

Pemetaan Potensi Kerentanan Gempabumi Pada Kota Bengkulu Menggunakan Data Mikrotremor dan Metode *Analytical Hierarchy Process*

Arif Ismul Hadi^{1,*}, M. Farid¹, Refrizon¹, Budi Harlianto¹, Nurul Hudayat², Malik Krisbudianto²

¹) Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Bengkulu

²) Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Kepahiang, Prov. Bengkulu

Email korespodensi : ismulhadi@unib.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.20527/flux.v18i2.9479>

Submitted: 12 November 2020; Accepted: 2 Juni 2021

ABSTRAK- Kota Bengkulu merupakan daerah yang sangat rawan terhadap ancaman gempabumi. Salah satu upaya mengurangi dampak bencana gempabumi adalah melakukan analisis potensi tersebut berdasarkan data mikrotremor dan metode pembobotan statistik. Penelitian ini bertujuan memetakan dan menganalisis daerah-daerah yang rentan mengalami ancaman bahaya gempabumi. Penelitian ini dilakukan menggunakan data sekunder dan survei lapangan. Data sekunder bersumber dari penelitian-penelitian terkait, sedangkan data survei lapangan berupa data mikrotremor menggunakan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Alat yang digunakan untuk survei lapangan berupa *broadband seismometer* PASI Gemini-2 *triaxial geophone* dengan *natural freq.* 2 Hz \pm 10%, berat 2 kg (s.n.: 12/004). Akusisi data lapangan dilakukan selama 30 menit (360.000 *samples*) per titik pengukuran dengan *sampling rate* 5 ms (200 Hz). Selanjutnya, tumpangsusun hasil pengolahan data sekunder dan lapangan menggunakan metode pembobotan statistik *Analytical Hierarchy Process* (AHP), sehingga diperoleh peta potensi kerentanan gempabumi di wilayah studi. Berdasarkan hasil analisis yang ditunjukkan dalam peta kerentanan gempabumi di daerah Kota Bengkulu dalam penelitian ini, Kecamatan Gading Cempaka, Kecamatan Singaranpati, Kecamatan Selebar, sebagian kecil Kecamatan Ratu Agung, dan Kecamatan Muara Bangkahulu adalah daerah yang mempunyai potensi kegempaan tinggi, sedangkan Kecamatan Selebar adalah daerah yang mempunyai potensi kegempaan rendah. Oleh karena itu untuk daerah berisiko tinggi perlu lebih diwaspadai dan perlu perencanaan pembangunan yang mengacu kepada standar risiko bencana.

KATA KUNCI: kerentanan; mikrotremor; AHP; HVSr; Kota Bengkulu.

ABSTRACT- Bengkulu City is an area that is very prone to earthquake threats. One of the method to reduce the impact of an earthquake disaster is to conduct a potential analysis based on microtremor data and statistical weighting methods. This study aims to map and analyze the areas have the vulnerability to experience an earthquake hazard. This study was conducted using secondary data and field surveys. Secondary data comes from related studies, while field survey data is in the form of microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr) method. The instrument used for the field survey was a broadband seismometer PASI Gemini-2 triaxial geophone with natural freq. is 2 Hz \pm 10%, weight is 2 kg (s.n. : 12/004). Field data acquisition was carried out for 30 minutes (360,000 samples) per observation point with a sampling rate of 5 ms (200 Hz). Furthermore, the overlay of the results of secondary and field data processing uses the statistical weighting method of Analytical Hierarchy Process (AHP), in order to obtain a map of potential the seismic vulnerability in the study area. Based on the results of the analysis shown in the seismic vulnerability map in the Bengkulu City area in this study, Gading Cempaka Sub-district, Singaranpati Sub-district, Selebar Sub-district, a small part of Ratu Agung Sub-district, and Muara Bangkahulu Sub-district were areas that had a high seismic vulnerability, while Selebar Sub-district were areas that had low seismic vulnerability. Therefore, high-risk areas need to be more vigilant and need development planning that refers to disaster risk standards.

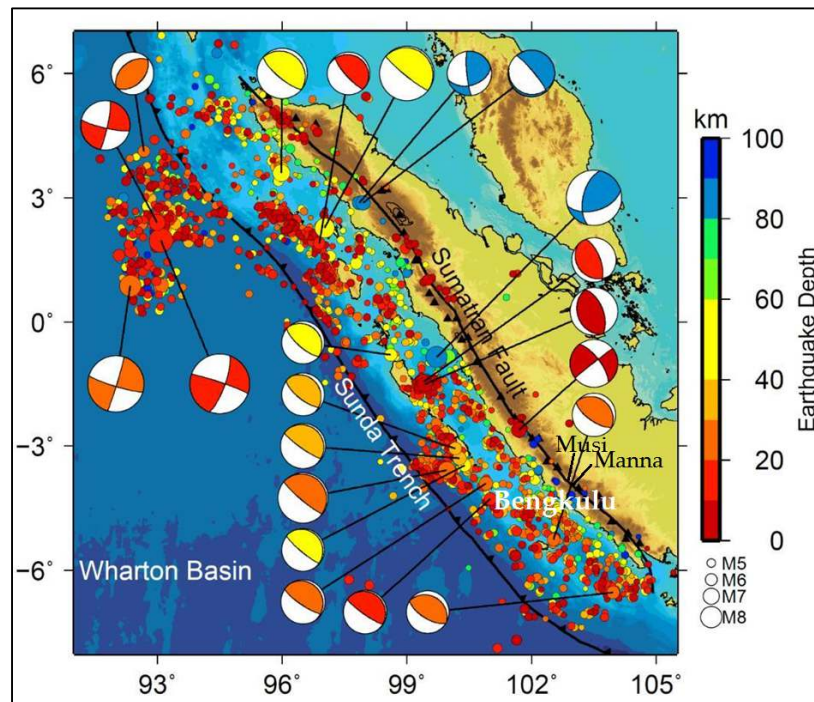
KEYWORDS : vulnerability; microtremor; AHP; HVSr; Bengkulu City.

PENDAHULUAN

Kota Bengkulu merupakan ibukota Provinsi Bengkulu yang posisinya berdekatan dengan zona subduksi antara lempeng Indo-Australia dan Eurasia. Daerah ini juga berdekatan dengan patahan besar Sumatra yaitu patahan segmen Musi dan segmen Manna (Natawidjaya & Triyoso, 2007 dan PUSGEN, 2017). Kondisi ini mengakibatkan Kota Bengkulu merupakan daerah yang sangat rentan terhadap guncangan gempa bumi (Hadi, Farid, & Fauzi, 2012), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Karena Kota Bengkulu jaraknya dekat dengan sumber gempa-gempa subduksi maupun patahan Sumatra, maka guncangan yang dihasilkan bisa berpotensi lebih tinggi. Untuk mengetahui tingkat kerawanan yang ditimbulkan akibat gempa bumi di daerah tersebut penting dilakukan karena selain berkaitan dengan tingkat kerusakan yang ditimbulkan, juga terkait dampak sosial yang ditimbulkan pasca gempa bumi serta implikasinya pada keadaan ekonomi daerah tersebut.

