

Studi Mikrozonasi Kerentanan Seismik dan Bangunan Bertingkat Menggunakan Metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) di Kabupaten Bengkulu Selatan

Indri Novtrisa¹⁾, Lindung Zalbuin Mase¹⁾, Rena Misliniyati¹⁾, Khairul Amri¹⁾, Refrizon²⁾, Arif Ismul Hadi²⁾, Darmawan Ikhlas Fadli²⁾

¹⁾Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Bengkulu

²⁾Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Bengkulu

Email korespondensi : g1b020024.lndrinovtrisa@mhs.unib.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v21i3.19616>

Submitted: 20 Juni 2024; Accepted: 22 Agustus 2024

ABSTRAK- Mikrozonasi seismik merupakan proses pemetaan untuk memprediksi respon tanah terhadap guncangan seismik yang dapat digunakan sebagai acuan mitigasi bencana dan pembangunan yang akan dilakukan di Kabupaten Bengkulu Selatan. Penelitian ini menggunakan data *shapefile* peta administrasi dan data mikrotremor sebanyak 69 titik. Data mikrotremor kemudian diolah menggunakan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) untuk mendapatkan kurva HVSR. Pengolahan data ini menghasilkan nilai faktor amplifikasi (A_0) pada rentang 1,17 – 4,07, nilai frekuensi natural (f_0) antara 0,25 Hz – 14,40 Hz, indeks kerentanan seismik (K_g) antara 0,26 – 11,78, dan nilai periode dominan (T_0) antara 0,07 s – 3,86 s. Parameter ini selanjutnya digunakan untuk membuat peta sebaran yang akan memberikan gambaran mengenai distribusi spasialnya. Selain itu, potensi bangunan yang rentan terhadap bencana seismik dengan ketinggian 1 hingga 2 lantai teridentifikasi di Kecamatan Pino Raya dan Kecamatan Kota Manna, sedangkan bangunan dengan ketinggian 1 hingga 4 lantai berada di Kecamatan Pasar Manna.. Berdasarkan nilai-nilai parameter tersebut, dapat disimpulkan bahwa lokasi penelitian masuk ke dalam kategori zona rendah terhadap getaran gempa bumi. Hasil penelitian ini dapat digunakan dalam perencanaan mitigasi bencana, khususnya dalam upaya peningkatan ketahanan bangunan di wilayah yang diteliti.

KATA KUNCI: Mikrozonasi, Mikrotremor, HVSR, Bengkulu Selatan.

ABSTRACT- Seismic microzoning is a mapping process to predict ground response to seismic shaking, which can be used as a reference for disaster mitigation and development in South Bengkulu Regency. This research uses administrative map *shapefile* data and microtremor data as many as 69 points. The microtremor data was then processed using the HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) method to obtain the HVSR curve. This data processing produces amplification factor values (A_0) in the range of 1.17 - 4.07, natural frequency values (f_0) between 0.25 Hz - 14.40 Hz, seismic vulnerability index (K_g) between 0.26 - 11.78, and dominant period values (T_0) between 0.07 s - 3.86 s. These parameters are then used to create a distribution map that will provide an overview of its spatial distribution. In addition, potential buildings vulnerable to seismic disasters with a height of 1 to 2 floors were identified in Pino Raya and Kota Manna sub-districts, while buildings with a height of 1 to 4 floors were located in Pasar Manna sub-district. Based on the values of these parameters, it can be concluded that the research location falls into the category of low zone to earthquake vibrations. The results of this research can be used in disaster mitigation planning, especially in efforts to increase building resilience in the studied area.

KEYWORDS : Microzonation, Microtremor, HVSR, South Bengkulu.

PENDAHULUAN

Provinsi Bengkulu terletak diantara tiga tatanan tektonik pemicu gempa bumi, yaitu Sesar Sumatera, Sesar Mentawai dan zona subduksi Sumatera yang membatasi Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo - Australia sehingga Provinsi Bengkulu menjadi salah satu daerah dengan tingkat intensitas gempa yang tinggi (Mase, Sugianto, & Refrizon, 2021). Salah satu kabupaten di pesisir Provinsi Bengkulu adalah Kabupaten Bengkulu Selatan yang termasuk ke dalam daerah rawan gempa, kondisi ini diakibatkan oleh letak geografisnya yang berdekatan dengan dua struktur geologi utama yaitu sesar Sumatera Segmen Manna di wilayah Timur Laut dan Zona Subduksi Sumatera di wilayah Barat Daya (Kencoro et al., 2023). Keadaan tektonik Provinsi Bengkulu dan 2 sumber gempa dapat dilihat pada Gambar 1.

Mayoritas gempa bumi disebabkan oleh energi yang terlepas akibat pergerakan lempeng tektonik yang saling bersinggungan atau bergesekan, biasanya gempa bumi terjadi pada daerah dimana lempeng aktif tersebut bergerak. Gempa bumi berskala besar dengan kekuatan 7,9 Mw yang dikenal dengan nama

gempa Bengkulu - Enggano pernah melanda Bengkulu pada tahun 2000 dan disusul gempa dengan skala 8,6 Mw pada tahun 2007, akibat dari gempa ini terjadi kerusakan parah termasuk runtuhnya berbagai bangunan strategis dan penting di kota-kota yang ada di Bengkulu khususnya wilayah Bengkulu Selatan (Farid & Mase, 2020; Mase, 2017). Gambar 2 memperlihatkan kerusakan akibat gempa tahun 2000 dan 2007.

Secara umum kerusakan yang ditimbulkan akibat dari getaran seismik dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk mutu dan kualitas struktur bangunan, karakteristik geoteknik dan topografi wilayah serta percepatan tanah di wilayah yang mengalami gempa (Edwiza & Novita, 2008). Maka dari itu diperlukan sebuah studi mengenai mikrozonasi rawan gempa sebagai langkah mitigasi untuk mengetahui tingkat kerentanan wilayah tersebut. Kerentanan seismik menggambarkan seberapa besar kerusakan yang mungkin terjadi akibat dari adanya gempa bumi, karakteristik sedimen dapat diidentifikasi melalui pengukuran rasio spektral HVSR (*Horizontal to vertical Spectral Ratio*).



Gambar 1 Peta Tektonik Provinsi Bengkulu dan 2 Sumber Gempa (Dimodifikasi Dari Mase, Sugianto, & Refrizon, 2021)



Gambar 2 Dampak Gempa Bengkulu Tahun 2000 (kiri) (Time Inc, 2000) dan Dampak Gempa Bengkulu Tahun 2007 (kanan) (BBC Indonesia, 2007)

Penelitian mengenai kerentanan seismik di Kabupaten Bengkulu Selatan sebelumnya telah dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu diantaranya Hadi et al., (2024) menganalisis faktor yang berkontribusi terhadap kerentanan seismik. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa wilayah penelitian secara keseluruhan menunjukkan tingkat kerentanan seismik yang rendah, meskipun ada beberapa area memiliki kerentanan yang tinggi. Faktor utama yang berkontribusi terhadap kerentanan ini adalah nilai *peak ground acceleration* (PGA) yang besar. Kencoro et al., (2023) menggunakan data mikrotremor yang diolah untuk mengestimasi *peak ground acceleration* (PGA) menggunakan formula Kanai, menunjukkan beberapa area dengan potensi bahaya gempa yang perlu perhatian khusus dalam perencanaan pembangunan konstruksi tahan gempa. Penelitian serupa yang dilakukan oleh Refrizon et al., (2024) menggunakan data mikrotremor memperoleh nilai indeks kerentanan sesimik yang cenderung rendah, nilai ini menunjukkan adanya lapisan sedimen yang tipis di wilayah penelitian. Meski penelitian terkait kerentanan seismik telah banyak dilakukan, penting untuk selalu mengembangkan informasi dalam penelitian.

