

Respons Seismik Tanah Pada Kawasan Aliran Sungai Muara Bangkahulu Bagian Hilir, Kota Bengkulu

Ginnabilla Gustia Nugraha^{1*}, Lindung Zalbuin Mase¹, Fepy Supriani¹, Rena Misliniyati¹, Khairul Amri¹

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Bengkulu, Bengkulu¹

Koresponden*, Email: g1b020031.ginnabillagustianugraha@mhs.unib.ac.id

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	10 Juni 2024	<p><i>The area along the Bengkulu City river is one of the developing areas in Bengkulu City. This research aims to determine the characteristics of earthquake wave propagation along the downstream area of Muara Bangkahulu river. One-dimensional earthquake wave propagation uses equivalent linear modeling and nonlinear modeling. The parameters observed are Peak Ground Acceleration (PGA), Spectra Response Acceleration and Amplification Factor. The research results show that the value of linear equivalent modeling is higher than nonlinear modeling. The river mouth area has $PGA \geq 0.3g$, making the area at high risk of earthquakes. The spectral response produced at several research locations has passed the SNI 1726:2019 spectral response design in a short period, showing that low-rise buildings tend to provide a greater response than the value implied by SNI 1726:2019. The river estuary area also has a D site classification and a low V_{s30} value results in a high amplification value in this area, making the river estuary area an area where the potential for earthquake shaking is likely to be stronger than other areas.</i></p>
Diperbaiki	02 Agustus 2024	
Disetujui	05 Agustus 2024	

Keywords: seismic response, response spectrum, one-dimensional wave propagation.

Abstrak

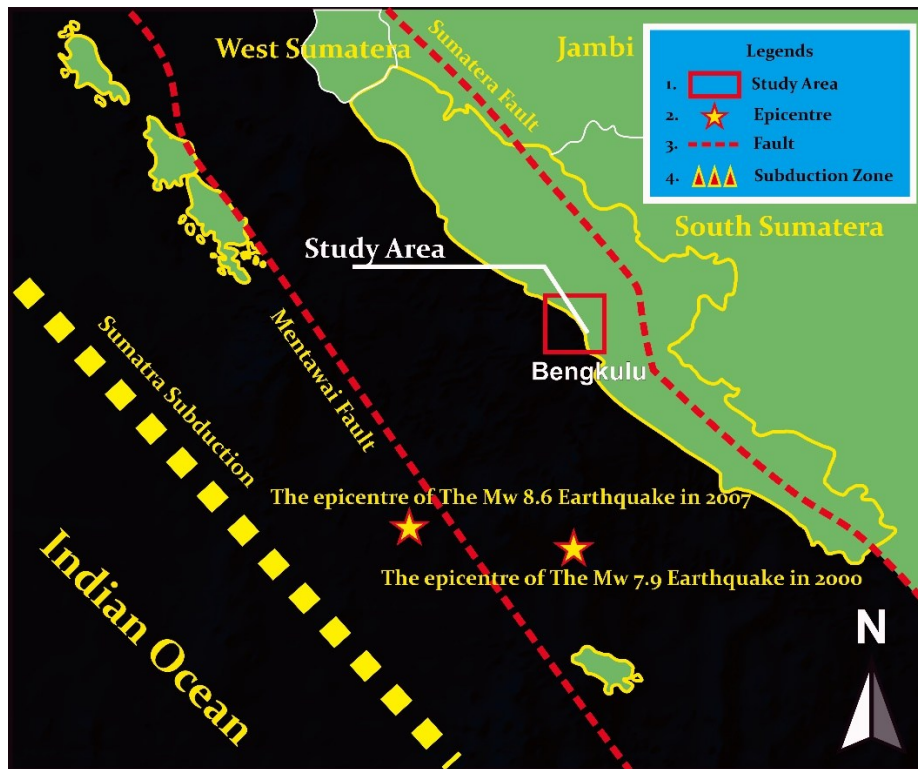
Kawasan sepanjang Aliran sungai Kota Bengkulu merupakan salah satu kawasan berkembang di Kota Bengkulu. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik perambatan gelombang gempa di Sepanjang Aliran Sungai Muara Bangkahulu Bagian Hilir. Perambatan gelombang gempa satu dimensi menggunakan permodelan linier ekuivalen dan permodelan nonlinier. Parameter yang diamati adalah *Peak Ground Acceleration* (PGA), Percepatan Respon Spektra dan Faktor Amplifikasi. Hasil penelitian menunjukkan Nilai permodelan ekuivalen linier lebih tinggi dari permodelan nonlinier. Kawasan muara sungai memiliki nilai $PGA \geq 0,3g$ membuat kawasan tersebut memiliki resiko tinggi terhadap gempa. Respons spektra yang dihasilkan di beberapa lokasi penelitian telah melewati desain respons spektra SNI 1726:2019 pada priode pendek, menunjukkan bangunan bertingkat rendah cenderung memberikan respon yang lebih besar dibandingkan nilai yang diisyaratkan SNI 1726:2019. Kawasan muara sungai juga memiliki klasifikasi situs D dan nilai V_{s30} rendah mengakibatkan nilai amplifikasi yang tinggi pada kawasan tersebut, menjadikan wilayah muara sungai sebagai wilayah yang dimungkinkan terjadi potensi guncangan gempa lebih kuat dari kawasan lainnya.

Kata kunci: respons seismik, respons spektra, perambatan gelombang satu dimensi.

1. Pendahuluan

Provinsi Bengkulu terletak di antara zona sesar Sumatra dan Mentawai, sistem sesar yang membentang di sepanjang pulau Sumatra, Indonesia. Kota Bengkulu merupakan ibu-kota Provinsi Bengkulu yang berdekatan juga dengan zona subduksi, dimana zona subduksi (*subduction zone*) adalah pertemuan antara lempeng tektonik Indo-Australia dan Eurasia. Gerakan yang diakibatkan kedua lempeng tersebut bisa menimbulkan terjadinya patahan aktif di bagian Sumatera (*Sumatra Fault Zone* dan *Mentawai Fault Zone*). Sehingga menyebabkan Bengkulu merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang termasuk kawasan rawan gempa bumi [1]. Menurut Mase [2] telah terjadi gempa bumi berskala besar dua dekade terakhir di Provinsi Bengkulu. Gempa bumi kuat pertama terjadi pada tanggal 4 Juni 2000, dengan magnitudo

Mw 7,9 (Gempa Bengkulu-Enggano) dan gempa kuat kedua terjadi pada tanggal 12 September 2007 dengan magnitudo Mw 8,6 (Gempa Bengkulu-Mentawai) di tampilkan **Gambar 1**. Gempa bumi berskala besar tersebut menimbulkan kerusakan besar pada bangunan dan fasilitas struktural kehidupan [3]. Kota Bengkulu tergolong daerah dengan risiko gempa tinggi di Indonesia. Intensitas bencana alam khususnya gempa bumi di Kota Bengkulu semakin meningkat setiap tahunnya [4]. Untuk meminimalkan dampak bencana gempa bumi, dilakukan penelitian bahaya kegempaan di wilayah rawan bencana gempa bumi [5]. Kota Bengkulu merupakan salah satu daerah berkembang di Indonesia, yang sering mengalami bahaya gempa. Salah satu daerah berkembang di Kota Bengkulu merupakan area hilir Sungai Muara Bangkahulu [6].



Gambar 1. Kondisi seismotektonik dan episentrum gempa besar di Provinsi Bengkulu [7]

Letak area penelitian seperti disajikan pada **Gambar 1** menunjukkan beberapa sumber gempa di sekitar Kota Bengkulu, seperti Subduksi Sumatera, Sesar Mentawai, dan Sesar Sumatera [8]. Provinsi Bengkulu dikenal sebagai daerah yang memiliki gelombang seismik yang tinggi [7]. Perlunya analisis perambatan gelombang gempa di suatu wilayah yang memiliki nilai indeks seismik yang tinggi [4]. Penelitian mengenai kegempaan sangat penting dilakukan di bagian hilir Sungai Muara Bangkahulu khususnya Kecamatan Sungai Serut dan Teluk Segara yang telah berkembang secara signifikan menjadi salah satu daerah prospektif di Kota Bengkulu. Dua kecamatan tersebut memiliki banyak bangunan pertokoan, bangunan industri, kawasan pusat pariwisata dengan beberapa warisan budaya di Kota Bengkulu dan permukiman yang semakin padat. Kawasan tersebut memiliki aktivitas vital yang apabila terjadi bencana gempa bumi akan menimbulkan kerugian yang besar. Analisis respons seismik harus dilakukan untuk mengamati perilaku tanah pada saat gempa. Dalam penelitian ini, menggunakan konsep perambatan gelombang satu dimensi linier ekuivalen dan nonlinier.

