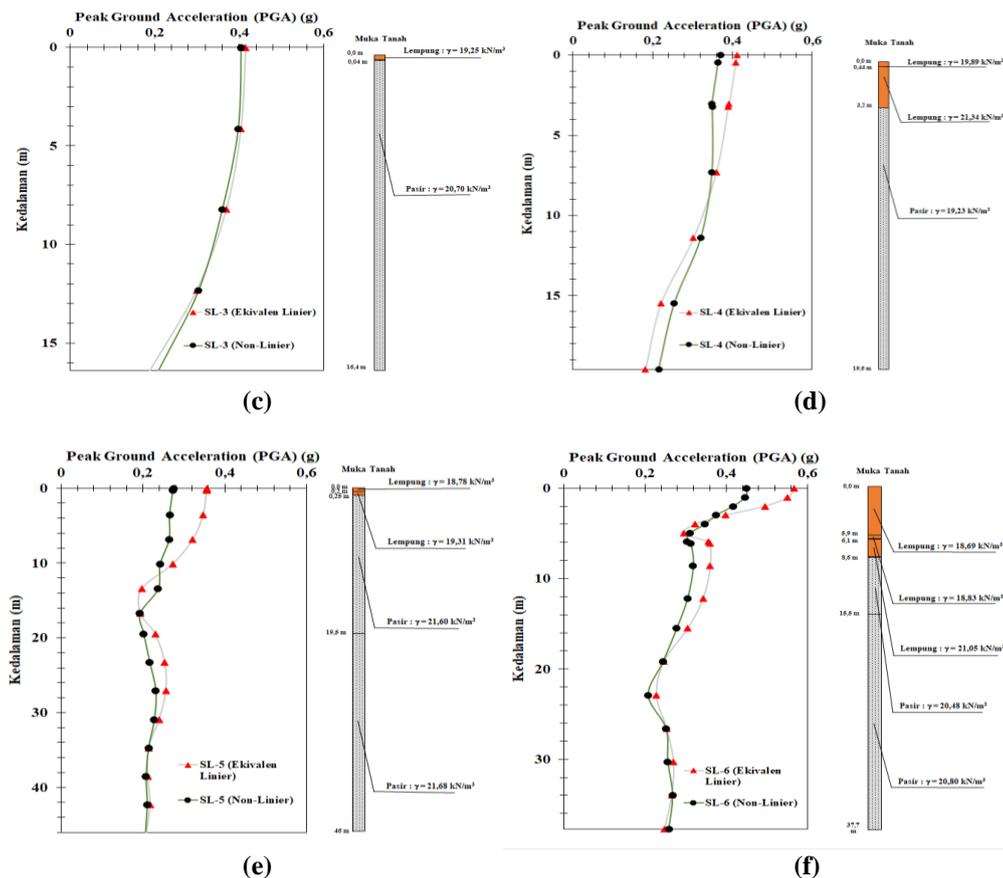
$$H_i \leq \frac{V_{s,i}}{4 \times (33\text{Hz})} \quad (3)$$

$$H_i \leq \frac{V_{s,i}}{132\text{Hz}} \quad (4)$$

dengan $f_{max,i}$ adalah frekuensi maksimum gelombang yang mampu dirambatkan oleh lapisan i (Hz), $V_{s,i}$ adalah kecepatan gelombang geser pada lapisan i (m/s), dan H_i adalah tebal lapisan i (m). Nilai frekuensi maksimum yang mampu dirambatkan oleh suatu lapisan tanah dapat dinaikkan dengan cara mengurangi tebal lapisan. Nilai frekuensi yang lebih besar, akan membuat hasil analisis respon seismik menjadi semakin akurat.



Gambar 8. Perbandingan *Peak Ground Acceleration* (PGA) Ekuivalen Linier dan Non-Linier Pada Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, (a) SL-1, (b) SL-2



Gambar 9. Perbandingan *Peak Ground Acceleration* (PGA) Ekuivalen Linier dan Non-Linier Pada Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, (c)SL-3, (d) SL-4, (e) SL-5, (f) SL-6.