Pada penelitian ini berfokus pada penerapan gelombang mikrotremor untuk mengetahui gambaran kondisi geologis di bawah permukaan menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr) untuk mendapatkan parameter karakteristik bawah permukaan seperti nilai amplifikasi

(A_0) dan frekuensi dominan (f_0). Data yang dihasilkan akan digunakan sebagai bahan analisis untuk mengetahui potensi tinggi bangunan yang memiliki kerentanan terhadap bencana seismik dan mikrozonasi daerah-daerah rawan gempa.

Mikrotremor

Mikrotremor (*ambient noise*) merupakan getaran sekitar yang dihasilkan dari berbagai macam aktivitas mulai dari sumber alam, manusia, lalu lalang kendaraan dan lain sebagainya (Molnar et al., 2022). Perekaman mikrotremor dilakukan dengan menggunakan alat *seismograf*. Hasil pengukuran data mikrotremor di lapangan akan menghasilkan tiga komponen yang tercatat dalam fungsi waktu, komponen vertikal dengan arah atas-bawah dan dua komponen horizontal yaitu timur-barat dan utara-selatan (Januarta, Yudistira, Tohari, & Fattah, 2020).

Mikrozonasi

Mikrozonasi mikrotremor merupakan proses pemetaan area yang dibagi berdasarkan parameter spesifik, beberapa karakteristik parameter yang dipertimbangkan dalam proses ini termasuk periode dominan dan faktor amplifikasi (Jamal, Lantu, Aswad, & Sulaiman, 2017).

Analisis HVSr (Horizontal to Vertical Spectra Ratio)

Analisis yang sering digunakan dalam mikrozonasi mikrotremor dan respons area adalah analisis HVSr, metode ini membandingkan komponen horizontal dengan komponen vertikal

gelombang mikrotremor yang berkorelasi dengan kekokohan tanah serta faktor amplifikasi (Koesuma, Hatmo Putera, & Darsono, 2019). Analisis HVSR akan menyajikan hasil berupa puncak spektrum (*spectrum peak*) yang menunjukkan nilai faktor amplifikasi (A_0) dan frekuensi dominan (f_0) (Nakamura, 2000).

Amplifikasi merupakan peristiwa penguatan gelombang dimana tingginya nilai amplifikasi menunjukkan bahwa area tersebut lebih rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi. (Supriyadi, Muttaqin, Khumaedi, & Sugiyanto, 2022). Amplifikasi (A_0) terjadi karena adanya perbedaan antara sedimen dan lapisan batuan yang dapat meningkatkan gelombang seismik, sementara frekuensi natural (f_0) erat kaitannya dengan tingkat ketebalan pada sedimen lunak (Misliniyati, Mase, & Refrizon, 2023). Ketebalan lapisan sedimen lunak dapat mempengaruhi seberapa besar tingkat kerentanan wilayah tersebut terhadap getaran gempa bumi, semakin tinggi nilai frekuensi maka semakin tipis lapisan sedimen lunak.

Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Indeks kerentanan seismik memberikan gambaran tentang tingkat risiko yang mungkin dihadapi oleh bangunan di suatu wilayah saat terjadi gempa. Nilai indeks kerentanan seismik yang tinggi mengisyaratkan bahwa wilayah tersebut lebih rentan terhadap kerusakan akibat gempa bumi (Siddharth & Sinha, 2022). Nilai indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh kondisi tanah, besarnya frekuensi natural dan faktor amplifikasi. Nilai dari indeks kerentanan seismik mengalami peningkatan jika amplifikasi (A_0) semakin tinggi dan frekuensi natural (f_0) semakin rendah. Indeks kerentanan seismik tidak hanya penting untuk mengidentifikasi potensi bahaya gempa sebelum terjadi, tetapi juga dapat digunakan untuk memprediksi dan memitigasi kerusakan di masa depan. Indeks kerentanan seismik dihitung dengan

Persamaan 1 (Widyawarman & Fauzi, 2020).

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (1)$$

Dengan K_g adalah indeks kerentanan seismik, A_0 adalah amplifikasi dan f_0 merupakan frekuensi natural (Hz).

Periode Dominan (T_0)

Periode dominan adalah waktu yang diperlukan oleh gelombang mikrotremor untuk satu siklus penuh getaran melalui lapisan sedimen. Periode dominan dapat digunakan untuk menentukan klasifikasi jenis tanah dan ketinggian suatu bangunan terhadap resiko gempa bumi, periode dominan diperoleh dari persamaan berikut (Edison et al., 2021; Öziçer, Uyanik, & Timur, 2017).

$$T_0 = \frac{1}{f_0} \quad (2)$$

Dengan T_0 adalah periode dominan (s), f_0 adalah frekuensi natural (Hz). Berdasarkan persamaan (2) Periode dan frekuensi memiliki hubungan berbanding terbalik, ketika frekuensi meningkat maka periode akan menurun, dan sebaliknya. Periode dominan pada tanah akan berpengaruh terhadap suatu bangunan. Setiap bangunan memiliki periode dominan atau periode resonansi, yaitu waktu yang dibutuhkan oleh bangunan untuk bergetar bolak balik secara alami dalam merespon getaran yang diterimanya. Apabila periode dominan tanah mendekati bahkan sesuai dengan periode resonansi bangunan, maka bangunan tersebut akan mengalami getaran paling kuat dan resiko kerusakan parah saat terjadi gempa bumi. Setelah mendapat nilai periode, berikutnya dapat dihitung jumlah lantai bangunan yang rentan terhadap bencana seismik dengan menggunakan persamaan berikut (Mustika, Putra, & Fitria, 2022):

$$T_0 = \zeta \times N \quad (3)$$

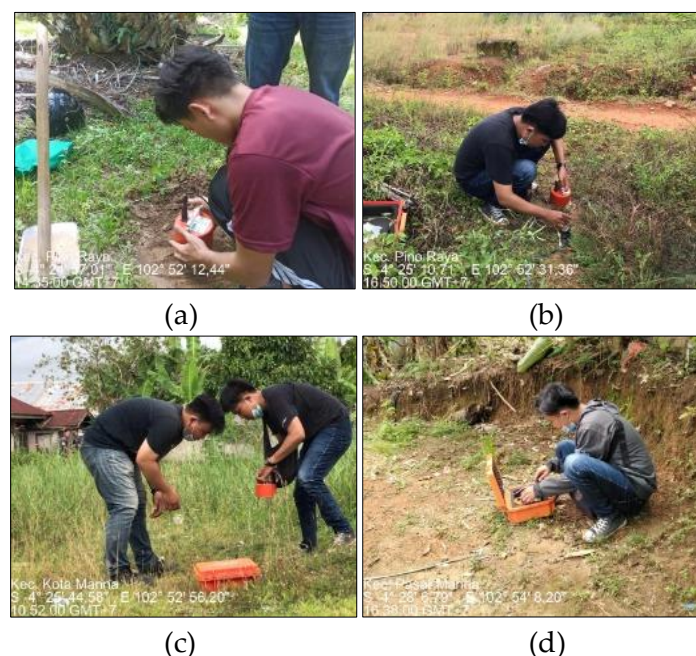
Dengan ζ merupakan konstanta sebesar 0,1 dan N adalah jumlah lantai bangunan.