Hasil analisis rambat gelombang seismik dianalisis lebih lanjut sehingga diperoleh percepatan seismik yang telah di hitung. Analisis respons seismik akan menghasilkan parameter seismik berupa *Peak Ground Acceleration* (PGA), percepatan respons spektra dan faktor amplifikasi [9].

Beberapa peneliti lokal telah mempelajari dampak seismik di Kota Bengkulu. Farid dan Hadi [10] mempelajari potensi likuifaksi dengan cara mengukur regangan geser untuk mitigasi gempa bumi di Kota Bengkulu. Mase [11] juga menyelidiki analisis respon permukaan tanah kota Bengkulu pada gempa bumi Bengkulu-Mentawai tahun 2007. Umumnya kajian-kajian terdahulu tersebut dilakukan untuk mengetahui dampak gempa bumi terhadap wilayah tertentu di provinsi Bengkulu. Pada penelitian ini berfokus pada respons desain seismik yang membandingkan data linear dan nonlinier pada setiap titik lokasi penelitian di wilayah hilir sungai Muara Bangkahulu. Penelitian ini dapat memberikan kontribusi untuk pemahaman yang lebih baik mengenai penilaian risiko seismik di Kota Bengkulu, khususnya di wilayah hilir Sungai Muara Bangkahulu.

2. Metode

Prosesnya dimulai dengan studi pustaka literatur terkait guna menyusun dan mempelajari mengenai teori yang relevan sebagai dasar penelitian yang akan di buat. Dilanjutkan pengumpulan data serta analisis data yaitu analisis respons seismik linier ekuivalen dan nonlinier pada perambatan gelombang seismik dengan model *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) serta analisis ragam respons spektrum dari perambatan gelombang [12].

2.1. Lokasi Penelitian

Di dalam penelitian ini, dua kecamatan utama yang melintasi sungai Muara Bangkahulu. Kecamatan tersebut adalah Kecamatan Sungai Serut dan Kecamatan Teluk Segara. Total titik lokasi penelitian yang terdapat berjumlah 6 titik yang terdiri dari 5 titik pada kelurahan di Kecamatan Sungai Serut dan 1 titik pada 1 kelurahan di Kecamatan Teluk Segara. Kelurahan tersebut antara lain adalah Kelurahan Kampung Bali (TS-1), Kelurahan Pasar Bengkulu (SS-2), Kelurahan Kampung Kelawi (SS-3), Kelurahan Suka Merindu (SS-4), Kelurahan Tanjung Jaya (SS-5) dan Kelurahan Semarang (SS-6). Penentuan pengambilan titik lokasi diambil secara merata di lokasi penelitian kecuali daerah dengan banyak gangguan seperti perkebunan atau permukiman penduduk. **Gambar 2** menyajikan peta lokasi penelitian Kawasan Sungai Muara Bangkahulu pada bagian hilir dan penyebaran titik lokasi yang merupakan wilayah kajian dalam penelitian ini.

2.2. Pengumpulan Data

Data lapisan sebanyak 6 titik yang tersebar di Kecamatan Sungai Serut dan Teluk Segara. Pengumpulan data per-lapisan tanah berupa data sekunder dari penelitian yang telah dilakukan Mase dkk [13]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan data diperoleh dari pengukuran Mikrotremor melalui proses inversi pada lokasi penelitian yang telah ditentukan. Dalam penelitian tersebut, Mase dkk [13] melakukan teknik inversi menggunakan algoritma *Monte Carlo Simulated*

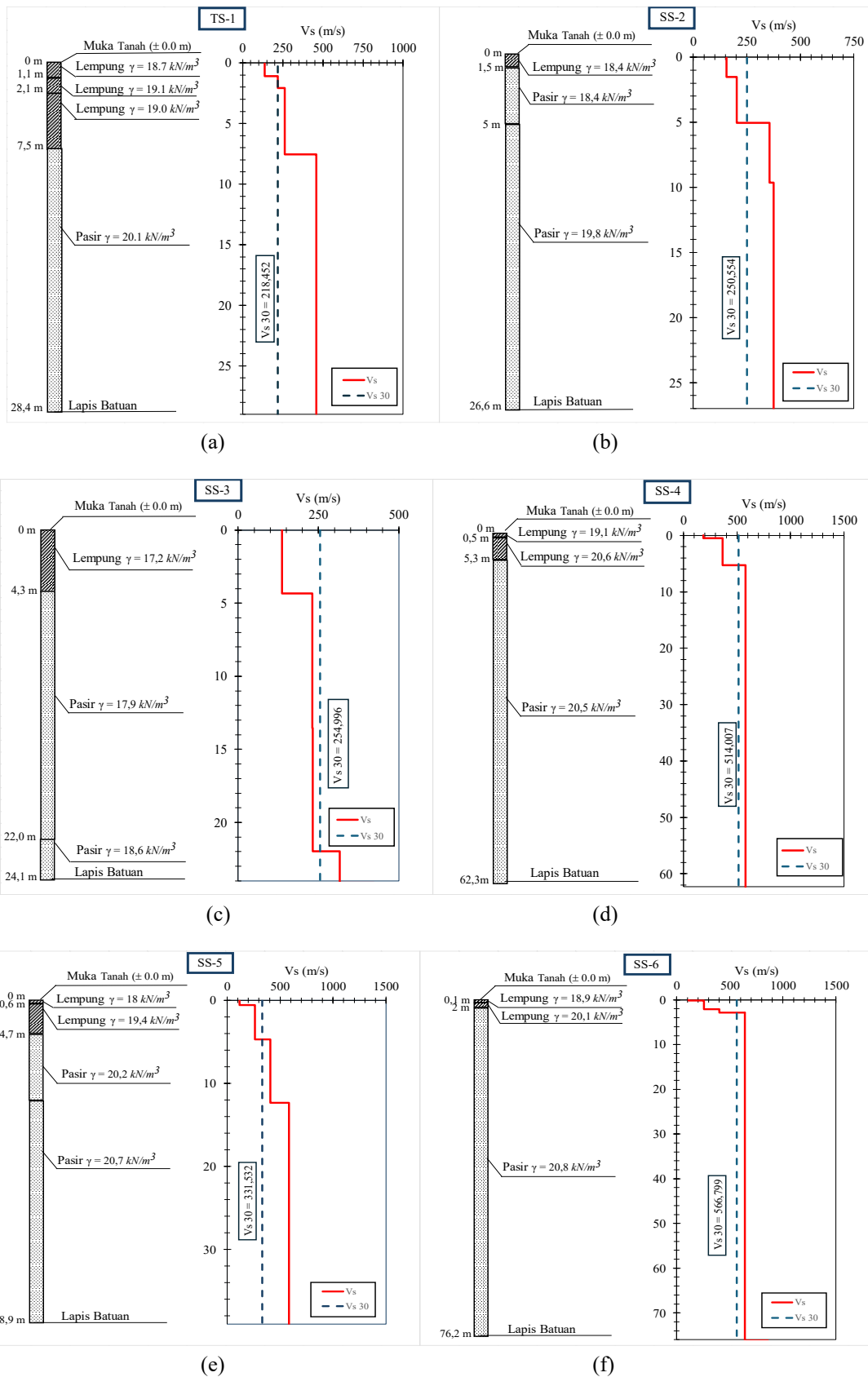
Annealing yang dalam implementasinya cukup handal dalam menginterpretasikan kondisi *uncertainty* pada data geoteknik.