Hasil dan Pembahasan

Peak Ground Acceleration (PGA)

Nilai PGA digunakan untuk mengetahui tingkat resiko gempa, semakin tinggi nilai PGA maka semakin berpotensi untuk terjadi kerusakan. Nilai PGA dari setiap lapisan tanah dapat dilihat pada Gambar 8 dan 9 . Pada permukaan tanah terlihat bahwa nilai PGA ekuivalen linier lebih besar dari

nilai PGA non-linier pada semua titik. Sedangkan pada lapisan terbawah, nilai PGA non-linier didapati lebih besar dari PGA ekuivalen linier di empat titik penelitian. Fathani *et al.* (2008) menyebutkan nilai PGA yang berada pada 0,3g-0,4g termasuk kedalam resiko tinggi, dan nilai PGA > 0,4g termasuk kedalam resiko sangat tinggi. Berdasarkan hasil ekuivalen linier, terdapat tiga titik yang masuk dalam ketegori resiko tinggi yaitu SL-1, SL-2, dan SL-5 dengan nilai PGA berkisar antara

0,35g - 0,39. Sementara itu tiga titik lainnya masuk kedalam kategori resiko sangat tinggi yaitu titik SL-3, SL-4, dan SL-6 dengan nilai PGA berkisar antara 0,41g - 0,56 g. Hasil non-linier menunjukkan terdapat tiga titik yang masuk dalam kategori resiko tinggi yaitu titik SL-1, SL-2, dan SL-4 dengan nilai PGA berkisar antara 0,31g - 0,37g, dan terdapat dua titik yang masuk ke kategori resiko sangat tinggi yaitu titik SL-3 dan SL-6, dengan nilai PGA sebesar 0,41g dan 0,45 g. Nilai PGA yang dihasilkan dengan metode ekuivalen linier lebih besar sekitar 5% - 30% dari metode non-linier.

Percepatan riwayat waktu

Hasil percepatan riwayat waktu ekuivalen linier dan non-linier dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11. Nilai percepatan gelombang gempa non-linier terbesar terdapat pada titik SL-6 sebesar 0,45g, sedangkan yang terendah terdapat pada titik SL-5 sebesar 0,27g. Untuk percepatan gelombang gempa ekuivalen linier, nilai terbesar terdapat pada titik SL-6 sebesar 0,56g dan untuk yang terendah berada di titik SL-5 sebesar 0,35g.

Hasil analisis secara keseluruhan menunjukkan perambatan gelombang berdasarkan pendekatan ekuivalen linier cenderung menghasilkan percepatan maksimum yang lebih besar dibandingkan dengan pendekatan non-linier. Menurut Finn *et al.* (1978) dan Mase *et al.* (2018) hal ini disebabkan karena terdapatnya overestimasi pada tegangan geser yang juga menyebabkan nilai PGA menjadi lebih besar. Selain itu, pengaruh perlapisan yang memiliki karakteristik resistensi yang relative rendah menyebabkan terjadinya pembesaran percepatan gelombang gempa mendekati permukaan. Hal serupa juga dilaporkan oleh Adampira *et al.* (2015) dan Yunita *et al.* (2015) untuk studi kasus perlapisan tanah di Iran dan Turkey. PGA yang dihasilkan pada permukaan dengan metode ekuivalen linier dan metode non-linier cenderung lebih besar dari gelombang input pada empat titik yaitu titik SL-1, SL-3, SL-4, dan SL-6, yang menandakan akan terjadi amplifikasi pada gelombang input. Maka, perlu perhatian khusus terhadap empat kelurahan tersebut mengingat wilayahnya merupakan pusat perkantoran dan terdapat objek-objek vital seperti bandara dan jalan TOL, yang memungkinkan terjadinya dampak serius dari perambatan seismik akibat gempa bumi.