METODOLOGI PENELITIAN

Pada penelitian ini dilakukan di 3 lokasi yang ada di Kabupaten Bengkulu Selatan yaitu Kecamatan Pino Raya, Kecamatan Kota Manna, dan Kecamatan Pasar Manna. Data yang digunakan adalah data *shapefile* Peta Administrasi Kabupaten Bengkulu Selatan dan data hasil pengukuran mikrotremor sebanyak 69 titik dengan pengambilan data merujuk pada *Site Effects Assesment using Ambient Excitation* (SESAME). Pada Gambar 3 menunjukkan beberapa contoh perekaman dilapangan. Perekaman dilakukan ketika tidak ada gangguan getaran besar dari aktivitas manusia atau kendaraan di sekitar lokasi. Durasi pengukuran untuk setiap titik adalah ± 30 menit dengan *frequency sampling* 100 Hz. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 6.

Pengolahan data mikrotremor dengan metode HVSR akan menghasilkan grafik yang menunjukkan hubungan antara H/V dan frekuensi. Amplifikasi berbanding lurus dengan nilai perbandingan spektral horizontal dan vertikalnya. Nilai amplifikasi didapatkan dari nilai H/V maksimum pada *peak* kurva sumbu Y dan frekuensi natural (f_0) pada sumbu absis X (Stanko et al., 2019). Pengolahan data diawali dengan memasukkan data hasil perekaman

mikrotremor ke *software* GEOPSY yang tersusun atas 3 komponen seperti yang dapat dilihat pada Gambar 3. Tiga komponen tersebut yaitu komponen vertikal (*up-down*) dan horizontal (*east-west* dan *north-south*) yang sudah dalam bentuk format SESAME ASCII FORMAT (.saf). Proses berikutnya dilakukan *windowing*, yaitu proses pemilihan gelombang hasil pengukuran mikrotremor tanpa adanya *noise*. Proses *windowing* dapat dilakukan secara otomatis dengan penginputan parameter nilai *long term average* (LTA), *short term average* (STA) dan panjang *window* (*window length*) serta penginputan parameter lainnya di *tool box* HVSR. Untuk persyaratan *window length* berdasarkan SESAME (2004) minimal $I_w=10/f_0$, dengan I_w adalah panjang *window*. Untuk rentang frekuensi pada pengolahan data dipilih 0,5 Hz- 20 Hz. Setelah proses *windowing* dan input parameter lainnya selesai, dilakukan *running* untuk mrnghasilkan kurva HVSR. Contoh proses *windowing*, *Tool box* HVSR dan kurva HVSR dapat dilihat pada Gambar 4 dan 5. Hasil dari proses pengolahan data akan di simpan dalam format .hv untuk kemudian dilakukan analisis lebih lanjut. Pengecekan standar reliabilitas kurva HVS dapat dilihat pada Tabel 1.



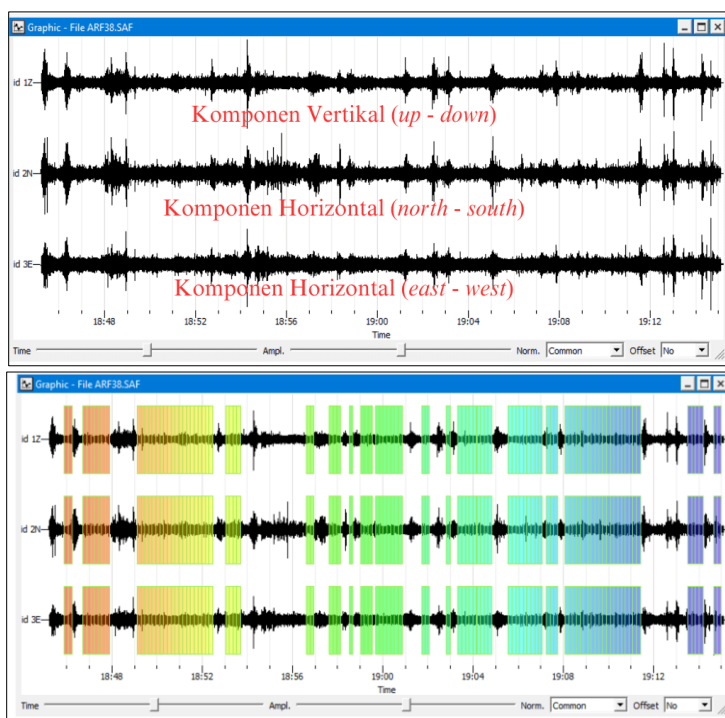
Gambar 3 Perekaman Mikrotremor Pada Titik (a) END25 (b) END27 (c) END7 (d) ARF36

Tabel 1 Tabel kriteria reliabilitas kurva HVSR (SESAME, 2004)

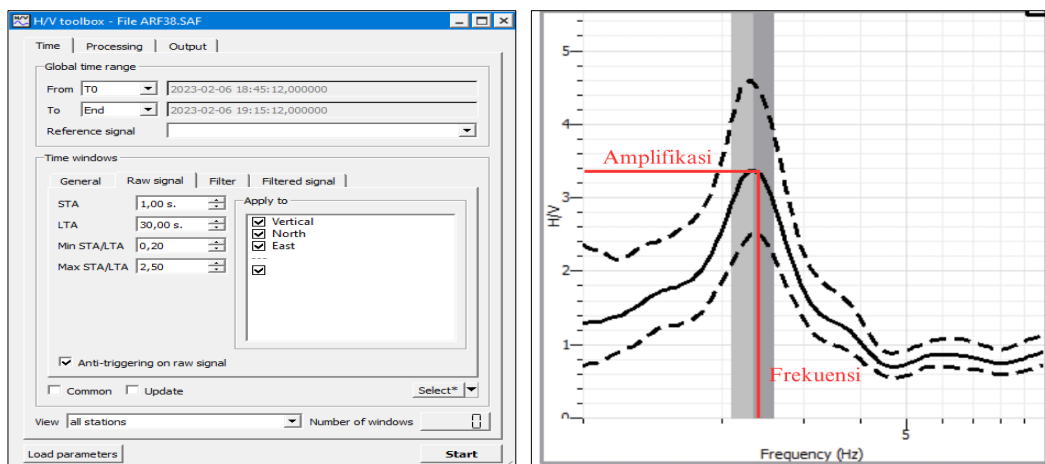
Kriteria Untuk Reliabilitas kurva HVSR
1) $f_0 > 10/I_w$
2) $N_c(f) > 200$, $n_c = I_w \cdot n_w \cdot f_n$
3) $\sigma_A(f) < 2$ untuk $0,5 f_0 < f < 2 f_0$ if $f_0 > 0,5$ Hz atau $\sigma_A(f) < 3$ untuk $0,5 f_0 < f < 2 f_0$ if $f_0 > 0,5$ Hz

Setelah proses analisis selesai, kurva HVSR akan menghasilkan nilai amplifikasi (