Sampai saat ini, pemetaan-pemetaan terkait potensi gempa bumi di daerah Bengkulu dan sekitarnya menggunakan

parameter fisis batuan telah dilakukan, antar lain: pemetaan geologi regional (Hadi, Suhendra, & Efriyadi, 2010; Hadi, Suhendra, & Manik, 2013), pemetaan kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m (V_{s30}) (Allen & Wald, 2007), pemetaan percepatan getaran tanah maksimum yaitu PGA (Petersen et. al., 2004; Irsyam et. al., 2010; Hadi, Farid, & Fauzi, 2012; Hadi & Brotopuspito, 2015). Sampai saat ini, pemetaan-pemetaan terkait potensi gempa bumi di daerah Bengkulu dan sekitarnya menggunakan parameter fisis batuan telah dilakukan, antar lain: pemetaan geologi regional (Hadi, Suhendra, & Efriyadi, 2010; Hadi, Suhendra, & Manik, 2013), pemetaan kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m (V_{s30}) (Allen & Wald, 2007), pemetaan percepatan getaran tanah maksimum yaitu PGA (Petersen et. al., 2004; Irsyam et. al., 2010; Hadi, Farid, & Fauzi, 2012; Hadi & Brotopuspito, 2015). Meskipun pemetaan terkait potensi ancaman gempa bumi telah banyak dilakukan, namun informasi tersebut masih perlu dikembangkan. Pengembangan tidak hanya menggunakan parameter tersebut mengingat hal ini juga berkaitan dengan karakteristik regangan



Gambar 1 Peta zona subduksi, seismisitas, dan keberadaan sesar Sumatra di sekitar wilayah Kota Bengkulu (modifikasi dari PUSGEN, 2017)

elastis dan ketebalan lapisan sedimen daerah penelitian yang secara umum merupakan isu utama penilaian ancaman gempabumi saat ini dan masih relatif baru untuk aplikasi di daerah Bengkulu.

Penelitian yang berkaitan dengan analisis bahaya gempabumi juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti di sekitar daerah penelitian. Misalnya Murjaya (2011) yang meneliti tentang *bucking* lempeng tektonik di sepanjang Pulau Sumatra. Menurut penelitian tersebut, energi tektonik kumulatif dan nilai *strain rate* tertinggi berada di zona sekitar wilayah Bengkulu. Dampak dari kondisi tersebut, wilayah Bengkulu mempunyai tingkat aktifitas kegempaan yang tinggi dibandingkan daerah lain di Pulau Sumatra (Megawati, Pan, & Koketsu, 2005 dan PUSGEN, 2017). Penelitian Sieh & Natawidjaya (2000), Natawidjaya & Triyoso (2007), dan PUSGEN (2017) menyebutkan bahwa pergerakan patahan Sumatra segmen Musi dan Manna mempunyai *slip rate* antara 15 – 16 mm/tahun yang lokasinya dekat Kota Bengkulu. Hal ini dapat juga memicu deformasi tanah di Kota Bengkulu bila terjadi gempa pada patahan-patahan tersebut.

PUSGEN (2017) juga melakukan kajian *peak ground acceleration* (PGA) batuan dasar di wilayah studi. Hasil studi menunjukkan bahwa nilai PGA di Kota Bengkulu adalah antara 0,25 g - 0,6 g. Daerah yang mempunyai nilai PGA tinggi berisiko tinggi terhadap ancaman bahaya gempa dan pergerakan tanah. Selanjutnya BMKG (2010) melakukan studi tentang sebaran gempa di Provinsi Bengkulu yang menyebutkan bahwa kejadian gempa antara Januari 2005 hingga Maret 2009 berpusat di Samudra Hindia dengan 133 kali gempa atau 85,80% dan sisanya 22 kali atau 14,0% terjadi di daratan. Sementara dari katalog gempa USGS tahun 1971 – 2011 menunjukkan bahwa frekuensi kejadian gempa dengan M_w antara 5,0 - 6,0 sering terjadi di Provinsi Bengkulu termasuk di Kota Bengkulu (USGS, 2012). Hal ini menunjukkan tingkat keaktifan kegempaan yang tinggi di sekitar Kota Bengkulu.

Untuk itu, perlu upaya mengantisipasi dampak bahaya gempa tersebut melalui

mitigasi bencana. Salah satu upaya mitigasi bencana adalah melakukan pemetaan dan analisis kerentanan ancaman bahaya gempabumi berdasarkan parameter fisis batuan tersebut. Pemetaan terkait dengan potensi bahaya gempabumi berhubungan dengan geologi dan sebaran kejadian gempa, kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m (V_{s30}), percepatan getaran tanah maksimum (PGA), magnitudo gempa (MMI) serta frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang berhubungan dengan regangan elastis (GSS) dan ketebalan lapisan sedimen (Anderson et. al., 1986; Daryono, 2011; Nepop & Agatova, 2008). Parameter-parameter tersebut di atas umumnya ditampilkan dalam bentuk peta hasil tumpang-susun yang secara visual mengekspresikan potensi ancaman bahaya gempabumi. Parameter fisis batuan yang dikaji dalam penelitian ini berupa kondisi geologi (V_{s30}), struktur geologi (jarak sesar ke titik pengukuran), kondisi batuan, *peak ground acceleration* (PGA), *Modified Mercalli Intensity* (MMI), GSS, dan ketebalan lapisan sedimen. Beberapa parameter tersebut juga telah digunakan untuk analisis potensi longsor (Dewi, 2017 dan Hadi, 2019). Parameter-parameter fisis tersebut kemudian ditumpang-susunkan secara menyeluruh menggunakan metode pembobotan statistik ***Analytical Hierarchy Process (AHP)***

Konsep dasar metode ini adalah menguraikan masalah multikriteria yang kompleks menjadi suatu hierarki. Hierarki merepresentasikan dari suatu permasalahan yang kompleks dalam suatu struktur multilevel yang terdiri dari tujuan, diikuti faktor kriteria, sub-kriteria, dan seterusnya hingga level terakhir dari alternatif (Russo & Camanho, 2015). Metode AHP mempunyai beberapa kelebihan di antaranya adalah proses pengambilan keputusan kuantitatif terstruktur yang dapat didokumentasikan dan direplikasi, dapat diterapkan sebagai pendukung keputusan untuk situasi yang melibatkan multi-kriteria, dapat diterapkan sebagai pendukung keputusan untuk situasi yang melibatkan penilaian subyektif, dan lain-lain (Steiguer, Duberstein, & Lopes, 2003).

Penelitian ini sangat penting dilakukan untuk mendukung mitigasi bencana dalam rangka pengurangan risiko bencana di Kota Bengkulu berdasarkan kajian-kajian yang dilakukan secara komprehensif. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan dan menganalisis daerah-daerah yang rentan mengalami ancaman bahaya gempabumi di Kota Bengkulu berdasarkan data mikrotremor dan metode AHP.

METODE PENELITIAN

Untuk memperoleh peta potensi kerentanan bahaya gempabumi Kota Bengkulu dalam penelitian ini menggunakan data sekunder dan data primer (survei lapangan).

Data Sekunder

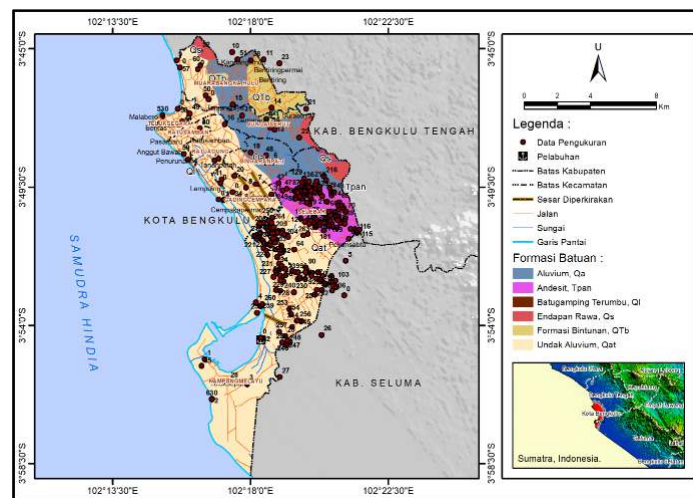
Data sekunder berupa: peta geologi yang mengekspresikan jarak sesar ke titik pengukuran dan kondisi batuan, peta sebaran V_{S30} , peta sebaran PGA, dan peta magnitudo gempa (MMI). Peta V_{S30} diperoleh dari data topografi global *United States Geological Service* (USGS) dengan memasukkan koordinat wilayah Kota Bengkulu yaitu $3,75^{\circ}$ - $3,98'$ LS dan $102,23^{\circ}$ - $102,37^{\circ}$ BT (BPS, 2018). Data V_{S30} ini digunakan untuk mengetahui kondisi geologi yang berkaitan dengan kecepatan gelombang geser rata-rata sampai kedalaman 30 m.