Percepatan respon spektra

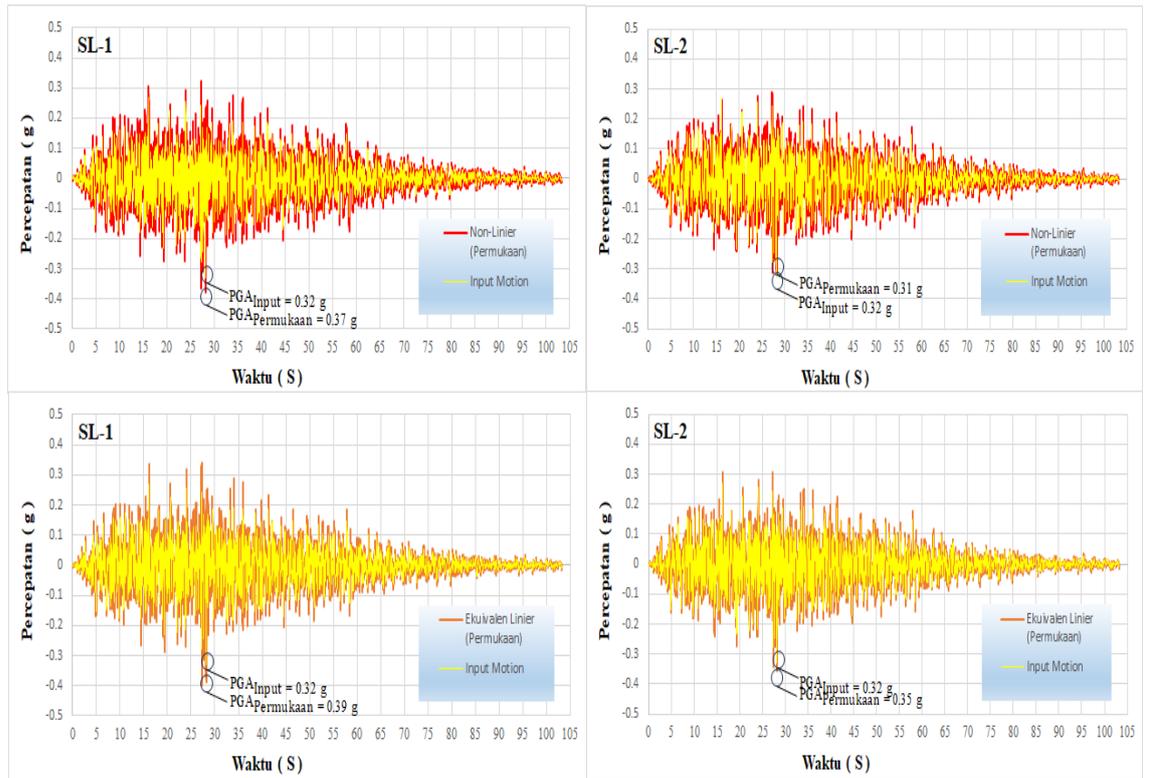
Hasil percepatan spektra ekuivalen linier dan non-linier di permukaan dapat dilihat pada Gambar 12.

Hasil analisis menunjukkan bahwa percepatan spektra gelombang input meningkat secara bertahap hingga mencapai puncaknya pada periode 0,2 detik. Pada percepatan yang dihitung dengan menggunakan metode ekuivalen linier dan non-linier, terlihat peningkatan percepatan spektra dibandingkan percepatan gelombang input. Peningkatan ini kemungkinan disebabkan oleh karakteristik material pada setiap lapisan tanah yang berbeda di setiap area. Gambar 13 menunjukkan perbandingan percepatan spektra di palisan permukaan pada seluruh titik penelitian.

Metode ekuivalen linier cenderung menghasilkan percepatan yang lebih besar di permukaan dibandingkan metode non-linier. Gelombang input dengan PGA 0,32g membuat level regangan geser menjadi besar. Pada kondisi regangan besar, karakteristik respons spektra percepatan di permukaan yang dihasilkan relatif berbeda antara metode ekuivalen linier dan metode non-linier. Metode ekuivalen linier memberikan prediksi spektra percepatan gempa yang lebih besar dibandingkan metode nonlinier (Misliniyati, 2022).