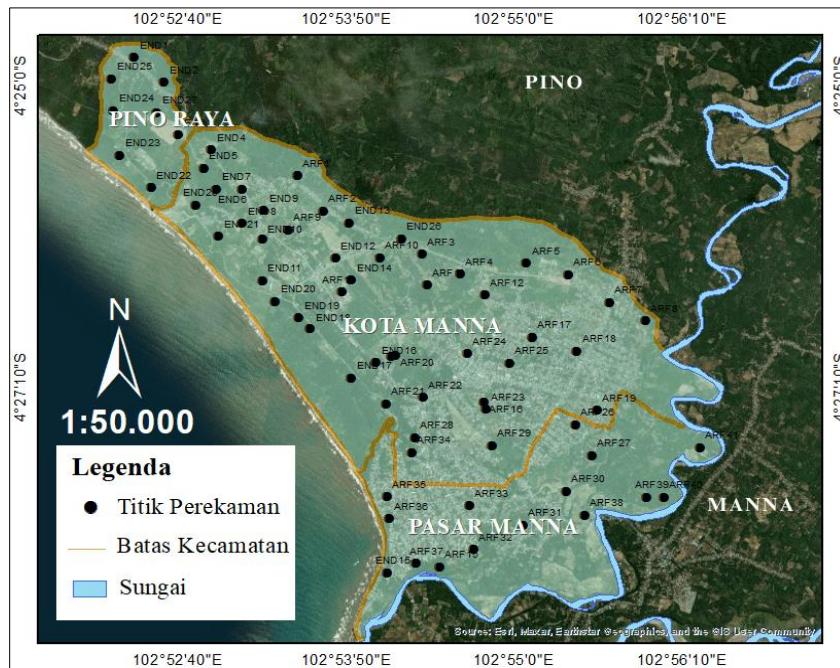
A_0) dan frekuensi natural (f_0), Ke-dua parameter ini lalu dianalisis lebih lanjut untuk memperoleh nilai indeks kerentanan seismik (K_g) dan periode dominan (T_0). Nilai periode dominan (T_0) selanjutnya digunakan untuk menentukan klasifikasi jenis tanah serta untuk menentukan jumlah lantai bangunan yang berpotensi mengalami kerusakan saat terjadi gempa bumi. Setelah semua indikator didapatkan, dilakukan interpretasi berupa pemetaan area. Bagan alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 7.



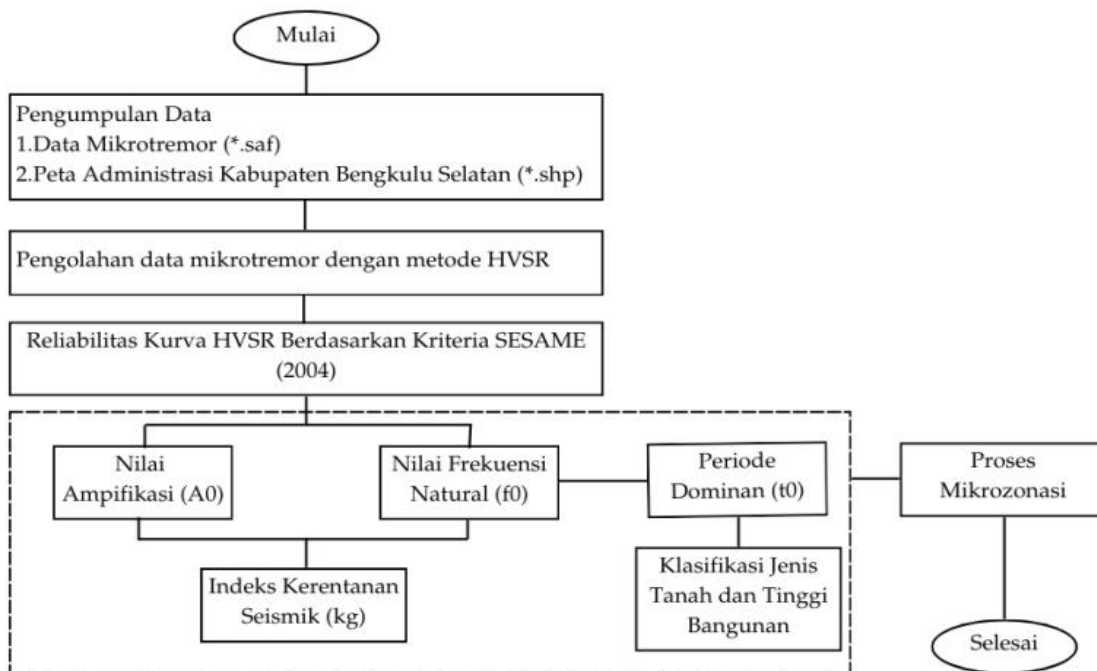
Gambar 4 Contoh Sinyal Hasil Perekaman Mikrotremor Gabungan 3 Komponen (atas). Contoh Proses *windowing* Pada Titik ARF38 Yang Diambil di Kecamatan Pasar Manna (bawah)



Gambar 5 Tool Box HVSR (kiri) dan contoh Kurva HVSR (kanan)



Gambar 6 Peta Lokasi Penelitian



Gambar 7 Bagan Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Amplifikasi (A_0)

Nilai amplifikasi yang diperoleh dari kurva HVSR diklasifikasikan menjadi 5 zona seperti yang terlihat pada tabel 2 (Tohari & Wardhana, 2018). Berdasarkan penelitian, nilai amplifikasi dari 3 kecamatan tersebut berada pada rentang 1,17 - 4,07 sehingga dapat dikatakan bahwa daerah ini termasuk dalam kategori resiko rendah terhadap guncangan seismik.

Tabel 2 Tabel klasifikasi zona kerentanan berdasarkan amplifikasi (A_0) (Tohari & Wardhana, 2018)

Zona Kerentanan	Nilai Amplifikasi
Sangat Rendah	$A_0 < 3$
Rendah	$3 \leq A_0 < 6$
Sedang	$6 \leq A_0 < 9$
Tinggi	$9 \leq A_0 < 12$
Sangat Tinggi	$A_0 > 12$

Peta sebaran nilai amplifikasi di wilayah penelitian dapat dilihat pada Gambar 8. Terlihat bahwa nilai distribusi amplifikasi wilayah penelitian memiliki amplifikasi yang sangat rendah dengan warna gradasi merah – kuning yang memiliki nilai kurang dari 3 sementara itu, dominasi warna hijau menunjukkan tingkat rendah dengan rentang 3 – 6.

Analisis Frekuensi Natural (f_0)

Frekuensi dominan (f_0) dapat mengindikasikan tingkat ketebalan sedimen lunak serta jenis batumannya, tebal lapisan sedimen berdasarkan frekuensi natural yang masuk ke dalam klasifikasi Kanai ditunjukkan pada Tabel 3 (Arifin et al., 2014).