Jarak sesar ke titik pengukuran dan kondisi batuan dapat diketahui berdasarkan peta geologi regional *Bengkulu Quadrangle, Sumatra* dengan skala 1:250.000 dari Dinas ESDM (Gafoer, Amin, & Pardede, 2007),

seperti tampak pada Gambar 2. Sesar-sesar dan kondisi batuan tersebut yang ada di Kota Bengkulu digunakan untuk salah satu pembobotan statistik. Kondisi batuan yang digunakan untuk pembobotan tersebut berupa sifat kesolidan maupun *unconsolidated* yang dimiliki batuan tersebut.

Berdasarkan peta geologi regional, Kota Bengkulu terdapat empat lajur sesar yang diperkirakan dengan arah orientasi tenggara - baratlaut. Sesar-sesar tersebut terdapat di Kecamatan Kampung Melayu, Kecamatan Gading Cempaka, dan Kecamatan Singaranpati.

Formasi batuan pada Kota Bengkulu terdiri dari Aluvium (Qa), Andesit (Tpan), Batuapung Terumbu (Ql), Endapan Rawa (Qs), Formasi Bintunan (QTb), dan Undak Aluvium (Qat). Formasi Andesit (Tpan) dan Formasi Bintunan (QTb) merupakan formasi batuan urutan Tersier (Gafoer, Amin, & Pardede, 2007). Secara stratigrafi, formasi Andesit (Tpan) merupakan formasi batuan tertua di Kota Bengkulu yang berumur Miosen Akhir atau lebih muda. Formasi Andesit (Tpan) ditindih oleh Formasi Bintunan (QTb) yang lebih muda yaitu berumur Pliosen-Plistosen (Gafoer, Amin, & Pardede, 2007). Formasi Andesit (Tpan) terletak di sebelah tenggara dari pusat Kota Bengkulu, sedangkan formasi Bintunan (QTb) terletak di sebelah timurlaut dari pusat Kota Bengkulu. Formasi Aluvium (Qa), Batuapung Terumbu (Ql), Endapan Rawa (Qs), dan Undak Aluvium (Qat)



Gambar 2 Peta geologi regional Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu dan sebaran data pengukuran (penyederhanaan dari peta geologi Lembar Bengkulu, Sumatra oleh Gafoer, Amin, & Pardede, 2007)

termasuk dalam urutan Sedimen Kuartar. Secara stratigrafi urutan Sedimen Kuartar ini berumur Holosen. Formasi Undak Aluvium (Qat) lebih mendominasi di daerah studi, sedangkan formasi Batugamping Terumbu (Ql) hanya terdapat di sebelah selatan Muara Cemara Pantai Panjang, Teluk Segara (Gafoer, Amin, & Pardede, 2012).

PGA batuan dasar yang diperoleh dari penelitian sebelumnya oleh Hadi & Brotopuspito (2015) disederhanakan hanya untuk wilayah studi. Nilai-nilai PGA di wilayah Kota Bengkulu tersebut kemudian ditumpangsusun dengan titik titik pengukuran, sehingga nilai PGA di masing-masing titik pengukuran dapat ditentukan.

Selanjutnya untuk mendapat nilai MMI diperoleh dari hubungan antara PGA dan MMI pada masing-masing titik lokasi. Hubungan antara PGA dengan skala MMI (I_{mm}) diberikan oleh (Wald, Quitoriano, Heaton, & Kanamori, 1999):

$$I_{mm} = 3,66 \log(PGA) - 1,66. \quad (1)$$

Data Survei Lapangan

Untuk tahap survei lapangan berupa pengambilan data mikrotremor dengan metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio* (HVSr). Metode ini menyatakan perbandingan spektrum H/V fungsi frekuensi berkaitan dengan fungsi *site transfer* untuk gelombang S (Nakamura, 1989). Metode ini mempunyai kelebihan di antaranya adalah dapat mengidentifikasi respon getaran pada cekungan yang berisi material sedimen yang dikaitkan dengan GSS dan ketebalan lapisan sedimennya (Daryono, 2011; Nakamura, Saita, & Sato, 2003; dan Nakamura, 2008). Pengambilan titik pengukuran pada metode HVSr disesuaikan dengan kondisi lapangan dengan mengambil titik-titik data memotong sesar diperkirakan atau pada beberapa litologi yang berbeda. Akuisisi data mikrotremor pada penelitian ini menggunakan seperangkat alat *Broadband* Seismometer PASI Gemini-2 (*triaxial geophone*).

Pengambilan data mikrotremor mengacu kepada standar *Site Effects Assesment using Ambient Excitation* (SESAME). Menurut SESAME (2004), lamanya pengambilan data

dapat memberikan hasil yang baik apabila frekuensi dominan tempat penelitian cukup rendah. Sehingga dalam pengambilan data di lapangan diambil data selama 30 menit untuk semua lokasi penelitian.

Teknik HVSr dilakukan dengan pemilihan sinyal dalam kawasan waktu (*windowing*). Penentuan lebar *window* memiliki minimal persyaratan $I_w = 10 / f_g$, dengan I_w merupakan panjang *window* dan f_g adalah frekuensi dominannya (SESAME, 2004).

Setelah *windowing* kemudian dilakukan transformasi konversi ke dalam domain frekuensi dengan *Fast Fourier Transform* (FFT) dan dilanjutkan menghitung rasio nilai H/V yaitu spektrum komponen horizontal dan komponen vertikal (Nakamura, 2000 dan Daryono, 2011). Agar data yang dihasilkan baik perlu dilakukan proses *smoothing* data. Proses *smoothing* yang digunakan adalah dengan memilih *bandwidth* (b) yang direkomendasikan oleh Konno & Ohmachi (1998) yaitu 40.

Pengolahan data selanjutnya berupa analisis kurva HVSr. *Output* dari metode HVSr berupa nilai frekuensi dominan tanah (f_g) dan nilai amplifikasi (A_g) di masing-masing lokasi penelitian. Nilai f_g dan A_g ini digunakan sebagai parameter *input* untuk menghasilkan nilai GSS (γ) di permukaan tanah dengan menggunakan persamaan (Nakamura, Saita, & Sato, 2003 dan Nakamura, 2008):

$$\gamma = \left(\frac{A_g^2}{f_g} \right) \left(\frac{1}{\pi^2 V_b} \right) a_{max}, \quad (2)$$

dengan V_b adalah kecepatan gelombang geser di batuan batuan dasar, dan a_{max} merupakan PGA di batuan dasar yang diperoleh dari pendekatan teori probabilitas total dari *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) (Hadi & Brotopuspito, 2015).

Rekaman data mikrotremor yang diperoleh di lapangan kemudian dianalisis spektrum gelombangnya menggunakan *Software* win-MASW 5.2 HVSr dari PASI, Torino, Italy (PASI, 2013). *Software* ini adalah program paket untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan tanah dan

amplifikasinya. Penggunaan *software* ini memberikan keuntungan dalam hal perhitungan kriteria reliabilitas secara otomatis (SESAME, 2004).