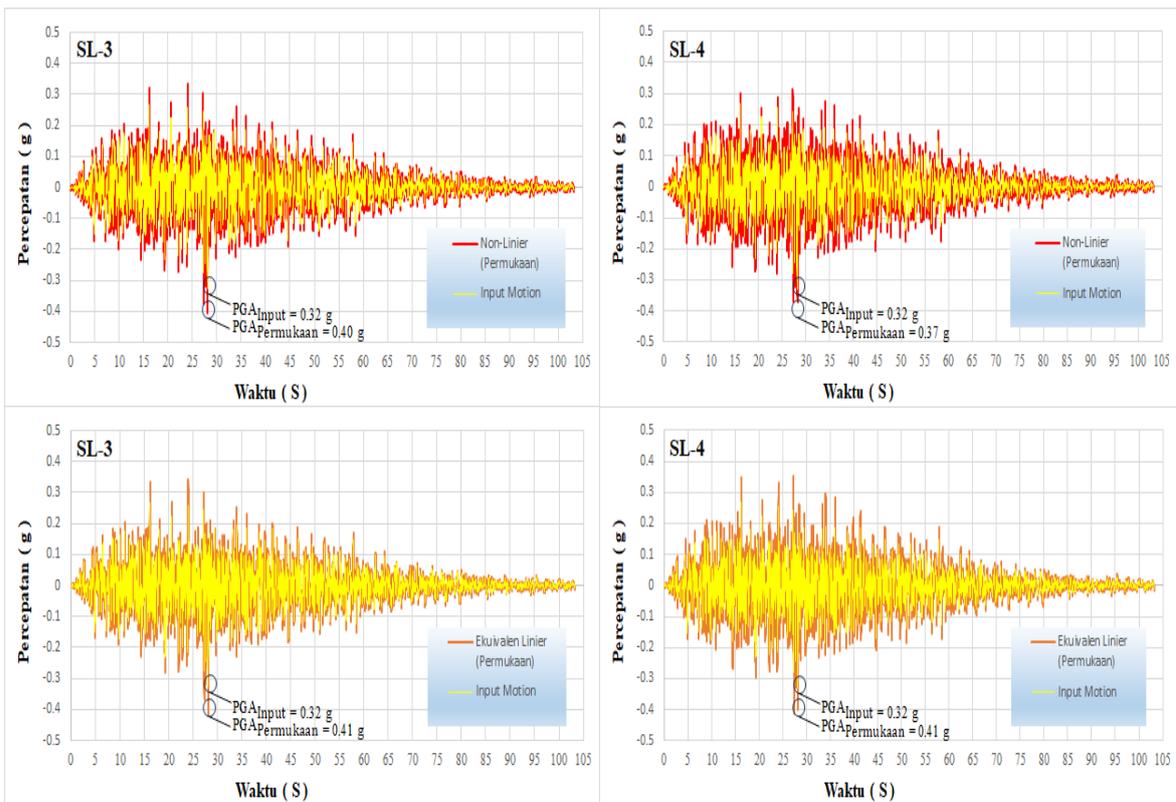
Percepatan spektra terbesar terdapat pada titik SL-6, hal ini dipengaruhi oleh kecepatan gelombang geser di batuan dasar sebesar 1043,87 m/s. Percepatan spektra di permukaan tanah akan cenderung memiliki nilai amplitudo yang lebih besar seiring dengan meningkatnya nilai V_S batuan dasar (Misliniyati, 2022). Semakin besar nilai V_S batuan dasar, gelombang yang merambat saat terjadi gempa juga semakin besar yang menyebabkan intensitas guncangan di permukaan menjadi semakin besar. Kedalaman batuan dasar dan kelas situs tanah juga menjadi pengaruh dari besarnya percepatan spektra di titik SL-6. Percepatan spektra di permukaan cenderung meningkat seiring dengan bertambah dangkalnya elevasi batuan dasar (Misliniyati, 2022).

Kedalaman batuan dasar yang hanya 37,7 m membuat jarak perambatan gelombang gempa menuju permukaan semakin pendek dan kelas situs tanah sedang menyebabkan energi gelombang yang diredam oleh lapisan tanah menjadi lebih sedikit, dan mengakibatkan guncangan gempa yang sampai ke permukaan tanah menjadi semakin besar. Hal ini juga sejalan dengan titik SL-5 yang menghasilkan nilai percepatan spektra paling kecil, dimana V_S batuan dasar dari titik ini merupakan yang terkecil dari semua titik, hanya sebesar 778,33 m/s. Elevasi batuan dasar sedalam 46 m dan kelas situs tanah keras menyebabkan terjadi redaman yang cukup besar pada saat perambatan gelombang gempa menuju ke permukaan.