Tabel 3 Tabel klasifikasi sedimen berdasarkan frekuensi natural (f_0) (Arifin et al., 2014)

f_0 (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
6,667 – 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>Hard sandy, gravel</i> , dll	Tebal sedimen sangat tipis, didominasi batuan keras
4,0 – 6,667	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5 meter. dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll	Ketebalan sedimen kategori menengah 5 – 10 m.
2,5 – 4,0	Batuan alluvial, dengan ketebalan > 5 m. Terdiri dari <i>sandy-gravel, sandy hard clay, loam</i> , dll	Ketebalan sedimen masuk dalam kategori tebal. 10 – 30 m
<2,5	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur dan lainnya dengan kedalaman ≥ 30 m	Ketebalan sedimen sangat tebal

Pada penelitian ini didapat nilai frekuensi natural tertinggi sebesar 14,40 Hz dan nilai terendah sebesar 0,25 Hz. Sebaran nilai frekuensi natural pada Gambar 9 menunjukkan bahwa pada wilayah penelitian didominasi oleh batuan keras dengan lapisan sedimen tipis ditunjukkan pada warna merah dengan rentang nilai

6,667 Hz- 20 Hz dan lapisan sedimen menengah ditunjukkan pada warna kuning. Lapisan sedimen yang tipis menghasilkan dampak getaran yang lebih kecil dibandingkan lapisan yang lebih tebal. Dengan demikian, wilayah penelitian dengan lapisan sedimen lunak yang tipis akan cenderung memiliki risiko kerusakan gempa yang lebih rendah dibandingkan wilayah dengan lapisan sedimen yang lebih tebal.

Analisis Indeks Kerentanan Seismik (K_g)

Indeks kerentanan seismik menggambarkan tingkat kerentanan lapisan permukaan tanah terhadap deformasi saat gempa terjadi, sehingga dapat digunakan untuk menentukan potensi kerusakan di area tertentu. Nilai indeks kerentanan seismik yang dihitung menggunakan Persamaan (1) kemudian di klasifikasikan kedalam beberapa tingkatan zona kerentanan seismik. Klasifikasi indeks kerentanan seismik (K_g) mengacu pada Akkaya (2020) yang dapat dilihat pada Tabel 4. Dari hasil analisis didapatkan indeks kerentanan seismik wilayah penelitian di dominasi oleh tingkat rendah seperti yang terlihat pada Gambar 10, dengan nilai antara 0,26 – 11,78.

Tabel 4 Tabel klasifikasi indeks kerentanan seismik (K_g) (Akkaya, 2020)

Zona Kerentanan	Indeks Kerentanan
Rendah	$K_g \leq 3$
Sedang	$3 < K_g \leq 5$
Tinggi	$5 < K_g \leq 10$
Sangat Tinggi	$K_g > 10$

Analisis Periode Dominan (T_0)

Nilai periode dominan yang diperoleh dari Persamaan (2) dapat digunakan untuk menentukan jenis tanah dan tinggi maksimum bangunan yang rentan terhadap gempa bumi. Zhao et al., (2004) pada penelitiannya mengklasifikasikan kelas situs tanah kedalam empat kelas situs dan mengkaitkannya dengan kelas situs tanah yang telah dikembangkan oleh *National Earthquake Hazard Reduction Program* (NEHPR) pada Tabel 5.

Tabel 5 Klasifikasi jenis tanah berdasarkan nilai periode dominan (T_0) (Zhao et al., 2004)

Kelas Situs NEHPR	Periode Dominan (T_0) (detik)	Kelas Situs
A + B	$T_0 < 0,2$	Batuan
C	$0,2 \leq T_0 < 0,4$	Tanah Keras
D	$0,4 \leq T_0 < 0,6$	Tanah Sedang
E	$T_0 > 0,6$	Tanah Lunak

Pada penelitian ini diperoleh nilai periode dominan paling tinggi sebesar 0,07 s - 3,86 s yang didominasi oleh lapisan batuan dan tanah keras. Berdasarkan nilai periode dominan (T_0) yang diperoleh, lokasi penelitian tidak mudah terguncang saat terjadi gempa bumi, hal ini karena lapisan batuan yang keras akan meredam getaran seismik dengan baik. Peta sebaran nilai periode dominan dapat dilihat pada Gambar 11. Untuk menentukan jumlah lantai bangunan yang rentan terhadap bencana seismik dihitung menggunakan Persamaan (3). Pada Tabel 6 menunjukkan bangunan-bangunan yang berpotensi mengalami resonansi ketika terjadi gempa bumi.

Tabel 6 Kategori kerentanan bangunan di Kabupaten Bengkulu Selatan

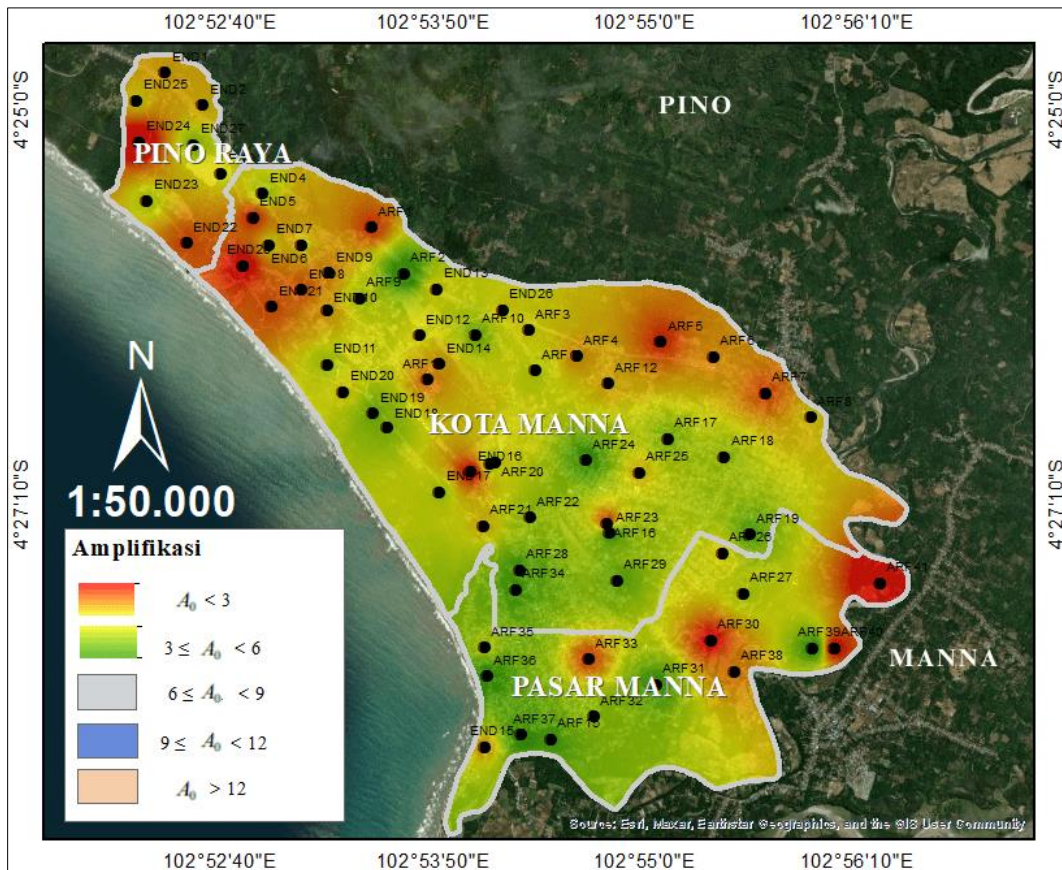
Kecamatan	Jenis Bangunan yang Rentan Terhadap Resonansi
Pino Raya	1 s/d 2 Lantai
Kota Manna	1 s/d 2 Lantai
Pasar Manna	3 s/d 4 Lantai