Gambar 3 menunjukkan profil perlapisan tanah dan beberapa parameter yang ditunjukkan seperti, kedalaman (h) dan kecepatan gelombang geser rata-rata pada kedalaman 30 meter (V_{S30}). Wilayah penelitian terdiri dari dua kelas situs utama, yaitu C dan D. Kelas D merupakan wilayah yang dikategorikan sebagai tanah sedang dan C sebagai tanah yang sangat padat atau batuan lunak berdasarkan SNI 1726:2019 [14]. Kondisi lapisan tanah di Kecamatan Sungai Serut dan Teluk Segara berdasarkan penelitian yang dilakukan menunjukkan sebagian besar di dominasi oleh tanah lempung dan pasir. Secara umum, ketebalan lapisan tanah lempung pada kedua kecamatan ini memiliki rata-rata 0 sampai 7,5 m, sedangkan untuk ketebalan lapisan tanah pasir memiliki ketebalan paling besar pada 76,2 m.

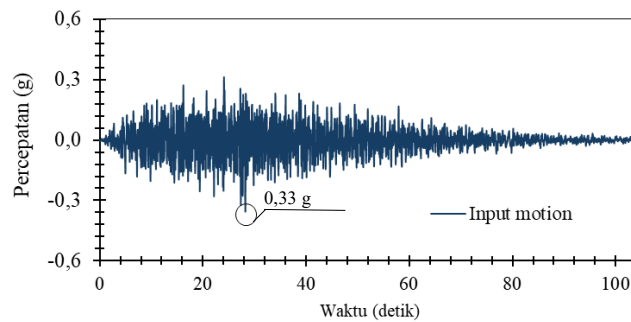
Analisis respons seismik pada penelitian ini, menggunakan konsep perambatan gelombang gempa satu dimensi. Data gelombang gempa yang digunakan adalah gelombang gempa Bengkulu Mentawai 2007 terskala dan dikembangkan oleh Mase [15]. Gelombang seismik ini merupakan gelombang gempa berskala besar yang terjadi di Bengkulu pada tahun 2007 dalam kurun waktu 2 dekade terakhir [7]. **Gambar 4** menunjukkan data perambatan gelombang gempa yang akan digunakan pada analisis perambatan gelombang gempa satu dimensi permodelan *Pressure Dependent Hyperbolic* (PDH) untuk *input motion*.



Gambar 2. Peta lokasi penelitian Kawasan Aliran Sungai Muara Bangkahulu pada Kecamatan Teluk Segara dan Sungai Serut



Gambar 3. Profil pelapisan tanah dan kecepatan gelombang geser rata-rata pada kedalaman 30 meter pada titik (a) TS-1, (b) SS-2, (c) SS-3, (d) SS-4, (e) SS-5, dan (f) SS-6.



Gambar 4. *Input motion* gelombang gempa bumi di Bengkulu tahun 2007 (Dimodifikasi oleh Mase [15])

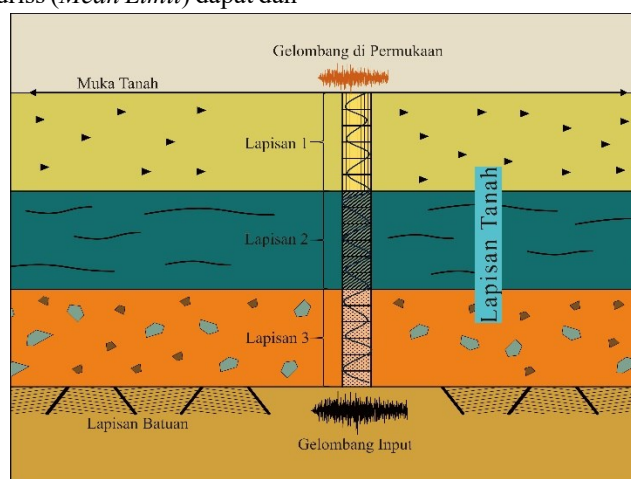
2.3 Analisis Respons Seismik

Analisis perambatan gelombang dilakukan menggunakan pemodelan linier ekuivalen dan nonlinier. Metode linier ekuivalen adalah perkiraan perilaku tanah [16] berdasarkan pemodelan tegangan total dalam frekuensi domain [17]. Metode nonlinier berdasarkan pemodelan tegangan efektif dalam domain waktu. Saat melakukan analisis nonlinier, modulus geser dan rasio redaman bervariasi sepanjang durasi pemuatan [17]. Metode nonlinier mampu mewakili perilaku aktual tanah jauh lebih akurat dan lebih realistis daripada metode ekuivalen linier [18].

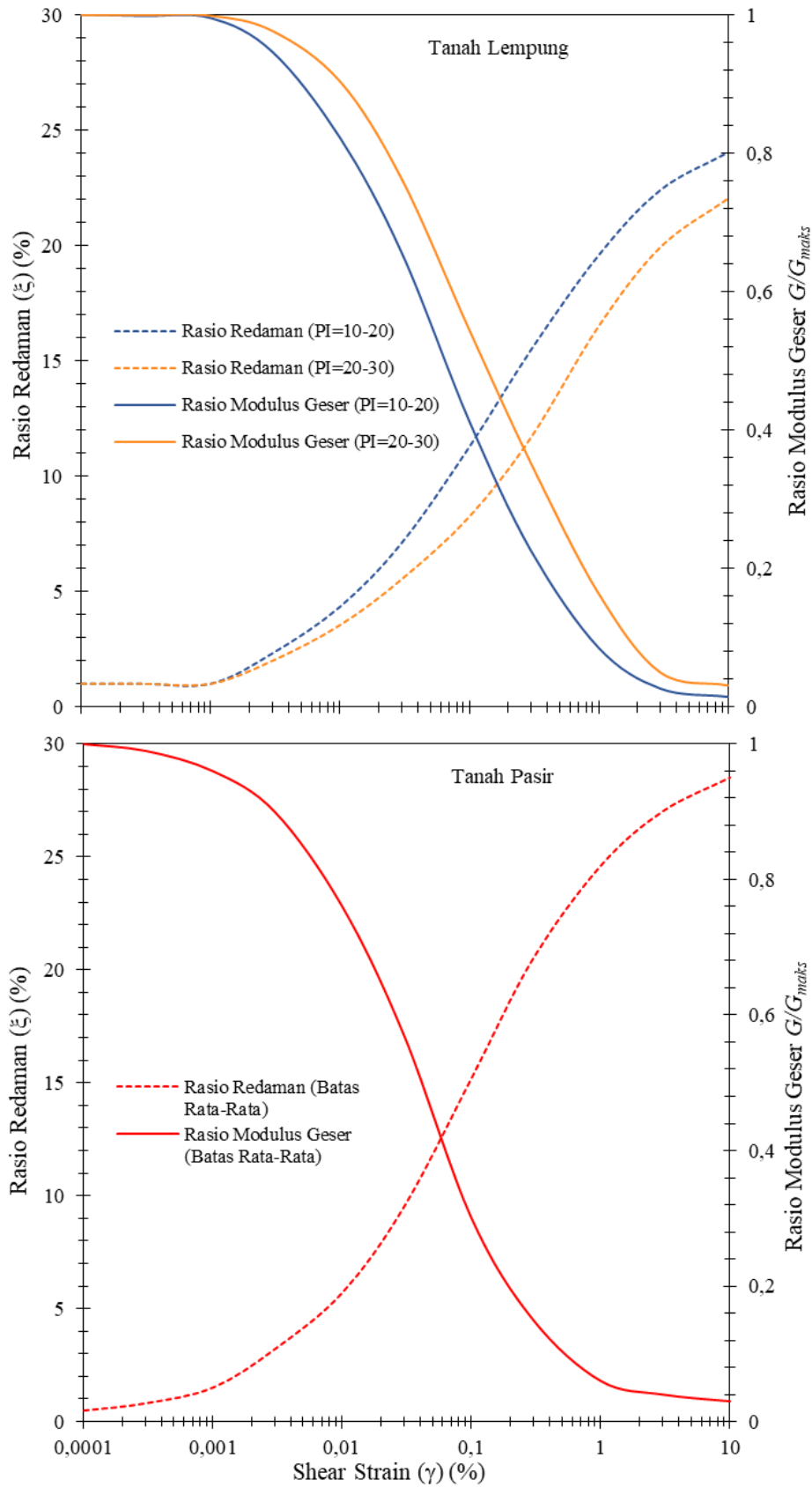
Gambar 5 menampilkan skema perambatan gelombang menggunakan metode analisis panjang gelombang dimana gelombang seismik merambat dari batuan hingga ke permukaan. Faktor yang memengaruhi seperti karakteristik tanah, gelombang seismik, dan respons terhadap getaran tanah. Pada analisis di masukan profil tanah dan input parameter yang mengacu pada referensi jenis tanah dengan penggunaan tanah pasir untuk referensi Seed dan Idriss (*Mean Limit*) dan referensi Vucetic dan Dobry untuk tanah lempung [19]. Kurva Seed dan Idriss (*Mean Limit*) dapat dan

Vucetic dan Dobry [19] dapat dilihat pada **Gambar 6**. Pada Penginputan data *bedrock* dimasukkan berat isi (γ), kecepatan gelombang geser ($V_s \geq 760$ m/s) dan *damping ratio* (ξ) 5%. *Input motion* yang dimasukkan adalah perambatan gelombang Gempa Bengkulu 2007 yang diperoleh dari Mase [15].