(a)

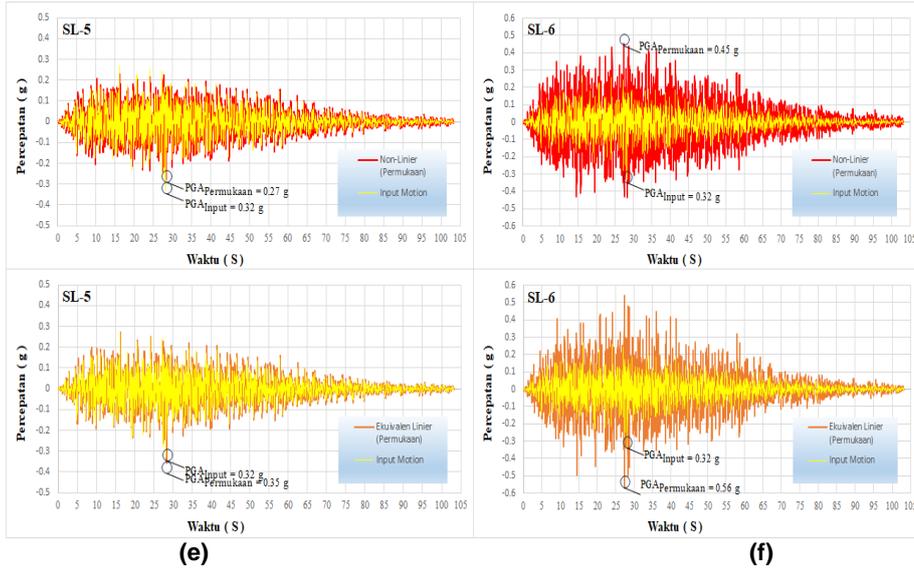
(b)



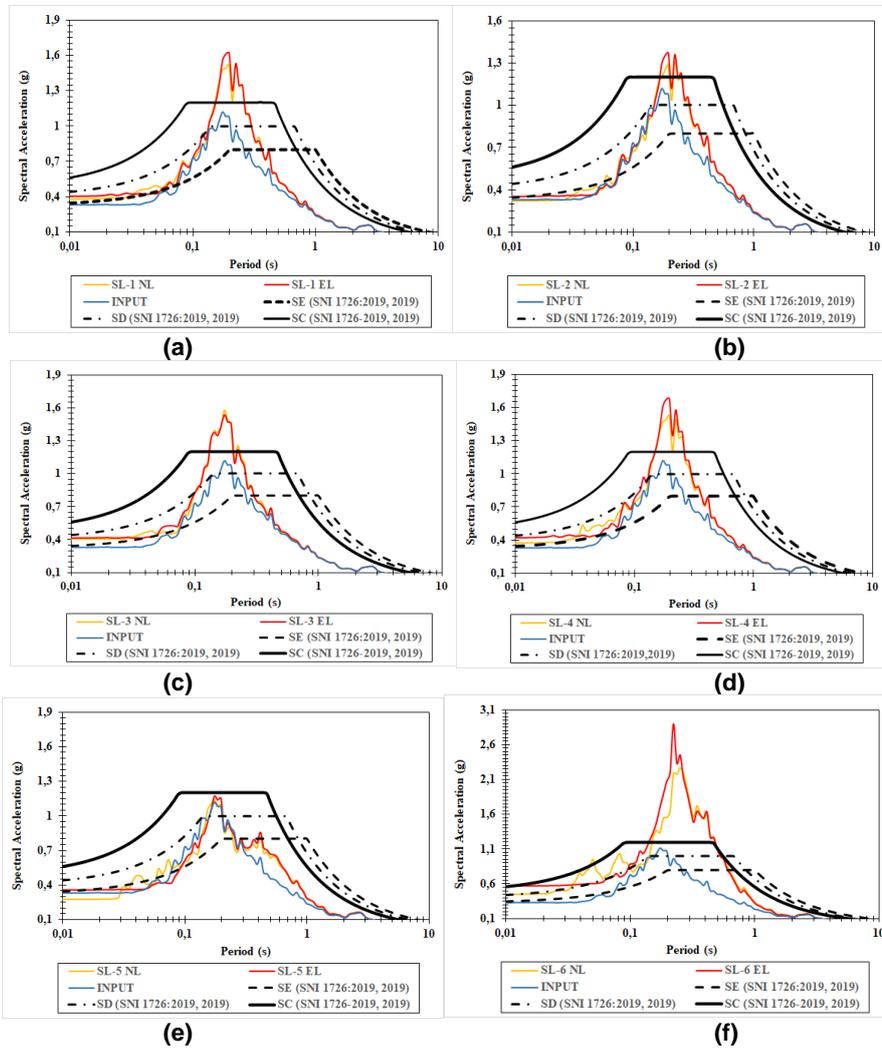
(c)