Untuk memperoleh sinyal alamiah yang lebih banyak dipilih lebar *window* sejumlah 15 detik. Semakin banyak sinyal alamiah yang didapatkan maka akan semakin banyak data yang dapat dianalisis. Untuk pengolahan data, dipilih jangkauan frekuensi antara 0,5 Hz – 20 Hz. Hal ini dimaksudkan agar frekuensi yang dipilih benar-benar berasal dari sinyal alami atau bukan *noise*.

Setelah diperoleh GSS, maka langkah selanjutnya adalah menentukan ketebalan lapisan sedimen. Untuk mendapatkan ketebalan lapisan sedimen (h) yang berkaitan dengan *local site effect* diperoleh dari konsep teknik perhitungan nilai GSS pada lapisan tanah permukaan ketika terjadi gempa bumi sebagaimana dirumuskan oleh (Nakamura, Saita, & Sato, 2003 dan Nakamura, 2008):

$$h = \frac{V_s}{4f_g}, \quad (3)$$

dengan V_s adalah kecepatan gelombang geser di sedimen dan nilai V_s diperoleh dari hubungan:

$$V_s = \frac{V_b}{A_g}, \quad (4)$$

dengan $V_b \approx 600$ m/s (Nakamura, 2008).

Parameter-parameter fisis batuan di atas yang diperoleh dari data sekunder maupun data survei lapangan kemudian di-*overlay*-kan secara menyeluruh menggunakan metode AHP, sehingga potensi ancaman bahaya gempa bumi dapat dipetakan di wilayah studi. Penentuan skor total (s_j) dalam metode ini dihitung berdasarkan (Kusumadewi, Hartati, Harjoko, & Wardoyo, 2006):

$$s_j = \sum_i (s_{ij})(w_i), \quad (5)$$

dengan (s_{ij}) adalah vektor bobot yang merepresentasikan bobot relatif dari setiap alternatif ke- j pada tujuan ke- i dan (w_i) adalah bobot tujuan ke- i dari vektor bobot.

Interpetasi dan analisis peta potensi ancaman bahaya gempa bumi berdasarkan

parameter fisis batuan di Kota Bengkulu yang sudah dikorelasikan secara menyeluruh menggunakan metode AHP. Peta ancaman bahaya gempa bumi diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu tinggi (skor tertinggi), sedang (skor pertengahan), dan rendah (skor paling kecil) (BNPB, 2012). Berdasarkan peta ancaman bahaya gempa bumi ini maka dapat dibuat identifikasi dan pemetaan daerah-daerah yang berpotensi mengalami ancaman bahaya gempa bumi berdasarkan parameter fisis batuan baik yang dikategorikan tinggi, sedang maupun rendah dengan berbagai analisisnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Geologi Regional Kota Bengkulu

Peta geologi regional berguna untuk penentuan parameter kondisi tanah dan identifikasi jarak sesar ke titik-titik pengukuran dalam pembobotan statistik AHP. Pembagian kategori kelas pembobotan untuk kondisi batuan berdasarkan tingkat kesolidan. Tingkat kesolidan batuan berkaitan dengan stratigrafinya. Batuan yang posisinya berada di bawah secara umum bersifat solid, sehingga formasi batuan yang paling solid di daerah studi adalah Formasi Andesit (Tpan) disusul oleh Formasi Bintunan (QTb). Selanjutnya Urutan Sedimen Kuarter merupakan formasi batuan yang tidak solid karena terdiri dari litologi sedimen lepas (Gafoer, Amin, & Pardede, 2012).

Berdasarkan identifikasi sesar-sesar yang ada di lokasi studi diketahui bahwa jarak sesar ke titik pengukuran yang paling dekat adalah 221,7 m. Semakin dekat dengan sesar maka semakin tinggi risiko ancaman terhadap gempa. Klasifikasi pembobotan berdasarkan hasil studi Hadi (2019). Berdasarkan studi ini, jarak sesar < 1 km berisiko tinggi, jarak sesar antara 1 km - 5 km berisiko sedang, dan jarak sesar ≥ 5 km berisiko rendah.

Peta V_{s30}

Peta V_{s30} didapat dari peta V_{s30} global USGS (Allen & Wald, 2007). Resolusi per grid dari data ini adalah sekitar 1 km. Peta tersebut kemudian disederhakan hanya untuk peta V_{s30} Kota Bengkulu seperti ditunjukkan pada

Gambar 3. V_{S30} dapat digunakan sebagai parameter fisis untuk analisis gelombang seismik. V_{S30} merupakan kecepatan gelombang geser rata-rata sampai pada kedalaman 30 m (UBC, 1997).

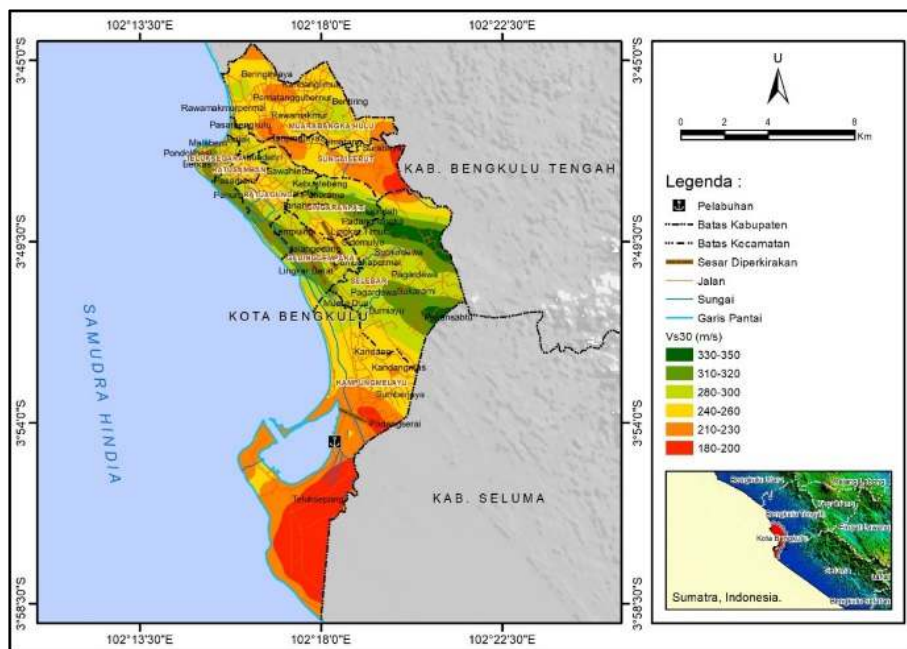
Penggunaan parameter V_{S30} didasarkan kepada dampak pengaruh gempa. Pembesaran gelombang gempa hanya ditentukan oleh lapisan-lapisan batuan sampai pada kedalaman 30 m (Wangsadinata, 2006). Pada batuan yang keras, gelombang seismik mempunyai kecepatan yang lebih besar daripada di batuan lunak. Klasifikasi jenis tanah kaitannya dengan risiko akibat gempabumi dapat ditentukan berdasarkan kecepatan gelombang gesernya yaitu $V_{S30} \leq 350$ m/s berisiko tinggi, V_{S30} antara 350 m/s hingga 750 m/s berisiko sedang, dan $V_{S30} \geq 750$ m/s berisiko rendah (SNI, 2019). Pada penelitian ini, nilai V_{S30} berada dalam jangkauan 180 m/s sampai 350 m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Kota Bengkulu masuk dalam kategori berisiko tinggi terhadap kerusakan akibat gempabumi. Klasifikasi risiko tinggi disebabkan karena batuan tersebut mempunyai nilai kecepatan gelombang geser rendah yang menunjukkan batuan tersebut bersifat lunak (SNI, 2019). Semakin lunak

suatu batuan, maka semakin berisiko tinggi terhadap kejadian gempa.