Hasil analisis yang didapatkan berupa *Peak Acceleration Ground* (PGA), percepatan spektral dan faktor amplifikasi [12]. Parameter percepatan spektral yang telah didapat akan direkap dari titik ke-1 hingga titik ke-6. Hasil analisis percepatan spektral permukaan tanah yang diperoleh dianalisis dan dibandingkan dengan percepatan spektral yang dirancang sesuai SNI 1726:2019 [14]. Faktor Amplifikasi yang di dapat juga akan dibandingkan dengan faktor amplifikasi dari perbandingan nilai hasil PGA permukaan dan PGA *input motion*. Parameter ini diperlukan untuk membandingkan perambatan gelombang metode linier ekuivalen dan nonlinier.



Gambar 5. Skema Perambatan Gelombang Satu Dimensi



Gambar 6. Kurva G/G_{maks} dan Rasio Redaman untuk Tanah Lempung dan Tanah Pasir [19]

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan nilai percepatan maksimum gempa atau *Peak Ground Acceleration* (PGA), Percepatan Riwayat Waktu, Percepatan Respon Spektra, dan Faktor Amplifikasi.

3.1. Peak Ground Acceleration (PGA)

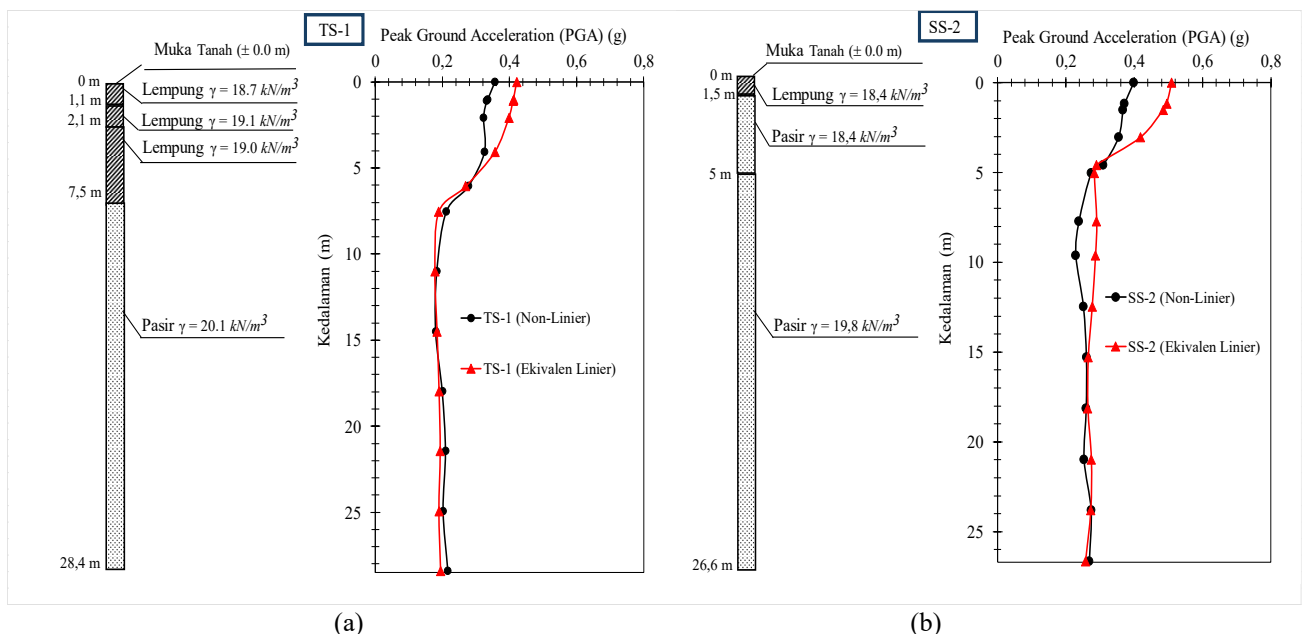
Peak Ground Acceleration (PGA) atau Percepatan tanah maksimum yang diperoleh dari analisis respons seismik di tunjukkan secara grafik pada **Gambar 7**. Semakin tinggi nilai percepatan tanah maksimum, maka bahaya dan risiko gempa juga semakin tinggi. Percepatan tanah merupakan faktor utama yang mempengaruhi struktur bangunan dan menimbulkan momen gaya yang tersebar merata pada setiap titik bangunan, sehingga percepatan tanah digunakan untuk menghitung ketahanan gempa suatu bangunan [20].

Terlihat bahwa dari titik TS-1 hingga titik SS-6 nilai PGA tertinggi muncul pada lapisan permukaan linier ekuivalen. Sejalan dengan penelitian yang telah dilakukan sebelumnya bahwa analisis respons tanah menggunakan analisis linier ekuivalen berdasarkan metode tegangan total menunjukkan peningkatan relatif PGA, sedangkan analisis respons tanah menggunakan analisis nonlinier berdasarkan metode tegangan efektif menunjukkan penurunan PGA di lapangan yang perbedaannya disebabkan oleh sifat linier dari analisis

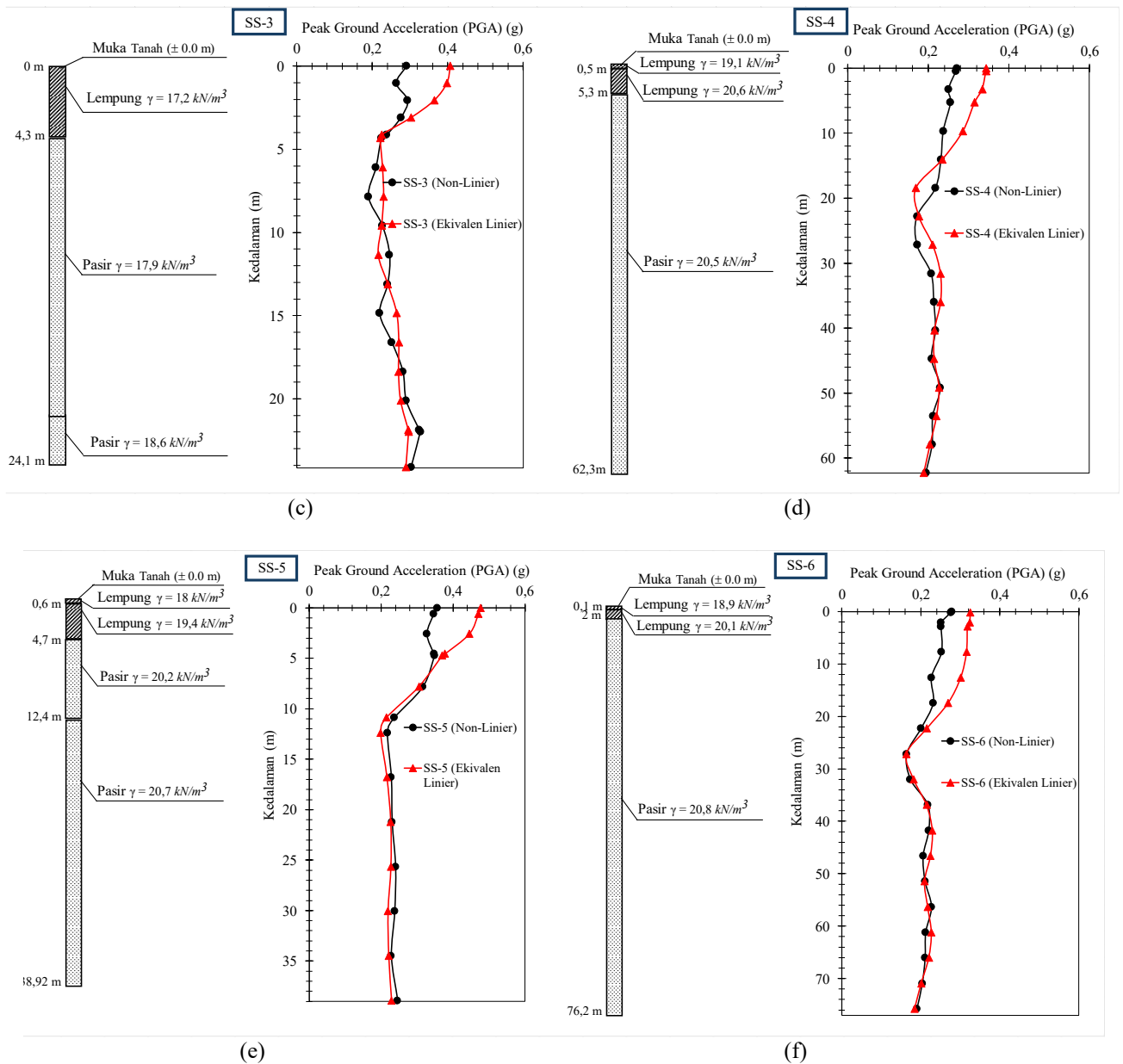
linier ekuivalen [17]. Nilai PGA yang berada pada 0,3g-0,4g termasuk kedalam risiko yang tinggi, dan nilai PGA > 0,4g termasuk kedalam risiko yang sangat tinggi [21].