(d)

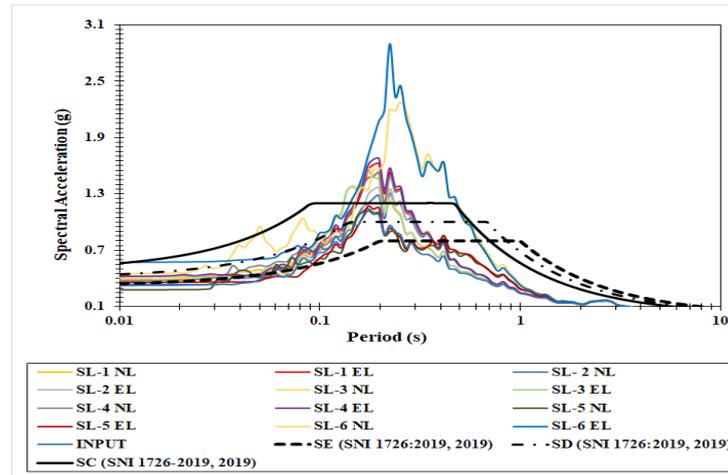
Gambar 10. Perbandingan Percepatan Riwayat Waktu Metode Non-Linier dan Ekuivalen Linier di Permukaan berdasarkan Input Motion Kejadian Gempa Bengkulu-Mentawai di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, (a) SL-1, (b) SL-2, (c) SL-3, (d) SL-4.



Gambar 11. Perbandingan Percepatan Riwayat Waktu Metode Non-Linier dan Ekuivalen Linier di Permukaan berdasarkan Input Motion Kejadian Gempa Bengkulu-Mentawai di Kecamatan Selebar Kota Bengkulu, (e) SL-5, (f) SL-6



Gambar 12. Perbandingan percepatan respons spektra metode ekuivalen linier dan non-linier di permukaan terhadap SNI 1726:2019, (a) SL-1, (b) SL-2, (c) SL-3, (d) SL-4, (e) SL-5, (f) SL-6.



Gambar 13. Perbandingan percepatan respons spektra metode ekivalen linier dan non-linier di permukaan terhadap SNI 1726:2019

Hasil penelitian menunjukkan bahwa percepatan spektra ekivalen linier dan non-linier di setiap titik mencapai puncaknya pada perioda 0,2 detik (periode pendek). Dengan mengestimasi periode natural dengan T sebesar $0,1n$ (n merupakan jumlah lantai) maka dapat diprediksi dampak bahaya gempa berdasarkan jumlah lantai gedung (International Code Council, 2006). SA pada periode 0,2 detik digunakan untuk memprediksi respons tanah yang diterima oleh bangunan berlantai rendah, yang berkaitan dengan periode resonansi pada lantai 1 hingga 2 lantai.