Pola Sebaran Parameter dan Resiko Seismik Berdasarkan Jarak Sesar

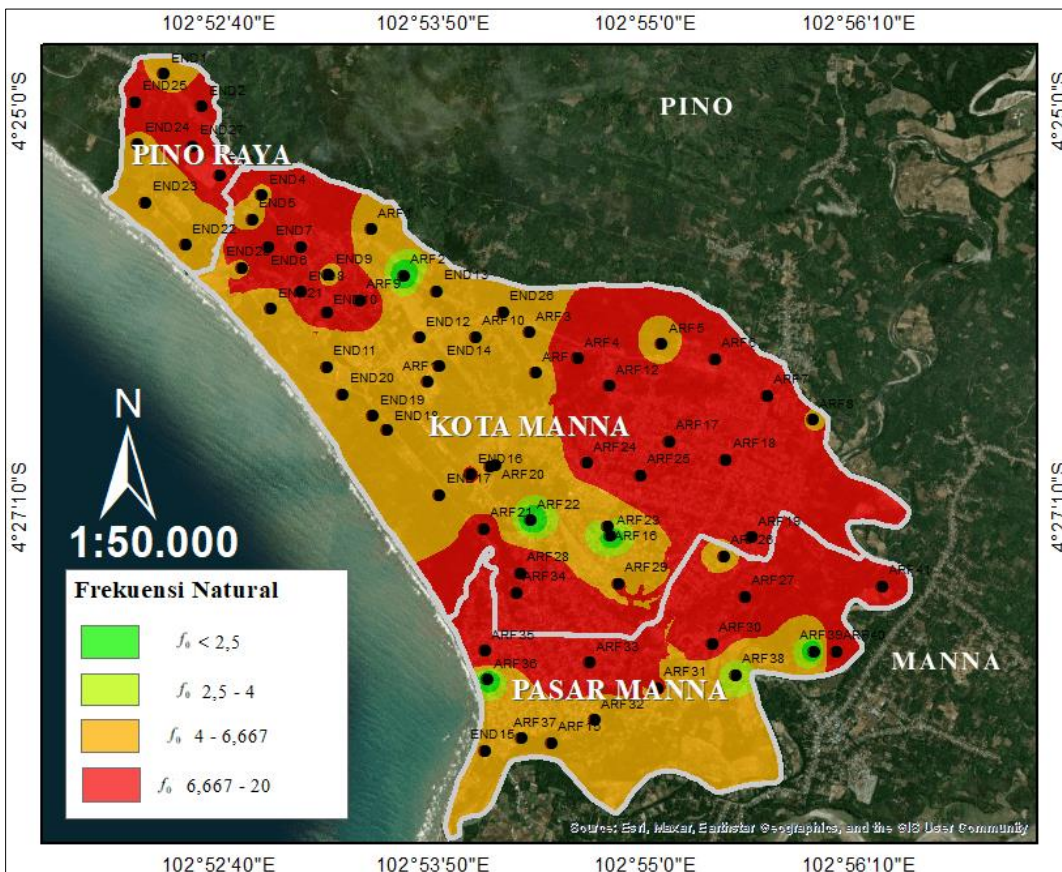
Kondisi regional Kabupaten Bengkulu Selatan terdiri atas formasi batuan di beberapa satuan geologi utama, termasuk Formasi

Seblat, yang merupakan batuan sedimen Tersier tertua di wilayah tersebut. Selain Formasi Seblat, terdapat Formasi Lemau yang terdiri dari batu lempung, batu pasir, dan konglomerat, Formasi Simpangaur yang mengandung batu pasir konglomeratan dan batulumpur, serta Formasi Bintunan yang terdiri dari batuan tufan, konglomerat polimik, dan batulempung tufan (Heryanto, 2006). Wilayah ini juga dipengaruhi oleh aktivitas vulkanik yang turut menyusun stratigrafi di Kabupaten Bengkulu Selatan. Sesar Sumatera merupakan sumber utama gempa yang terletak dekat pada lokasi penelitian. Lapisan sedimen dan batuan yang beragam di Kabupaten Bengkulu Selatan, seperti Formasi Seblat, Lemau, Simpangaur, dan Bintunan, serta batuan vulkanik, memiliki karakteristik berbeda yang memengaruhi penyebaran gelombang seismik. Karena sifat tanah dan batuan yang berbeda-beda, parameter hasil pengukuran bisa menunjukkan pola yang tidak linier dan tidak selalu mengikuti arah sesar, meskipun ada gempa besar sebelumnya.

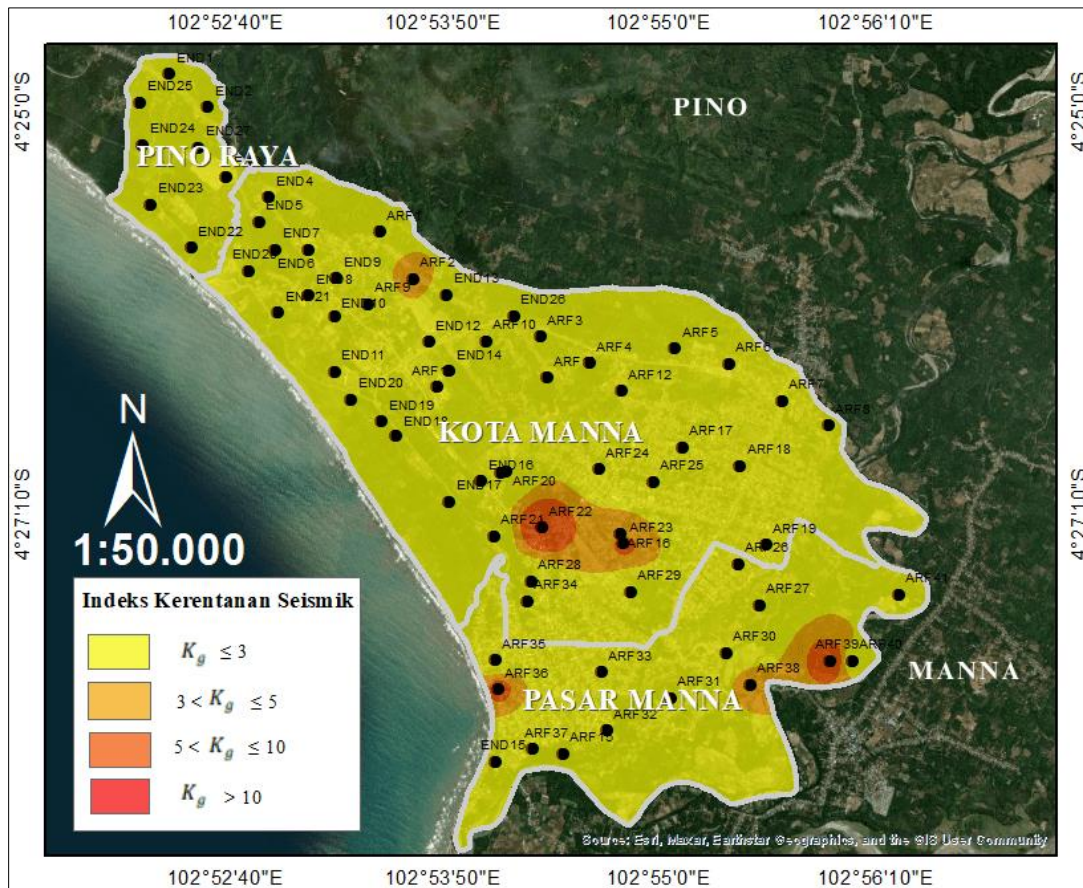
Jarak terdekat antara sesar yang teridentifikasi dan titik pengukuran berdasarkan Gambar 1 adalah 31,24 km. Pengelompokan tingkat risiko gempa dari sesar oleh Frankle et al., (2000) dibagi menjadi enam kategori, yaitu wilayah dalam radius <5 km dikategorikan sangat dekat dengan sesar, risiko gempa sangat tinggi. 5-10 km masuk kategori dekat dengan sesar, risiko gempa tinggi. 10-15 km agak dekat, risiko gempa sedang hingga tinggi. 15-20 km jarak menengah, risiko gempa sedang. 20-30 km, risiko gempa rendah dan 30-40 km jauh dari sesar, risiko gempa sangat rendah. Karena jarak titik pengukuran terdekat di lokasi studi ini adalah 30,24 km, maka lokasi penelitian masuk kategori jauh dari sesar dengan risiko gempa sangat rendah.