Nilai PGA nonlinier pada titik SS-4 dan SS-6 berada pada rentang 0,27g – 0,28g dan termasuk kategori risiko sedang dan pada SS-1, SS-2, SS-3 dan SS-5 berada pada 0,30g – 0,40g dan termasuk kategori risiko tinggi. Dan pada linier ekuivalen titik SS-4 dan SS-6 memiliki rentang 0,35g - 0,33g yang termasuk dalam risiko yang tinggi. Sedangkan nilai PGA linier ekuivalen pada SS-1, SS-2, SS-3 dan SS-5 di rentang 0,41g – 0,51g sehingga termasuk ke dalam resiko sangat tinggi.

Hasil penelitian pada profil lapisan tanah yang memiliki kedalaman yang dangkal dengan batuan dan klasifikasi tanah kelas situs D (tanah sedang) pada titik TS-1, SS-2, SS-3 dan SS-5 memiliki nilai PGA atau percepatan tanah maksimum lebih tinggi. Sedangkan titik SS-4 dan SS-6 yang menunjukkan kelas situs C (tanah sangat padat) mempunyai nilai PGA lebih rendah dan termasuk kategori resiko sedang. Titik yang memiliki nilai percepatan tanah maksimum tinggi seperti pada titik TS,1 SS-2, SS-3, dan SS-5 menunjukkan bahwa intensitas getaran tanah selama gempa bumi akan lebih besar, yang berarti struktur dan bangunan di daerah tersebut harus didesain lebih kuat agar dapat bertahan dan tidak runtuh akibat getaran tersebut.



Gambar 7. Hasil analisis perbandingan *Peak Ground Acceleration* (PGA) model linier ekuivalen dan nonlinier (a) TS-1 dan (b) SS-2

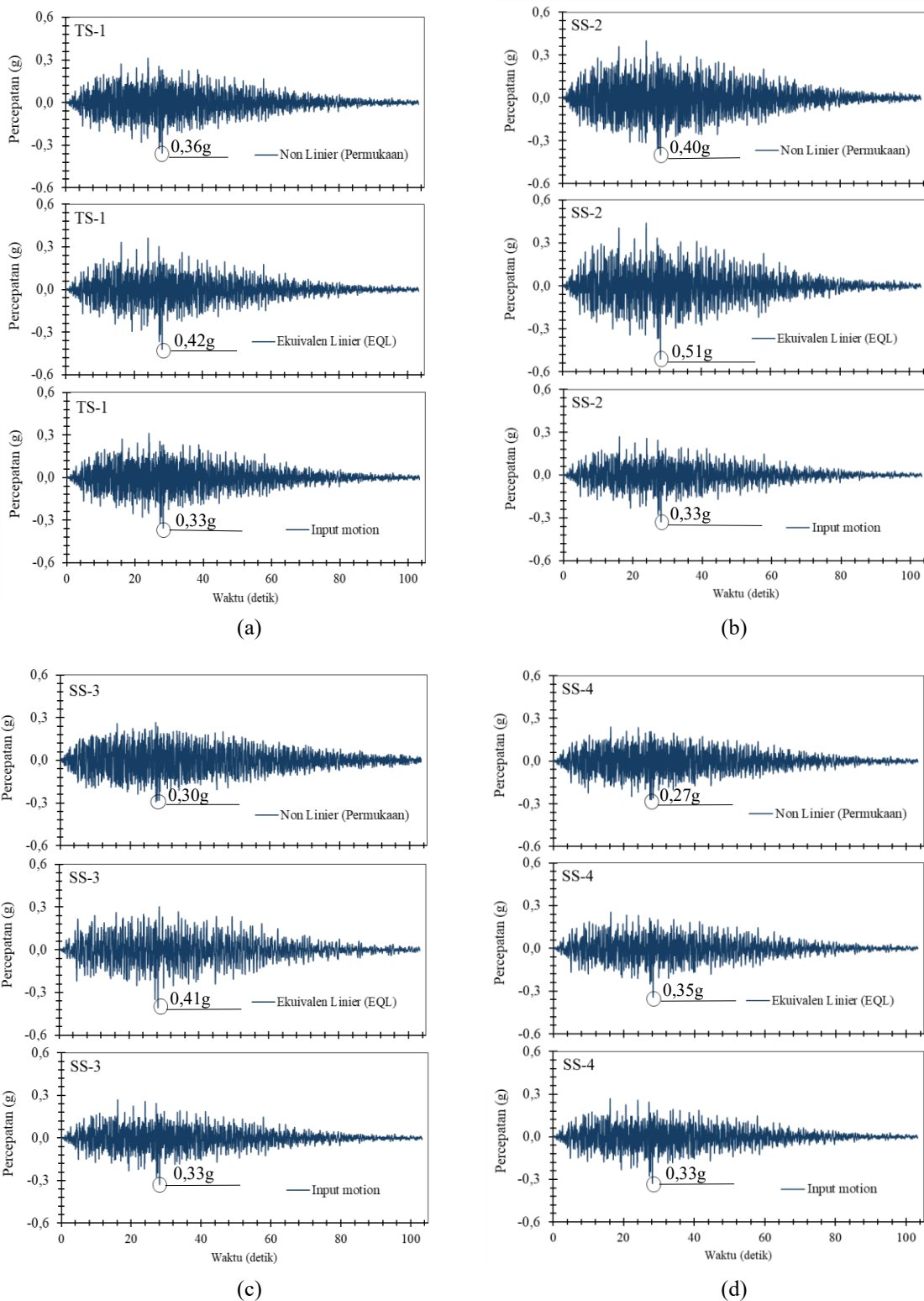


Gambar 7. Hasil analisis perbandingan *Peak Ground Acceleration* (PGA) permodelan linier ekuivalen dan nonlinier (c) SS-3 (d) SS-4, (e) SS-5 dan (f) SS-6.