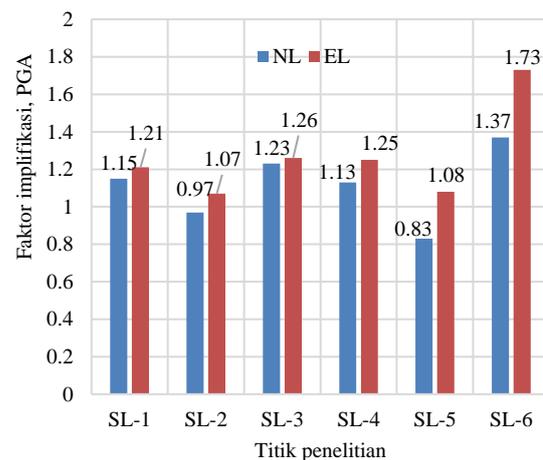
Sementara itu, SA pada periode 1 detik mewakili respon tanah yang diterima oleh bangunan berlantai tinggi (Mase, 2020). Percepatan spektra secara umum telah melewati desain seismik yang berlaku pada periode pendek, dengan nilai sebesar $1,2g - 2,1g$ untuk metode linier ekivalen dan $1,1g - 1,6g$ untuk metode nonlinier. Dapat disimpulkan bahwa kerusakan cenderung lebih banyak terjadi pada bangunan berlantai rendah. Percepatan spektra ekivalen linier dan non-linier pada titik SL-1, SL-2, SL-3, SL-4, dan SL-6 telah melewati percepatan spektra SNI 1726:2019 (2019) maka dari itu perlu dilakukan peninjauan ulang terhadap bangunan berlantai rendah yang telah dibangun pada lokasi tersebut.

Faktor amplifikasi

Besaran amplifikasi memiliki pengaruh yang cukup signifikan terhadap resiko kerusakan di suatu wilayah terhadap peristiwa gempa bumi. Nilai amplifikasi lapisan sedimen menggambarkan perubahan percepatan gerakan tanah dari batuan dasar ke permukaan, atau perubahan kecepatan gelombang geser saat merambat dari batuan dasar ke lapisan sedimen (Partono *et al*, 2013). Tanah yang mengalami amplifikasi cenderung

memperkuat intensitas dari getaran gempa yang bisa mengakibatkan kerusakan lebih parah pada infrastruktur yang berdiri di atasnya.

Gambar 14 menunjukkan faktor amplifikasi dari setiap titik penelitian. Hasil menunjukkan bahwa faktor amplifikasi ekivalen linier lebih besar dari non-linier di setiap titik penelitian. Terlihat faktor amplifikasi pada area yang diteliti memiliki rentang 1,1 - 1,3 untuk non-linier dan 1,1 - 1,7 untuk ekivalen linier. Faktor amplifikasi dengan metode ekivalen linier mengalami penguatan sebesar 3% - 30% lebih besar dari metode non-linier.



Gambar 14. Perbandingan faktor amplifikasi ekivalen linier dan non-linier di permukaan

Deamplifikasi terjadi pada dua titik dengan metode non-linier, yaitu pada titik SL-2 dan SL-5. Hal ini disebabkan kedalaman lapisan tanah pada kedua titik cukup dalam dan kelas situs tanah yang merupakan tanah keras, sehingga menyebabkan percepatan gelombang gempa menjadi teredam pada saat mencapai permukaan

Kesimpulan

Berdasarkan Nilai PGA yang dihasilkan oleh metode ekuivalen linier pada lapisan permukaan cenderung lebih besar daripada metode nonlinier yaitu sebesar 0,35g - 0,56g, sedangkan nilai PGA yang dihasilkan dengan metode nonlinier sebesar 0,31g - 0,45g. Hasil tersebut menggambarkan terdapat lima kelurahan yang dikategorikan sebagai kelurahan yang memiliki resiko gempa yang tinggi dan sangat tinggi baik dari metode linier ekuivalen dan nonlinier yaitu kelurahan Pekan Sabtu, Kelurahan Bumi Ayu, Kelurahan Betungan, Kelurahan Pagar Dewa, dan Kelurahan Sukarami.