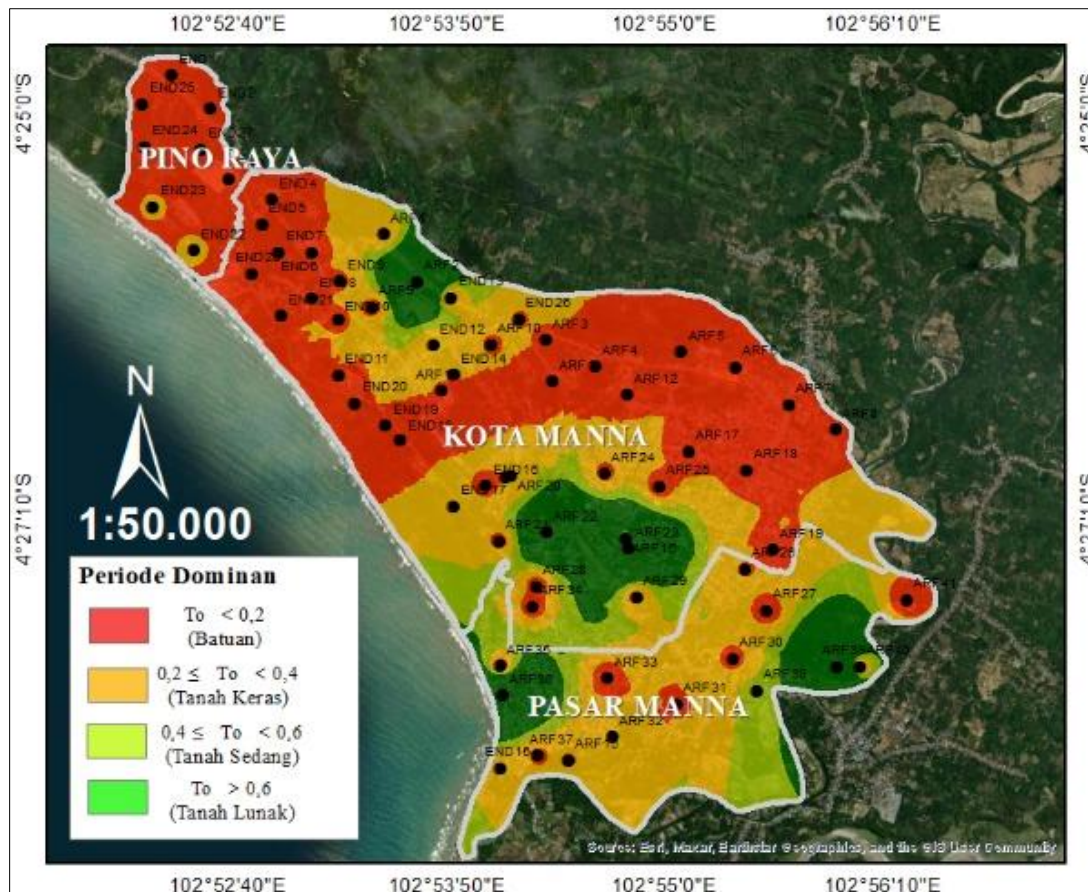
Gambar 8 Peta Sebaran Nilai Amplifikasi (A_0)



Gambar 9 Peta Sebaran Nilai Frekuensi Natural (f_0)



Gambar 10 Peta Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Seismik (K_g)



Gambar 11 Peta Sebaran Nilai Periode Dominan (T_0)

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, nilai nilai amplifikasi (A_0) dari ketiga Kecamatan berada pada rentang 1,17 – 4,07. Distribusi nilai frekuensi natural (f_0) berkisar antara 0,025 Hz – 14,40 Hz serta nilai indeks kerentanan seismik (K_g) yang rendah yaitu <5. Nilai periode dominan (T_0) paling tinggi sebesar 3,86 s dan terendah 0,07 s. Dapat ditarik kesimpulan bahwa penelitian yang meliputi tiga Kecamatan memiliki risiko rendah terhadap guncangan seismik. Hal ini dikarenakan daerah tersebut didominasi oleh batuan keras dan lapisan sedimen menengah hingga tipis, yang mengindikasikan rendahnya potensi amplifikasi getaran seismik. Selain itu, indeks kerentanan seismik juga menunjukkan bahwa mayoritas wilayah berada pada tingkat kerentanan yang rendah. Meskipun demikian, bangunan-bangunan dengan ketinggian 1 hingga 4 lantai memiliki potensi mengalami resonansi jika terjadi gempa bumi. Oleh karena itu, meski wilayah ini termasuk dalam zona risiko rendah, langkah-langkah mitigasi tetap perlu diterapkan untuk meminimalkan dampak potensial dari bencana seismik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Geotechnical Research Group Universitas Bengkulu yang telah membantu dalam proses analisis dan kepada pihak laboratorium Geofisika Universitas Bengkulu yang telah menyediakan data sebagai bahan analisis penting dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

Akkaya, I. (2020). Availability of seismic vulnerability index (K_g) in the assessment of building damage in Van, Eastern Turkey. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 19(1), 189–204. <https://doi.org/10.1007/s11803-020-0556-z>

Arifin, S. S., Mulyatno, B. S., Marjiyono, Setianegara, R., & Setianegara. (2014). Penentuan Zona Rawan Guncangan Bencana Gempa Bumi Berdasarkan

Analisis Nilai Amplifikasi HVSR Mikrotremor Dan Analisis Periode Dominan Daerah Liwa Dan Sekitarnya. *Jurnal Geofisika Eksplorasi*, 2(1), 30–40. <https://doi.org/10.23960/jge.v2i01.217>