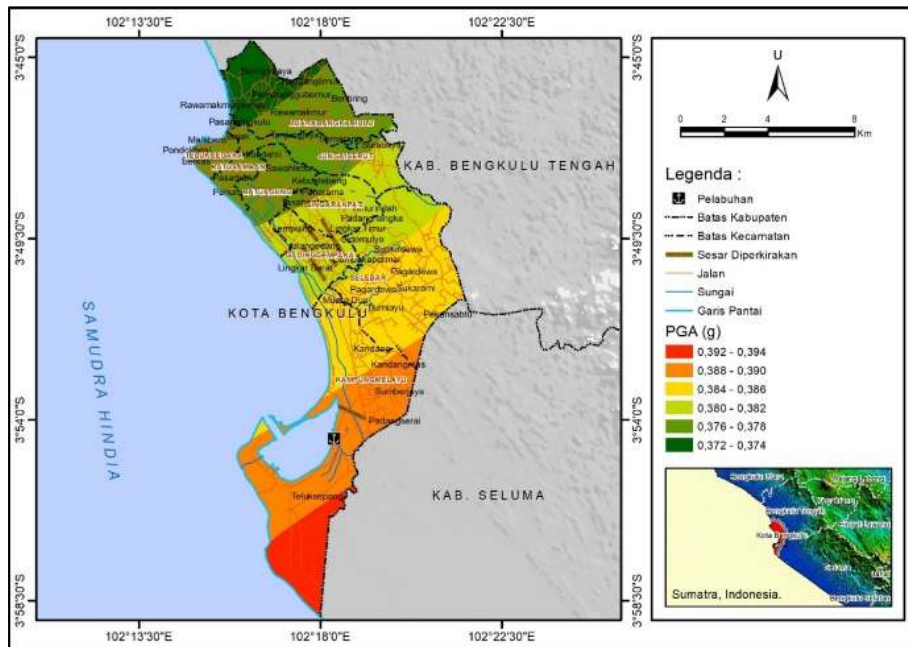
Peta Nilai PGA

Penyederhanaan peta PGA wilayah Sumatra bagian Selatan hasil studi dari Hadi & Brotopuspito (2015) dirujuk untuk mendapatkan nilai PGA pada setiap titik lokasi penelitian. Nilai PGA ini merupakan PGA batuan dasar yang diolah menggunakan pendekatan PSHA. Hasil penyederhanaan sebaran peta PGA batuan dasar di Kota Bengkulu ditampilkan pada Gambar 4.

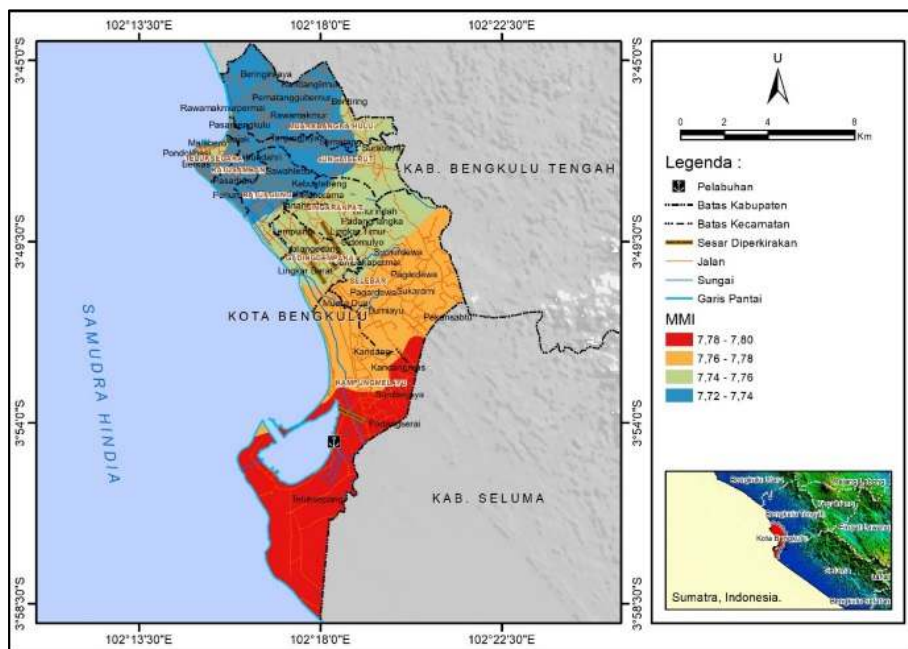
Nilai PGA yang diperoleh antara 0,372 g – 0,394 g. Jangkauan nilai PGA ini berada pada kategori ancaman bahaya gempa sedang. Menurut Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana (BNPB, 2012), kelas indeks untuk ancaman bahaya gempa adalah sebagai berikut, $PGA < 0,26$ g termasuk pada kategori rendah, $0,26 \text{ g} \geq PGA < 0,7$ g pada kategori sedang, dan $PGA \geq 0,7$ g berada pada kategori tinggi. Pembagian klasifikasi pembobotan pada studi ini mengacu kepada peraturan tersebut. Semakin tinggi nilai PGA di suatu wilayah maka semakin berisiko terhadap ancaman gempa.



Gambar 3 Peta V_{S30} di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu (penyederhaan dari Allen & Wald, 2007)



Gambar 4 Peta nilai PGA di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu (penyederhaan dari Hadi & Brotopuspito, 2015)



Gambar 5 Peta magnitudo gempa di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu

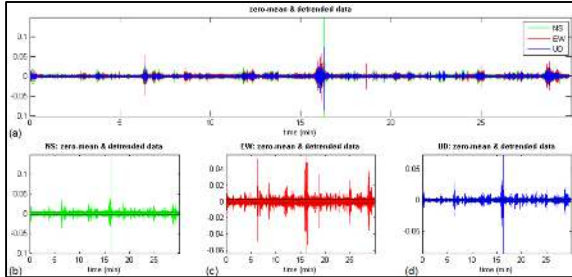
Peta Magnitudo Gempa

Nilai-nilai PGA pada masing-masing titik-titik lokasi penelitian ini dijadikan sebagai parameter *input* untuk mendapatkan nilai MMI melalui hubungan Persamaan (1). Melalui hubungan ini maka dapat diperoleh peta sebaran MMI di daerah studi sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.

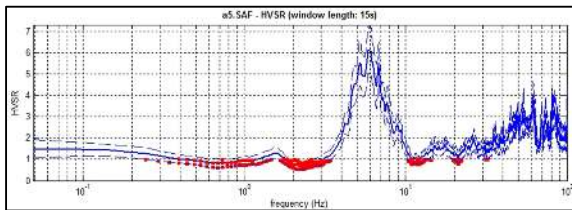
Wood & Ratliff (2011) mengklasifikasikan risiko akibat gempa dari

nilai MMI berdasarkan deskripsi dampak sosial yang ditimbulkan sebagai berikut: berisiko rendah ($MMI < 4$), sedang ($4 < MMI < 7$) dan berisiko tinggi ($MMI > 7$). Dari klasifikasi di atas, Kota Bengkulu memiliki nilai MMI antara 7,72 sampai 7,80 yang berada dalam kategori berisiko tinggi yang mengindikasikan dampak sosial yang ditimbulkan akibat gempa di Kota Bengkulu sangat besar.