Respons spektra yang dihasilkan cenderung telah melewati desain respons spektra desain pada periode 0,2 detik dengan nilai sebesar 1,2g - 2,1g untuk metode linier ekuivalen dan 1,1g - 1,6g untuk metode nonlinier, yang dapat disimpulkan bahwa kerusakan akan banyak terjadi pada gedung berlantai rendah. Hasil dengan metode ekuivalen linier dan non-linier pada lima kelurahan telah melewati respons spektra desain yaitu kelurahan Pekan Sabtu, Kelurahan Bumi Ayu, Kelurahan Betungan, Kelurahan Pagar Dewa, dan Kelurahan Sukarami. Maka dari itu, analisis struktur bangunan dengan menggunakan respons spektra lokal perlu dilakukan untuk pembangunan kedepannya.

Faktor amplifikasi yang dihasilkan pada daerah penelitian cenderung mengalami penguatan akibat perambatan gelombang gempa. Metode ekuivalen linier menunjukkan semua kelurahan mengalami amplifikasi selama perambatan gelombang gempa dengan faktor amplifikasi berkisar 1,1 - 1,7. Sementara metode non-linier menunjukkan terjadi amplifikasi di empat kelurahan yaitu kelurahan Pekan Sabtu, Kelurahan Betungan, Kelurahan Pagar Dewa, dan Kelurahan Sukarami dengan faktor amplifikasi berkisar 1,1 - 1,3. Deamplifikasi terjadi dengan metode nonlinier pada kelurahan Bumi Ayu dan Sumur Dewa. Faktor amplifikasi dengan metode ekuivalen linier mengalami penguatan sebesar 3% - 30% lebih besar dari metode non-linier.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada tim riset grup kegemilangan program Studi Teknik Sipil Universitas Bengkulu yang telah berkontribusi membantu proses penelitian ini

Daftar Pustaka

A Hashash, Y. M. (2016). *Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-*

Dimensional Soil Columns USER MANUAL.
www.illinois.edu/~deepsoil

A Hashash, Y. M., Phillips, C., Groholski, D. R., A, Y. M., & A Hashash Camilo Phillips, Y. M. (2010). *Mine Scholars' Mine International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics* (Vol. 8).
<https://scholarsmine.mst.edu/icrageesd/05icrageesd/session12/8>

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. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1399-6>

Badan Standardisasi Nasional, Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan nongedung. 2019.

Council, I. C. (2006). *International building code.*

Fathani, T. F., Adi, A. D., Pramumijoyo, S., & Karnawati, D. (n.d.), (2008). *Determination of Peak Ground Acceleration at Bantul Regency, Yogyakarta Province, Indonesia.*

Finn W. D. L., Martin G. R., and Lee M. K., (1978). "Comparison of dynamic analyses for saturated sands." *J Earthq Eng Soil Dyn* 1978;1:472-91. (ASCE; GT special conference).

Hashash, Y. M. A., & Park, D. (n.d.), (2001) *Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment.*
www.elsevier.com/locate/enggeo

Hutabarat, D. (2016). *Evaluation of One-Dimensional Seismic Site Response Analyses at Small to Large Strain Levels.*

Mase, L.Z., (2017b). "Study of Liquefaction Mechanism in Chiang Rai Province." Ph.D. diss., Chulalongkorn University.

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., Tetsuo. T., Liketlersuang. S. (2017) *One-Dimensional Analysis of Liquefaction*

Potential: A Case Study In Chiang Rai Province, Northern Thailand.

Mase, L. Z. (2018). 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. (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., & 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., Likitlersuang, S., & Tobita, T. (2018). 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., 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., Sahadewa, A., Hendriyawan, & Irsyam, M. (2019). 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>

Misliniyati, R., (2022). *Pengembangan Peta Bahaya Gempa Kota Jakarta Dengan Memperhitungkan Pengaruh Parameter Dinamik dan Tofografi Batuan Dasar Terhadap Respons Seismik di Permukaan.*. DR.diss, Institut Teknologi Bandung

Nikolaou, S., & Go, J. (2009). *Site-Specific Seismic Studies for Optimal Structural Design Part II-Applications Local Site Conditions and Seismicity.*
www.abchance.com

Partono, W., Irsyam, M., & Prabandiyani, S. (n.d.), (2013). *Syamsul Maarif Aplikasi Metode HVSR pada Perhitungan Faktor Amplifikasi Tanah di Kota Semarang.*

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>

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>