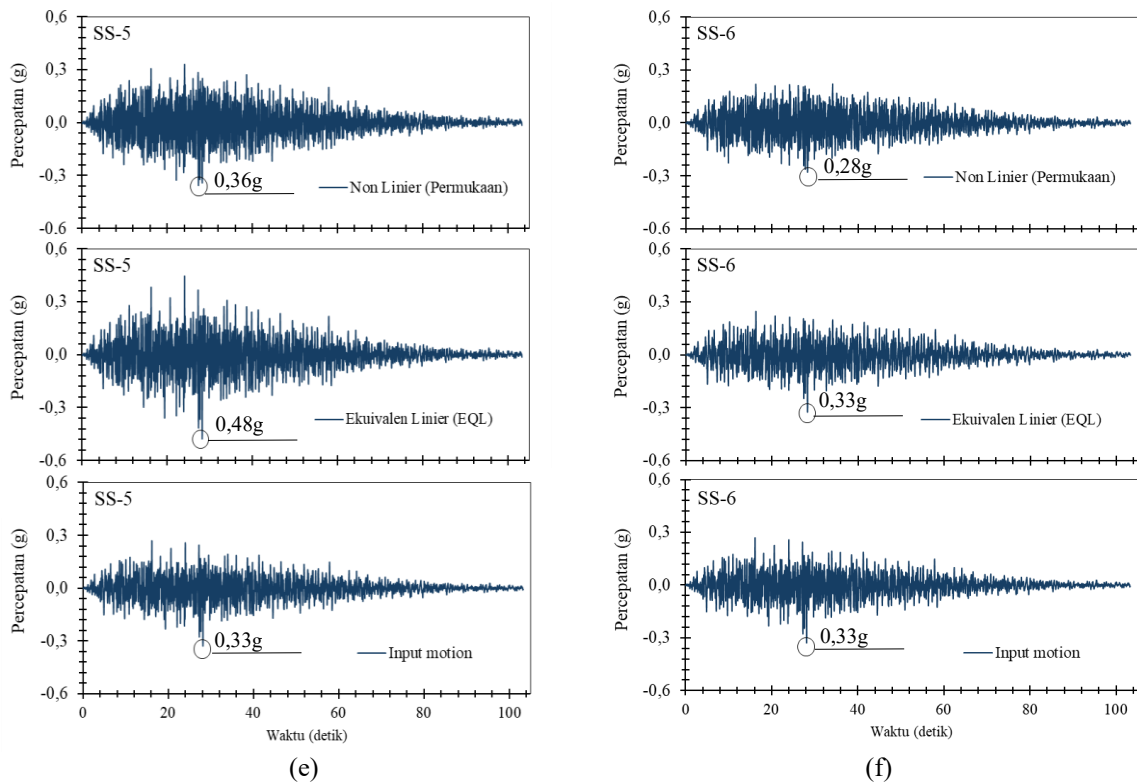
3.2. Percepatan Riwayat Waktu

Hasil dari percepatan riwayat waktu pada **Gambar 8** menyajikan perbandingan percepatan di permukaan tanah yang dihasilkan dari analisis respons seismik metode linier ekuivalen, nonlinier dan gelombang input. Nilai percepatan gelombang gempa metode nonlinier terbesar terdapat di area Kecamatan Sungai Serut (SS-2) sebesar 0,3989g dan yang terendah terdapat pada titik (SS-4) sebesar 0,2689g. Nilai percepatan gelombang gempa metode linier ekuivalen terbesar terdapat di area Kecamatan Sungai Serut (SS-2) sebesar 0,5099g dan yang terendah pada titik (SS-4) sebesar 0,3434g. Pengaruh ketebalan tanah dan karakteristik perla-

pisan yang memiliki karakteristik lunak dan resistensi rendah menyebabkan terjadinya pembesaran percepatan gelombang gempa mendekati permukaan. Berdasarkan hasil analisis, hasil perambatan gelombang berdasarkan linier ekuivalen memberikan percepatan puncak yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan nonlinier, hal ini disebabkan adanya tegangan geser yang berlebihan sehingga menyebabkan nilai PGA menjadi besar [22]. Titik TS-1, SS-2 dan SS-5 mempunyai nilai PGA lebih tinggi dari gelombang input sehingga perlu adanya tinjauan struktur di wilayah tersebut agar dapat bertahan dan tidak runtuh akibat getaran tersebut.



Gambar 8. Perbandingan percepatan riwayat waktu metode linier ekuivalen, nonlinier dan gelombang input (a) TS-1, (b) SS-2, (c) SS-3 dan (d) SS-4



Gambar 8. Perbandingan Percepatan Riwayat Waktu Metode Linier ekivalen, Nonlinier Dan Gelombang input (e) SS-5 dan (b) SS-6

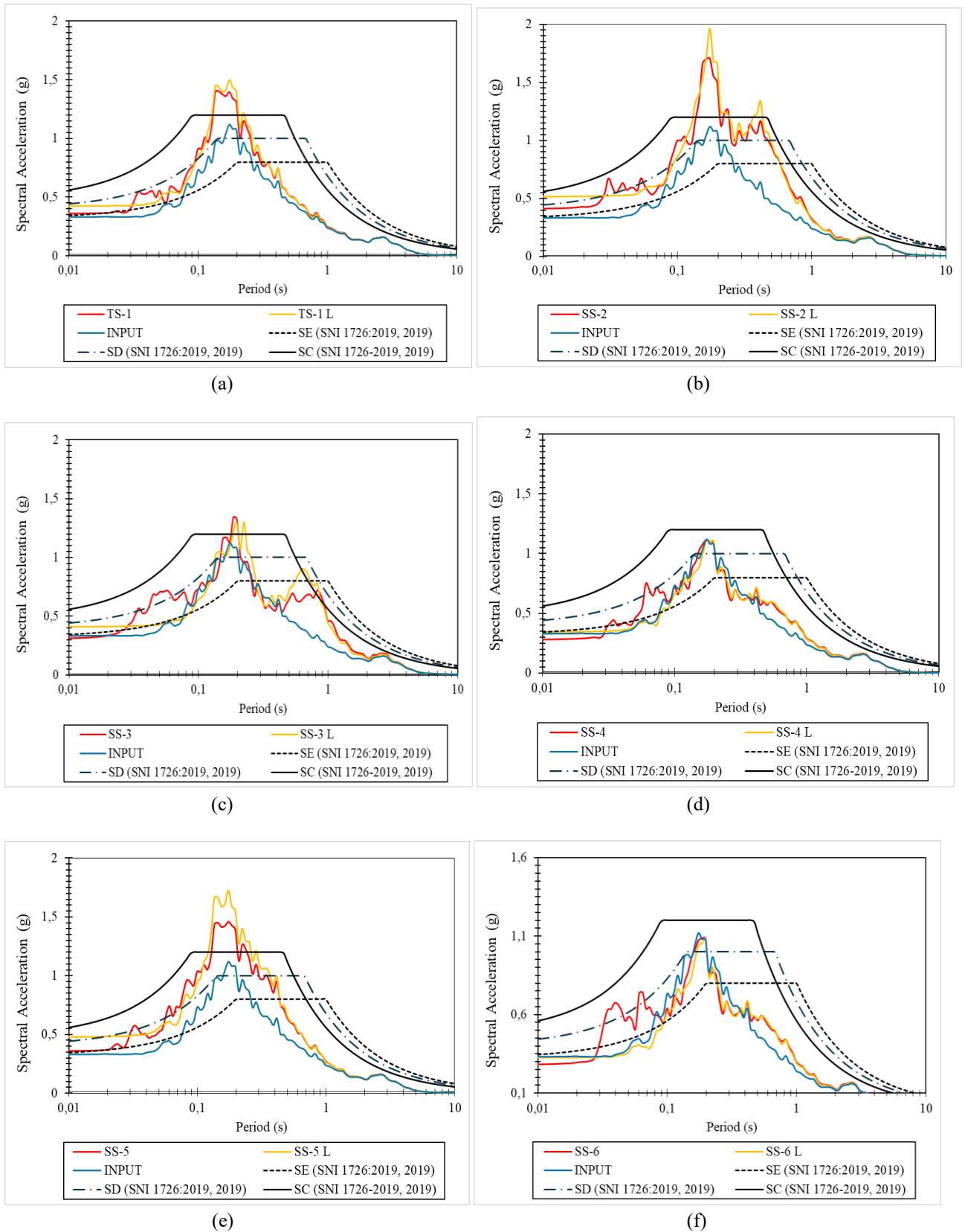
3.3. Percepatan Respon Spektra

Analisis Percepatan Respon Spektra yang dilakukan menggunakan output dari analisis perambatan gelombang gempa dilakukan berdasarkan SNI 1726-2019 [14], namun nilai parameter gempa (PGA, S_s , S_1 , AF) yang digunakan yaitu output dari analisis perambatan gelombang gempa. Desain respons spektra dari analisis perambatan gelombang seismik kemudian dibandingkan dengan desain respons spektra dari SNI 1726:2019 [14] dengan memperhatikan kelas situs tanah dapat dilihat pada **Gambar 9**.