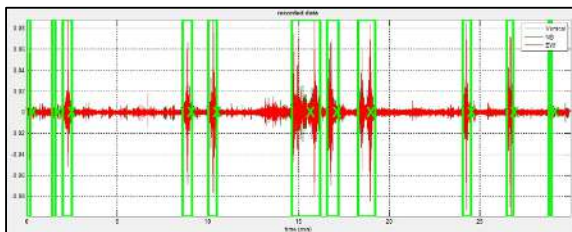
Data Survei lapangan yang berupa data mikrotremor terdiri dari 277 data pengukuran yang tersebar di Kota Bengkulu dan sekitarnya. Salah satu contoh data sinyal seismik yang dihasilkan dari data mikrotremor ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Contoh data sinyal seismik pada titik pengukuran a5. (a) sinyal seismik yang berasal dari gabungan tiga komponen, (b) sinyal seismik dari komponen utara-selatan (N-S), (c) sinyal seismik dari komponen timur-barat (E-W), dan (d) sinyal seismik dari komponen atas-bawah (U-D)



Gambar 7 Grafik frekuensi dominan (f_g) dan *peak* HVSR atau faktor amplifikasi (A_g) pada titik pengukuran a5. Sumbu x adalah frekuensi (Hz) dan sumbu y adalah faktor amplifikasinya. Pada titik pengukuran a5 ini diperoleh nilai $f_g = 6,0$ Hz ($\pm 1,5$) dan $A_g = 6,1$ ($\pm 1,2$).



Gambar 8 *Windowing* seleksi sinyal alamiah dari komponen utara-selatan (N-S), timur-barat (E-W), dan atas-bawah (U-D). Warna hijau adalah sinyal *transient* berupa data *noise* yang dibuang.

Hasil data mikrotremor berupa nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi di setiap lokasi penelitian, seperti ditampilkan pada Gambar 7, sedangkan *windowing* seleksi sinyal alamiah dari ketiga komponen

ditunjukkan pada Gambar 8. Nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi pada setiap titik pengukuran selanjutnya dijadikan parameter input untuk mendapatkan nilai GSS sesuai Persamaan (2). Untuk nilai PGA batuan dasar pada Persamaan (2) didapatkan dari hasil studi Hadi & Brotopuspito (2015), sehingga diperoleh peta sebaran nilai GSS di lokasi studi.

Peta Nilai GSS

Peta nilai GSS ditampilkan pada Gambar 9. Nilai GSS yang diperoleh berada antara $2,61 \times 10^{-5}$ hingga $1,37 \times 10^{-2}$. Klasifikasi pembobotan berdasarkan kriteria dari Ishihara (1996) dan Oliveira, Roca, & Goula (2008). Orde $10^{-6} - 10^{-5}$ memiliki nilai regangan elastis, orde $10^{-4} - 10^{-3}$ memiliki nilai regangan elastis-plastis, dan orde $\geq 10^{-2}$ memiliki nilai regangan bersifat *collapse*. Penentuan rentang nilai ini berdasarkan tingkat kejadian pada perilaku tanah. Misalnya fenomena longsor hanya terdeteksi pada rentang nilai regangan $\geq 10^{-2}$. Semakin tinggi nilai GSS maka batuan akan semakin mudah terdeformasi.

Nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi pada setiap titik pengukuran juga dapat digunakan untuk mendapatkan nilai ketebalan lapisan sedimen melalui hubungan Persamaan (3) dan (4).

Peta Ketebalan Lapisan Sedimen

Peta ketebalan lapisan sedimen dapat dilihat pada Gambar 10. Klasifikasi pembobotan didasarkan kepada ketebalan lapisan sedimen sampai kedalaman 30 m karena pembesaran gelombang gempa hanya berpengaruh sampai pada lapisan batuan hingga kedalaman 30 m (Wangsadinata, 2006). Pada studi ini, lapisan dengan ketebalan sedimen < 10 m dikategorikan berisiko rendah, ketebalan sedimen antara 10 m – 20 m berisiko sedang, dan ketebalan sedimen ≥ 20 m sampai 30 m berisiko tinggi. Secara umum semakin tebal lapisan sedimen maka semakin tinggi risiko terhadap ancaman gempa. Namun demikian dalam perencanaan bangunan tahan gempa bergantung kepada kualitas struktur yang digunakan.

Peta Potensi Kerentanan Gempabumi

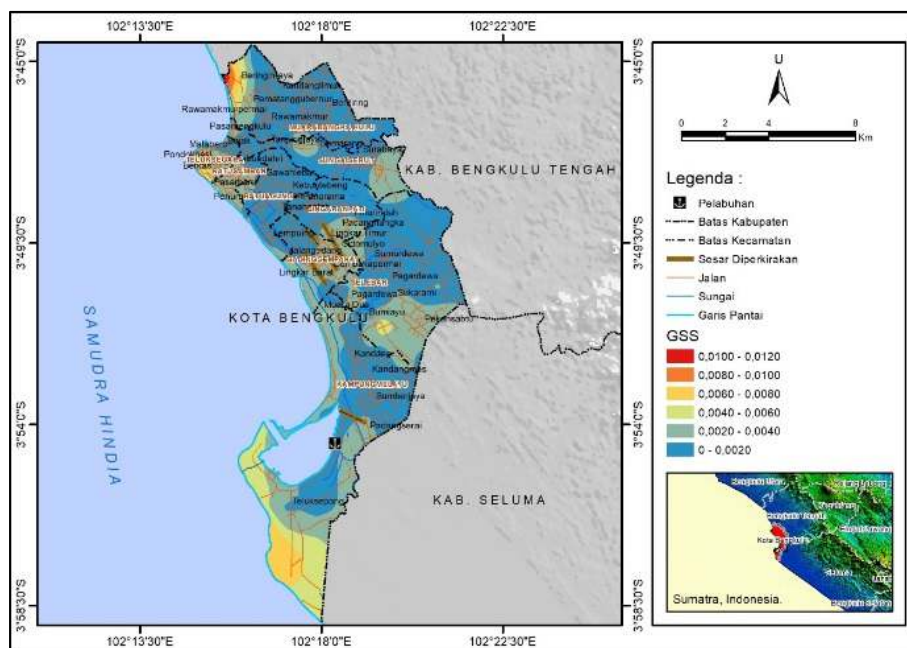
Setelah dilakukan pembobotan terhadap parameter-parameter fisis batuan berupa V_{S30} , jarak sesar ke titik pengukuran, kondisi batuan, PGA, MMI, GSS, dan ketebalan lapisan sedimen. Semua parameter-parameter fisis tersebut kemudian ditumpangsusun menggunakan metode AHP, maka diperoleh peta sebaran potensi kerentanan gempabumi di Kota Bengkulu sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 11.

Berdasarkan peta potensi kerentanan gempabumi, tingkat risiko ancaman gempabumi di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu terbagi menjadi tiga kelas yaitu risiko rendah, risiko sedang, dan risiko tinggi. Kota Bengkulu didominasi oleh ancaman gempa berisiko sedang dan hanya sebagian kecil berisiko rendah yang lokasinya di sebelah timur pusat Kota Bengkulu, sedangkan ancaman berisiko tinggi terdapat di tengah lokasi studi dan di sebelah barat laut dari pusat Kota Bengkulu.