- Edison, R., Rohadi, S., Perdana, Y., Riama, N. F., & Karnawati, D. (2021). Seismic Vulnerability Index Calculation for Mitigation Purposes at Cilacap District. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 873(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/873/1/012005>
- Edwiza, D., & Novita, S. (2008). Pemetaan Percepatan Tanah Maksimum dan Intensitas Seismik Kota Padang Menggunakan Metode Kanai. *Jurnal Teknik Unand*, 2(29).
- Farid, M., & Mase, L. Z. (2020). Implementation of seismic hazard mitigation on the basis of ground shear strain indicator for spatial plan of Bengkulu city, Indonesia. *International Journal of GEOMATE*, 18(69), 199–207. <https://doi.org/10.21660/2020.69.24759>
- Frankel, A. D., Mueller, C., Barnhard, T., Leyendecker, E., Wesson, R., Harmsen, A., Klein, F., Perkins, D., Dickman, N., Hanson, S., (2000). "USGS national seismic hazard maps". *Earthquake Spectra*, Vol. 16(1), pp. 1-19
- Hadi, A. I., Farid, M., Mase, L. Z., Refrizon, R., Purba, S. B., Fadli, D. I., & Sumanjaya, E. (2024). Zonation of Seismic Vulnerability Levels in South Bengkulu Regency, Indonesia for Disaster-Based Regional Planning. *Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik*, 39(2), 133–148. <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.2.11>
- Heryanto, R. (2006). Karakteristik Formasi Seblat di Daerah Bengkulu Selatan. *Geo-Resources JSDG*, XVI(3), 179–195.
- Inc, T. (2000). Earthquake in Indonesia. Retrieved from 15 Agustus website: <http://www.time.com/time/daily/special/photo/sumatra/>
- Indonesia, B. (2007). Kerusakan gempa Bengkulu. Retrieved from 14 September website:

- https://www.bbc.co.uk/indonesian/inpictures/story/2007/09/070914_bengkuluquake.shtml
- Jamal, R. J., Lantu, Aswad, S., & Sulaiman, C. (2017). Mikrozonasi Kawasan Rawan Bencana Gempabumi Dengan Studi Peak Ground Acceleration Menggunakan Metode Boore Atkinson Dan Data Mikrotremor Di Daerah KUPANG. *Jurnal Geocelesbes*, 1(1), 5–12. <https://doi.org/10.20956/geocelesbes.v1i1.1774>
- Januarta, G. H., Yudistira, T., Tohari, A., & Fattah, E. I. (2020). Mikrozonasi Seismik Wilayah Padalarang, Kabupaten Bandung Barat Menggunakan Metode Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSR). *RISSET Geologi Dan Pertambangan*, 30(2), 143. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2020.v30.1087>
- Kencoro, G., Farid, M., Hadi, A. I., Fadli, D. I., & Sedayu, A. (2023). Analisis Zona Rawan Gempa Bumi Di Kabupaten Bengkulu Selatan Berdasarkan Percepatan Tanah Puncak Menggunakan Formula Kanai. *Jurnal Kumparan Fisika*, 6(2), 75–82. <https://doi.org/10.33369/jkf.6.2.75-82>
- Koesuma, S., Hatmo Putera, M. A., & Darsono. (2019). A microtremor analysis for microzonation of seismic vulnerability index by using horizontal to vertical spectral ratio in the southern area of Klaten regency. *Journal of Physics: Conference Series*, 1153(1). <https://doi.org/10.1088/17426596/1153/1/012023>
- 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.2017.49.6.2017.49.6.2>
- Mase, L. Z., Sugianto, N., & Refrizon. (2021). Seismic hazard microzonation of Bengkulu City, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 8(5), 1–17. <https://doi.org/10.1186/s40677-021-00178-y>
- Misliniyati, R., Mase, L. Z., & Refrizon. (2023). Upaya Peningkatan Budaya Sadar Bencana Gempa Melalui Analisis Statistik Parameter Geofisika Di Kota Bengkulu, Indonesia. *Wikrama Parahita: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 8(1), 69–77. <https://doi.org/10.30656/jpmwp.v8i1.6891>
- Molnar, S., Sirohey, A., Assaf, J., Bard, P. Y., Castellaro, S., Cornou, C., Yong, A. (2022). A review of the microtremor horizontal-to-vertical spectral ratio (MHVSR) method. *Journal of Seismology*, 26(4), 653–685. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10062-9>
- Mustika, R., Putra, R. R., & Fitria, R. (2022). Analysis Natural Periods Of Structure Using Microtremor. *Jurnal Teknik Sipil*, 18(2), 328–342. <https://doi.org/10.28932/jts.v18i2.5027>
- Nakamura, Y. (2000). Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *The 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/228603691>
- Öziçer, S., Uyanik, O., & Timur, E. (2017). Investigation of period and resonance risk of buildings with various heights using microtremor method. *9th Congress of the Balkan Geophysical Society, BGS 2017*. <https://doi.org/10.3997/22144609.201702586>
- Refrizon, Fadli, D. I., Triutami, O., Putri, A. C. P., & Rahmawati, N. I. (2024). Microzonation Analysis in Manna City & Pasar Manna Subdistricts Utilizing Microtremor Data, South Bengkulu Regency. *Indonesian Physical Review*, 6(1), 114–123. <https://doi.org/10.29303/ipr.v7i1.252>
- Refrizon, Hadi, A. I., Lestari, K., & Oktari, T. (2013). Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Tingkat Kerentanan Seismik Daerah Ratu Agung Kota Bengkulu. *Prosiding Semirata 2013*,

- 1(1), 323–328.
- SESAME. (2004). Guidelines For The Implementation Technique On Ambient Vibrations Of The H/V Spectral Ratio Measurements, Processing And Interpretation. In *SESAME European Research Project*. Retrieved from https://sesame.geopsy.org/Delivrables/Del-D23-HV_User_Guidelines.pdf
- Siddharth, & Sinha, A. K. (2022). Rapid visual screening vulnerability assessment method of buildings: a review. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, 9(88), 326–336. <https://doi.org/10.19101/IJATEE.2021.874605>
- Stanko, D., Markušić, S., Gazdek, M., Sanković, V., Slukan, I., & Ivančić, I. (2019). Assessment of the seismic site amplification in the city of Ivanec (NW part of Croatia) using the microtremor HVSR method and equivalent-linear site response analysis. *Geosciences (Switzerland)*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences9070312>
- Supriyadi, Muttaqin, W. H., Khumaedi, K., & Sugiyanto, S. (2022). Soil Vulnerability Levels based on Microtremor Data using the HVSR method in the Old City Area of Semarang. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 6(1), 34. <https://doi.org/10.20961/jphystheorappl.v6i1.59119>
- Tohari, A., & Wardhana, D. D. (2018). Mikrozonasi Seismik Wilayah Kota Padang Berdasarkan Pengukuran Mikrotremor. *RISSET Geologi Dan Pertambangan*, 28(2), 205. <https://doi.org/10.14203/risetgeotam2018.v28.984>
- Widyawarman, D., & Fauzi, E. R. (2020). Aplikasi Mikrotremor Untuk Mikrozonasi Tingkat Potensi Bencana Gempa Bumi Di Kampus I Universitas Pgrri Yogyakarta. *Jurnal Geosaintek*, 6(2), 87. <https://doi.org/10.12962/j25023659.v6i2.6778>
- Zhao, J. X., Irikura, K., Zhang, J., Fukushima, Y., Somerville, P. G., Asano, A., Takahashi, T. (2004). Site Classification For Strong-Motion Stations In Japan Using H/V Response Spectral Ratio. *World Conference on Earthquake Engineering*.