Hasil analisis memperlihatkan bahwa percepatan spektra gelombang input meningkat secara perlahan hingga mencapai puncak pada periode 0,2 detik. Percepatan linier ekivalen dan nonlinier, terjadi perbedaan percepatan spektra dengan percepatan gelombang input. Hal ini kemungkinan disebabkan karena karakteristik material perlapisan tanah penyusun di setiap area. Pada **Gambar 9**, terdapat 6 buah respons spektra. Garis berwarna hitam merupakan respons spektra yang diperoleh dari SNI 1726-2019 [13] untuk kelas Situs C (Tanah Keras), garis putus putus berwarna hitam merupakan respons spektra untuk kelas Situs E (Tanah Lunak), dan garis setrip titik berwarna hitam merupakan respons spektra pada kelas Situs D (Tanah Sedang).

Kota Bengkulu cenderung mengalami percepatan spektra (SA) lebih besar pada 0,2 detik (periode pendek). Ketika gempa besar, bangunan bertingkat rendah hingga sedang cenderung untuk mengalami percepatan spektra yang lebih besar dan bangunan bertingkat rendah cenderung mengalami hal yang lebih berdampak [9]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa percepatan spektra linier ekivalen dan nonlinier di setiap titik mencapai puncaknya pada periode pendek. Grafik yang dihasilkan titik penelitian pada periode pendek (0,2 detik) menunjukkan percepatan tanah maksimum di permukaan lebih tinggi dari pada percepatan tanah maksimum periode panjang (1 detik). Dapat disimpulkan bahwa di area penelitian di sepanjang aliran sungai bagian hilir Muara Bangkahulu akan banyak mengalami kerusakan yang terjadi pada bangunan berlantai rendah.

Pada titik SS-4 dan SS-6 memiliki kelas situs tanah keras (S_c) dan lapisan tebal yang menghasilkan percepatan spektra linier ekivalen dan nonlinier dibawah SNI 1726 : 2019 [14]. Pada tanah sedang (S_b) percepatan spektra linier ekivalen dan nonlinier titik TS-1, SS-2, SS-3 dan SS-5 telah melewati percepatan spektra SNI 1726:2019 [14] maka dari itu perlu dilakukan peninjauan ulang terhadap bangunan berlantai rendah yang telah dibangun pada lokasi tersebut.

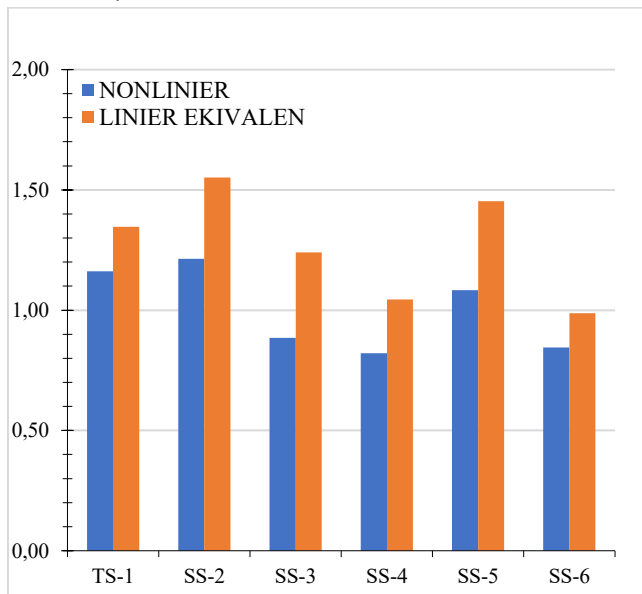


Gambar 9. Perbandingan percepatan respons spektra ekivalen linier, nonlinier, input motion dan percepatan spektra SNI 1726:2019 pada Titik (a) TS-1, (b) SS-2, (c) SS-3, (d) SS-4, (e) SS-5, dan (f) SS-6.

3.4. Faktor Amplifikasi

Faktor amplifikasi menggambarkan perubahan (pembesaran) percepatan pergerakan tanah dari batuan dasar ke permukaan. Perbesaran percepatan tanah dari batuan dasar ke permukaan disebabkan oleh perbedaan kecepatan gelombang geser (V_s) pada batuan dasar dan lapisan tanah. Faktor Amplifikasi di pengaruhi pada lapisan tanah dikarenakan adanya perbedaan karakteristik dari lapisan tanah dan batuan yang sangat signifikan [23]. Faktor amplifikasi juga di pengaruhi oleh besarnya kecepatan gelombang geser (V_s). Semakin besar nilai V_s maka semakin kecil nilai amplifikasinya. Jika nilai V_s pada daerah tersebut rendah, maka nilai faktor amplifikasi yang ada pada daerah tersebut tinggi [13]

Gambar 10 menunjukkan bahwa faktor amplifikasi linier ekuivalen lebih besar dari non-linier di setiap titik penelitian. Pada titik SS-4 dan SS-6 dengan metode linier ekuivalen dan nonlinier mengalami deamplifikasi, karena kedalaman lapisan tanah pada kedua lokasi cukup dalam dan kelas tanah merupakan tanah keras sehingga menyebabkan percepatan gelombang gempa menjadi berkurang pada saat mencapai permukaan tanah. Terlihat faktor amplifikasi pada area yang diteliti memiliki rentang 0,8 sampai 1,2 untuk nonlinier dan 0,98 sampai 1,55 untuk linier ekuivalen. Untuk linier ekuivalen, nilai faktor amplifikasi terbesar terdapat pada titik SS-2 sebesar 1,55 dan untuk nonlinier nilai faktor amplifikasi terbesar juga terdapat pada titik SS-2 yaitu sebesar 1,21.



Gambar 10. Perbandingan Faktor Amplifikasi Linier ekuivalen dan Non-linier Pada Lokasi Penelitian

Hasil Penelitian di area sepanjang aliran sungai Muara Bangkahulu menunjukkan titik lokasi yang mempunyai nilai V_{s30} lebih besar mengalami Faktor Amplifikasi yang lebih

kecil. Semakin besar nilai faktor amplifikasi maka semakin besar juga percepatan tanah di permukaan (PGA) yang disebabkan dangkalnya jarak lapisan batuan dari permukaan sehingga menimbulkan kerusakan jika terjadi gempa besar.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyajikan investigasi respons seismik menggunakan gelombang gempa bumi besar terskala yang pernah terjadi di Bengkulu tahun 2007 pada daerah hilir Sungai Muara Bangkahulu, Kota Bengkulu. Penelitian ini diawali dengan investigasi lapangan di dua kecamatan yang ada di sepanjang aliran sungai Muara Bangkahulu yaitu Kecamatan Sungai Serut dan Teluk Segara Kota Bengkulu. Perambatan gelombang gempa satu dimensi menggunakan permodelan linier ekuivalen dan permodelan nonlinier. Berdasarkan Penelitian yang telah dilakukan, maka dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Kondisi tanah di area sepanjang aliran sungai Muara Bangkahulu bagian hilir pada Kecamatan Sungai Serut dan Teluk Segara menunjukkan bahwa kawasan tersebut didominasi oleh Kelas Situs C dan D berdasarkan klasifikasi situs dengan nilai V_{s30} . Area dekat muara sungai memiliki nilai respon seismik yang tinggi. Lokasi penelitian yang memiliki kelas situs D dan kedalaman antara permukaan dan batuan yang rendah menghasilkan nilai respons seismik yang tinggi.
2. Nilai PGA yang dihasilkan oleh metode linier ekuivalen pada lapisan permukaan didapati lebih besar daripada metode non-linier. Pada PGA nonlinier mempunyai nilai sebesar 0,27g - 0,4g dan nilai PGA yang dihasilkan dengan metode linier ekuivalen didapati sebesar 0,41g - 0,51g. Kelurahan Suka Merindu dan Kelurahan Kelurahan Semarang termasuk dalam kategori resiko sedang. Wilayah yang memiliki nilai PGA tinggi seperti pada Kelurahan Kampung Bali, Kelurahan Pasar Bengkulu, Kelurahan Kampung Kelawi dan Kelurahan Tanjung Jaya dikategorikan sebagai wilayah yang memiliki resiko gempa yang tinggi sehingga intensitas getaran tanah selama gempa bumi akan lebih besar, yang berarti struktur dan bangunan di daerah tersebut harus didesain lebih kuat agar dapat bertahan dan tidak runtuh akibat getaran tersebut.
3. Terdapat empat kelurahan dengan respons spektra linier ekuivalen dan nonlinier yang telah melewati desain respons spektra SNI 1726:2019 yaitu Kelurahan Kampung Bali, Kelurahan Pasar Bengkulu, Kelurahan Kampung Kelawi dan Kelurahan Tanjung Jaya. Respons spektra yang dihasilkan cenderung telah melewati desain respons spektra SNI 1726:2019 pada periode 0,2 detik (periode pendek), yang mengakibatkan ketika gempa

besar terjadi bangunan bertingkat rendah cenderung mengalami hal yang lebih berdampak. Hal ini perlu di pertimbangkan untuk memastikan bahwa bangunan memiliki nilai desain yang cukup jika gempa yang lebih kuat mungkin terjadi dimasa depan.