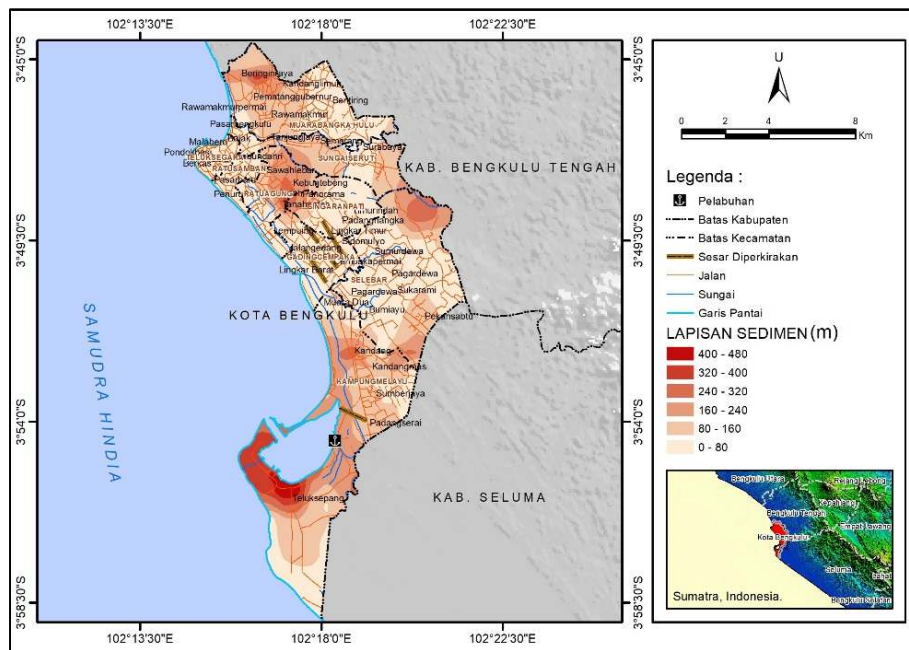
Risiko bencana merupakan hubungan antara ancaman, kerentanan, dan kapasitas yang mendukung di suatu kawasan. Sebagai upaya mengurangi risiko bencana, maka perlu meminimalkan ancaman kawasan dan

kerentanan kawasan yang terancam serta meningkatkan kapasitas kawasan yang terancam (BNPB, 2012). Untuk meminimalkan kawasan dan kerentanan kawasan yang terancam perlu menghindari daerah-daerah berisiko tinggi terhadap ancaman gempabumi atau membangun infrastruktur sesuai standar kegunaan, sedangkan peningkatan kapasitas dapat dilakukan melalui pendidikan mitigasi, kesiapsiagaan, dan melalui instrumen peringatan dini (BNPB, 2012).

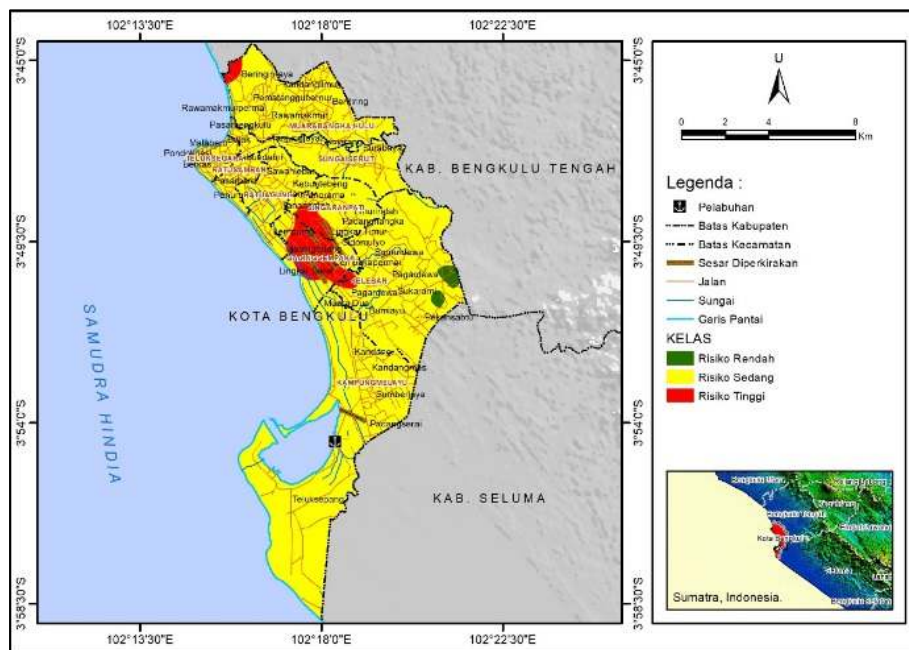
Pengaruh dominan terhadap tingginya kerentanan gempabumi di lokasi studi diduga berasal dari besarnya nilai GSS dan keberadaan sesar yang diperkirakan. Besarnya nilai GSS di lokasi studi dipengaruhi oleh ketidaksolidan batuan yang mengakibatkan tingkat kerentanan tinggi terhadap ancaman gempabumi. Berdasarkan nilai kecepatan gelombang seismiknya, batuan yang kurang solid di daerah penelitian ini terdiri dari Endapan Rawa (Qs), Undak Aluvium (Qat), dan Aluvium (Qa) (Hadi et. al., 2021). Untuk keberadaan sesar berpengaruh terhadap jarak dari titik lokasi penelitian. Kondisi-kondisi tersebut menjadikan wilayah tengah dan utara Kota Bengkulu mempunyai risiko yang relatif lebih tinggi daripada daerah lain.



Gambar 9 Peta nilai GSS di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu



Gambar 10 Peta ketebalan lapisan sedimen di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu



Gambar 11 Peta potensi kerentanan gempabumi Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu berdasarkan data mikrotremor dan metode AHP

KESIMPULAN

Hasil studi ini telah terpetakan daerah-daerah yang berpotensi mengalami kerentanan gempabumi berdasarkan data mikrotremor dan metode AHP di Kota Bengkulu, Provinsi Bengkulu. Secara umum potensi ancaman di daerah tersebut dominan berada dalam kategori risiko sedang, kemudian disusul kategori risiko tinggi dan selanjutnya kategori

risiko rendah, meskipun risiko kategori tinggi tidak dominan. Daerah berisiko tinggi terletak di Kecamatan Gading Cempaka, Kecamatan Singaranpati, Kecamatan Selebar, sebagian kecil Kecamatan Ratu Agung, dan Kecamatan Muara Bangkahulu. Daerah berisiko rendah hanya terdapat di Kecamatan Selebar dan yang lainnya berpotensi sedang. Upaya-upaya untuk meminimalisir risiko ancaman bahaya gempa

dapat dilakukan dengan menghindari daerah-daerah berisiko tinggi, membangun infrastruktur sesuai standar kegunaan, pendidikan mitigasi, kesiapsiagaan, dan melalui instrumen peringatan dini. Untuk perencanaan jangka panjang perlu dilakukan penataan ruang dan wilayah berbasis analisis risiko bencana yang lebih detail.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini terlaksana melalui dukungan dana dari "Penelitian Skim Unggulan FMIPA UNIB TA 2020" dengan Perjanjian Kontrak Penelitian Nomor: 2049/UN30.12/HK/2020 tanggal 09 Juli 2020. Untuk itu, para penulis mengucapkan terima kasih setulusnya kepada Dekan, Ketua Jurusan Fisika, Ketua Program Studi Geofisika, dan Ketua Laboratorium Fisika FMIPA Universitas Bengkulu yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Allen, T.I. & Wald, D.J. (2007). *Topographic slope as a proxy for global seismic site conditions (V_s^{30}) and amplification around the globe*. Reston, Va.: U.S. Geological Survey. <http://purl.access.gpo.gov/GPO/LPS89104>.
- Anderson, J.G., Bodin, P., Brune, J.N., Prince, J., Singh, S.K., Quaa, R., & Onate, M. (1986). Strong ground motion from the michoacan, mexico, earthquake. *Science*, 233(4768), 1043-1049. <https://doi.org/10.1126/science.233.4768.1043>.
- BMKG. (2010). *Katalog gempa 2005-2009*. Bengkulu: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- BNPB. (2012). *Peraturan kepala badan nasional penanggulangan bencana nomor 02 tahun 2012 tentang pedoman umum pengkajian risiko bencana, badan nasional penanggulangan bencana*. Jakarta: BNPB. <https://bnpb.go.id/uploads/migration/pubs/30.pdf>.
- BPS. (2018). *Kota Bengkulu dalam angka*. Bengkulu: Badan Pusat Statistik Kota Bengkulu.
- Daryono. (2011). *Indeks Kerentanan Seismik Berdasarkan Mikrotremor pada Setiap Satuan Bentuklahan di Zona Graben Bantul Daerah Istimewa Yogyakarta*. Disertasi. Universitas Gadjah Mada.
- Dewi, C. (2017). *Analisis sebaran kerawanan longsor dan arahan mitigasi dengan metode analytical hierarchy process (AHP) di Desa Kelapa Dua dan Desa Kunyi di Kecamatan Anreapi Kabupaten Polewali Mandar, Provinsi Sulawesi Barat*. Tesis. Universitas Gadjah Mada.
- Gafoer, S., Amin, T.C., & Pardede. (2007). *Geological map of Bengkulu Quadrangle, Sumatra, scale 1:250,000*. Bandung: Department of Mines and Energy, Directorate General of Geology and Mineral Resources, Geological Research and Development Centre.
- Gafoer, S., Amin, T.C., & Pardede. (2012). *Geology of the Bengkulu Quadrangle, Sumatra*. Bandung: Department of Mines and Energy, Directorate General of Geology and Mineral Resources, Geological Research and Development Centre.
- Hadi, A.I. & Brotopuspito, K.S. (2015). Pemetaan percepatan getaran tanah maksimum dengan menggunakan pendekatan *probabilistic seismic hazard analysis* (PSHA) di Kabupaten Kepahiang Provinsi Bengkulu. *J. Berkala Fisika*, 18(3), 101-112.
- Hadi, A.I. (2019). *Studi Potensi Longsor Daerah Kabupaten Kepahiang, Provinsi Bengkulu Terutama Akibat Gempabumi Menggunakan Pendekatan Parameter Elastis*. Disertasi. Universitas Gadjah Mada.
- Hadi, A.I., Farid, M., & Fauzi, Y. (2012). Pemetaan percepatan getaran tanah maksimum dan kerentanan seismik akibat gempa bumi untuk mendukung rencana tata ruang dan wilayah (RTRW) Kota Bengkulu. *J. Simetri (Jurnal Ilmu Fisika Indonesia)*, 1(2(D)), 1217-81- 1217-86.
- Hadi, A.I., Refrizon, Halauddin, Lidiawati, L., & Edo, P. (2021). Interpretasi tingkat kekerasan batuan bawah permukaan di daerah rawan gempa bumi Kota Bengkulu. *Indonesian Journal of Applied*

- Physics*, 11(1), 11-24.
- Hadi, A.I., Suhendra, & Efriyadi. (2010). Studi analisis parameter gempa Bengkulu berdasarkan data single-station dan multi-station serta pola sebarannya. *Berkala Fisika*, 13(4), 105-112.
- Hadi, A.I., Suhendra, & Manik, O.O. (2013). *Pemetaan gempabumi berdasarkan tingkat keaktifan gempa di Provinsi Bengkulu periode 1971-2011. Prosiding Semirata BKS PTN Barat*. Universitas Lampung, 269-272.
- Irsyam, M., Sengara, W., Aldiamar, F., Widiyantoro, S., Triyoso, W., Hilman, D., Kertapati, E., Meilano, I., Suhardjono, Asrurifak, M., & Ridwan, M. (2010). *Ringkasan hasil studi tim revisi peta gempa Indonesia 2010*. Bandung: Kementerian Pekerjaan Umum.
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. NY, USA: Oxford University Press.
- Konno, K., & Ohmachi, T. (1998). Ground-motion characteristics estimated from spectral ration between horizontal and vertical component of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88(1), 228-241.
- Kusumadewi, S., Hartati, S., Harjoko, A., & Wardoyo, R. (2006). *Fuzzy multi-attribute decision making (fuzzy MADM)*. Edisi Pertama. Yogyakarta: Graha Ilmu. ISBN-10: 979-756-125-x.
- Megawati, K., Pan, T-C., & Koketsu, K. (2005). Response spectral attenuation relationships for Sumatran-Subduction earthquakes and the seismic hazard implications to Singapore and Kuala Lumpur. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 25(1), 11-25. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2004.08.003>.
- Murjaya, J. (2011). *Zonasi energi tektonik daerah subduksi berdasarkan bentuk kerutan (buckling) searah busur (studi kasus: wilayah Sumatra)*. Disertasi. Universitas Gadjah Mada.
- Nakamura, Y. (1989). A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground ground surface. *Quarterly Report of Railway Technical Research Institute*, 30(1), 25-33.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear identification of fundamental idea of nakamura's technique and its application. The 12th Word Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, New Zealand.
- Nakamura, Y. (2008). *On the H/V spectrum. The 14th World Conference on Earthquake Engineering*. Beijing, China.
- Nakamura, Y., Saita, J., & Sato, T. (2003). *Development of vulnerability assessment models using microtremor/strong motion. Prepared for 6th EQTAP Workshop in Kashikojima, Japan*.
- Natawidjaya, D.H. & Triyoso, W. (2007). The Sumatran Fault Zone: From Source to Hazard. *J. of Earthquake and Tsunami*, 1(1), 21-47. <https://doi.org/10.1142/S1793431107000031>.
- Nepop, R.K. & Agatova, A.R. (2008). Estimating magnitudes of prehistoric earthquakes from landslide data: first experience in Southern Altai. *Russian Geology and Geophysics*, 49(2008), 144-151.
- Oliveira, C.S., Roca, A., & Goula, X. (2008). *Assessing and managing earthquake risk (geoscientific and engineering knowledge for earthquake risk mitigation: developments, tools, techniques)*. The Netherlands: Springer.
- PASI. (2013). *HVSR data acquisition unit GEMINI-2 user manual*. Torino, Italy: PASI.
- Petersen, M.D., Dewey, J., Hartzel, S., Mueller, C., Harmsen, S., Frankel, A.D., & Rukstales, K. (2004). Probabilistic seismic hazard analysis for Sumatra, Indonesia and across the Southern Malaysian Peninsula. *Tectonophysics*, 390(1-4), 141-158. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2004.03.026>.
- PUSGEN. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Bandung: Pusat Studi Gempa Nasional, Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Russo, R. de F.S. & Camanho, R. (2015). Criteria in AHP: a systematic review of literature.

- Procedia Computer Science*, 55(2015), 1123-1132. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.081.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the Implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation*. Brussels, Belgium: European Commission-Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESA-ME. <ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USERGUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf>.
- Sieh, K. & Natawidjaja, D.H. (2000). Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *Journal of Geophysical Research*, 105(B12), 28,295-28,326. <https://doi.org/10.1029/2000JB900120>.
- SNI. (2019). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, badan standardisasi nasional (SNI 1726:2019) sebagai revisi dari SNI 1726:2012*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Steiguer, J.E. de., Duberstein, J., & Lopes, V. (2003). *The analytic hierarchy process as a means for integrated watershed management*. Tucson: School of Renewable Natural Resources, University of Arizona.
- UBC. (1997). *Structural design requirements, uniform building code, volume 1*. Whittier, California: International Conference of Building Officials.
- USGS. (2012). *Search earthquake archives*. USA: U.S. Geological Survey. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>.
- Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H., & Kanamori, H. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified mercalli intensity in California. *J. Earthquake Spectra*, 15(3), 557-564. <https://doi.org/10.1193/1.1586058>.
- Wangsadinata, W. (2006). *Perencanaan bangunan tahan gempa berdasarkan SNI 1726-2002*. Jakarta: Short course HAKI.
- Wood, N. & Ratliff, J. (2011). *Population and business exposure to twenty scenario earthquakes in the State of Washington*. USA: U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20111016>.