4. Faktor Amplifikasi linier ekivalen lebih besar dari nonlinier di setiap titik penelitian. Kelurahan Suka Merindu dan Kelurahan Semarang dengan metode linier ekivalen dan nonlinier mengalami deamplifikasi, karena kedalaman lapisan tanah pada kedua lokasi cukup dalam dan kelas situs tanah Keras (S_c) sehingga percepatan gelombang gempa menjadi berkurang pada saat mencapai permukaan tanah. Untuk linier ekivalen, nilai faktor amplifikasi terbesar terdapat pada Kelurahan Pasar Bengkulu sebesar 1,55 dan untuk nonlinier nilai faktor amplifikasi terbesar juga terdapat pada Kelurahan Pasar Bengkulu yaitu sebesar 1,21. Kelurahan lainnya yang memiliki nilai amplifikasi tinggi yaitu Kelurahan Kampung Bali dan Kelurahan Tanjung Jaya yang menunjukkan bahwa saat gempa bumi terjadi wilayah ini berpotensi mengalami goncangan gempa kuat.

Daftar Pustaka

- [1] L. Z. Mase, N. Sugianto, and Refrizon, "Seismic Hazard Microzonation of Bengkulu City, Indonesia," *Geoenvironmental Disasters*, vol. 8, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40677-021-00178-y.
- [2] L. Z. Mase, "Liquefaction Potential Analysis Along Coastal Area of Bengkulu Province due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu Earthquake," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 49, no. 6, pp. 721–736, 2017, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2.
- [3] R. Misliniyati, L. Z. Mase, A. J. Syahbana, and E. Soebowo, "Seismic Hazard Mitigation for Bengkulu Coastal Area Based on Site Class Analysis," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, Dec. 2018. doi: 10.1088/1755-1315/212/1/012004.
- [4] M. Farid and L. Z. Mase, "Implementation of Seismic Hazard Mitigation on The Basis of Ground Shear Strain Indicator for Spatial Plan of Bengkulu City, Indonesia," *International Journal of GEOMATE*, vol. 18, pp. 199–207, 2020, doi: 10.21660/2020.69.24759
- [5] A. R. Salsabil, A. Hilyah, M. S. Purwanto, and M. H. M. Fajar, "Zonasi Bahaya Kegempaan Akibat Patahan Aktif di Wilayah Jawa Timur dengan Pendekatan Deterministik Menggunakan Perhitungan Atenuasi Chiou-Youngs 2014 NGA," *Jurnal Geosaintek*, vol. 4, no. 3, p. 103, Nov. 2018, doi: 10.12962/j25023659.v4i3.4508.
- [6] L. Z. Mase, Refrizon, Rosiana, and P. W. Angraini, "Local Site Investigation and Ground Response Analysis on Downstream Area of Muara Bangkahulu River, Bengkulu City, Indonesia," *Indian Geotechnical Journal*, vol. 51, no. 5, pp. 952–966, Oct. 2021, doi: 10.1007/s40098-020-00480-w.
- [7] L. Z. Mase, "Reliability Study of Spectral Acceleration Designs Against Earthquakes in Bengkulu City, Indonesia," *International Journal of Technology*, vol. 9, no. 5, pp. 910–924, 2018, doi: 10.14716/ijtech.v9i5.621.
- [8] L. Z. Mase, N. Sugianto, and Refrizon, "Seismic Hazard Microzonation of Bengkulu City, Indonesia," *Geoenvironmental Disasters*, vol. 8, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40677-021-00178-y.
- [9] L. Z. Mase, "Seismic Hazard Vulnerability of Bengkulu City, Indonesia, Based on Deterministic Seismic Hazard Analysis," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 38, no. 5, pp. 5433–5455, Oct. 2020, doi: 10.1007/s10706-020-01375-6.
- [10] M. Farid and A. I. Hadi, "Measurement of shear strain in map liquefaction area for earthquake mitigation in Bengkulu City," *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 16, no. 4, pp. 1597–1606, Aug. 2018, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v16i4.8043
- [11] L. Z. Mase, "Seismic Response Analysis along the Coastal Area of Bengkulu during the September 2007 Earthquake," *Makara Journal of Technology*, vol. 22, no. 1, p. 37, May 2018, doi: 10.7454/mst.v22i1.3457.
- [12] Y. M. A Hashash, "Nonlinear and Equivalent Linear Seismic Site Response of One-Dimensional Soil Columns USER MANUAL," 2016. [Online]. Available: www.illinois.edu/~deepsoil
- [13] L. Z. Mase, M. Irsyam, D. Gustiparani, A. N. Noptapia, A. J. Syahbana, and E. Soebowo, "Identification of bedrock depth along a downstream segment of Muara Bangkahulu River, Bengkulu City, Indonesia," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 83, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.1007/s10064-024-03591-3.
- [14] "SNI 1726-2019. Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung," Badan Standarisasi Nasional, 2019.
- [15] L. Z. Mase, "Liquefaction potential analysis along coastal area of Bengkulu province due to the 2007 Mw 8.6 Bengkulu earthquake," *Journal of Engineering*

- and Technological Sciences, vol. 49, no. 6, pp. 721–736, 2017, doi: 10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.6.2.
- [16] E. Rudi Iswanto and E. Yee, “Comparison of Equivalent Linear and Non Linear Methods on Ground Response Analysis: Case Study at West Bangka Site,” 2016.
- [17] M. Adampira, H. Alielahi, M. Panji, and H. Koohsari, “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*, vol. 8, no. 5, pp. 3103–3118, May 2015, doi: 10.1007/s12517-014-1399-6.
- [18] J. Kaklamanos, L. G. Baise, E. M. Thompson, and L. Dorfmann, “Comparison of 1D linear, equivalent-linear, and nonlinear site response models at six KiK-net validation sites,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 69, pp. 207–219, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.soildyn.2014.10.016.
- [19] A. K. Somantri, L. Z. Mase, A. Susanto, R. Gunadi, and A. Febriansya, “Analysis of Ground Response of Bandung Region Subsoils due to Predicted Earthquake Triggered by Lembang Fault, West Java Province, Indonesia,” *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 1155–1181, Mar. 2023, doi: 10.1007/s10706-022-02328-x.
- [20] R Putri Anindya, Purwanto M. Singgih, and Widodo Amien Widodo, “Identifikasi Percepatan Tanah Maksimum (PGA) Dan Kerentanan Tanah Menggunakan Metode Mikrotremor Jalur Sesar Kendeng,” Feb. 2017.
- [21] F. Fathani, A. D. Adi, S. Pramumijoyo, and D. Karnawati, “Determination of Peak Ground Acceleration at Bantul Regency, Yogyakarta Province, Indonesia.”
- [22] L. Z. Mase, S. Likitlersuang, and T. Tobita, “Analysis of seismic ground response caused during strong earthquake in Northern Thailand,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 114, pp. 113–126, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2018.07.006.
- [23] I. Rusydy, K. Jamaluddin, E. Fatimah, F. Andika, and Y. Furumoto, “Estimation of Site Amplifications from Shear-Wave Velocity at Pyroclastic deposits and Basins in Aceh Tengah and Bener Meriah District, Aceh Province, Indonesia,” *International Journal of Disaster Management*, vol. 1, no. 1, p. 46, 2017.