



# IDENTIFIKASI DAERAH RAWAN LONGSOR SECARA MIKROZONASI DI JALAN ALTERNATIF PROVINSI MENGGUNAKAN *METODE SIMPLE ADDITIVE WEIGHTING (SAW)*

Darmawan Ikhlas Fadli<sup>1</sup>, Arif Ismul Hadi\*<sup>1</sup>, Zagita Allifya<sup>1</sup>, Septi Anggriani<sup>1</sup>, Rama Ramdani<sup>2</sup>, Beni Syakban Idris<sup>1</sup> dan Refrizon<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Geofisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Bengkulu, Bengkulu, Indonesia

\*Corresponding author: [ismulhadi@unib.ac.id](mailto:ismulhadi@unib.ac.id)

Received 2022-06-15, Revised 2023-02-19, Accepted 2023-03-16

Available Online 2023-04-05, Published Regularly April 2023

## ABSTRACT

The alternative provincial in Bengkulu Tengah Regency is located at a location bordering the Musi Fault segment that is part of the Great Sumatran Fault Zone. This condition makes cross-provincial roads in Central Bengkulu Regency vulnerable to natural disasters such as landslides. The purpose of the study was to determine areas that have the potential for landslides in earthquake-prone areas of Central Bengkulu Regency, Bengkulu Province, Indonesia. We performed the HVSR (horizontal to vertical spectral ratio) analysis and the simple additive weighting (SAW) method to achieve the study purpose. Field data acquisition using the PASI Gemini2 broadband seismometer (triaxial geophone). Next, we analyzed the tremor data recorded in the field using a wave spectrum. From the results of this study, we knew that the possibility of landslides in the survey area classified into three categories that is low, media and high. Landslide risk should be paid more attention in areas with high potential, especially in densely populated areas. The main threat in the study area is an earthquake along the active Sumatran fault. Earthquakes in areas that are very steep and prone to landslides can increase the risk and cause landslides.

Keywords: Landslide; microzonation; SAW method; alternative provincial road of Bengkulu.

## ABSTRAK

Jalan alternatif provinsi di Kabutapen Bengkulu Tengah berada di lokasi yang berbatasan dengan segmen Sesar Musi yang merupakan bagian dari *Great Sumatran Fault Zone*. Kondisi ini membuat jalan alternatif provinsi di Kabutapen Bengkulu Tengah rentan terhadap bencana alam seperti tanah longsor. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui daerah yang berpotensi terjadi longsor di daerah rawan gempa Kabupaten Bengkulu Tengah, Provinsi Bengkulu, Indonesia. Untuk mencapai tujuan ini, kami melakukan analisis HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) dan metode *simple additive weighting* (SAW). Akuisisi data lapangan menggunakan seismometer *broadband* PASI Gemini2 (*triaxial geophone*). Selanjutnya, kami menganalisis data tremor yang terekam di lapangan menggunakan spektrum gelombang. Dari hasil penelitian tersebut dapat diketahui bahwa kemungkinan terjadinya longsor di daerah survei dapat diklasifikasikan menjadi tiga kategori yaitu rendah, sedang dan tinggi. Risiko tanah longsor harus lebih diperhatikan di daerah dengan potensi tinggi, terutama di daerah padat penduduk. Ancaman utama di daerah penelitian adalah gempa bumi di sepanjang sesar aktif Sumatera. Gempa bumi di daerah yang sangat curam dan rawan longsor dapat meningkatkan risiko dan menyebabkan tanah longsor.

Kata kunci: Longsor; mikrozonasi; metode SAW; jalan alternatif Provinsi Bengkulu.

## PENDAHULUAN

Tanah longsor adalah salah satu bahaya alam yang paling berbahaya dan sering terjadi di banyak daerah perbukitan atau pegunungan, yang sering terjadi tanpa peringatan dan menyebabkan hilangnya nyawa dan harta benda. Terjadinya tanah longsor terutama tergantung pada kondisi medan setempat dan dikendalikan oleh proses geologi dan geomorfologi. Namun, tanah longsor dapat dipicu pada lereng yang tidak stabil oleh faktor-faktor eksternal seperti curah hujan yang tinggi, gempa bumi, banjir, pencairan salju, erosi sungai, perubahan permukaan air tanah, letusan gunung berapi, atau kombinasi dari faktor-faktor alam ini <sup>[1-5]</sup>.

Oleh karena itu, frekuensi, besaran, dan volume longsor diperkirakan akan meningkat baik oleh faktor internal maupun eksternal. Selain itu, frekuensi dan besarnya tanah longsor semakin meningkat karena iklim ekstrem di daerah perbukitan atau pegunungan yang rapuh. Terlepas dari kenyataan ini, banyak negara di dunia menghadapi tragedi kemanusiaan skala besar, kerusakan material, dan kerugian ekonomi akibat peristiwa tanah longsor <sup>[6-8]</sup>.

Kondisi dengan kegempaan yang tinggi di laut dan dekat dengan Sesar Sumatera Segmen Musi di darat, curah hujan yang tinggi, dan lereng yang curam membuat Kabupaten Bengkulu Tengah sangat rentan dan berpotensi longsor terutama di daerah perbukitan. Berdasarkan kondisi tersebut, sangat menarik untuk mengkaji potensi longsor di kawasan ini, karena titik rawan longsor dapat diidentifikasi melalui pemetaan potensi longsor untuk pengurangan risiko bencana. Salah satu daerah yang mengalami daerah rawan longsor di wilayah Bengkulu Tengah adalah area jalan alternatif provinsi di Kecamatan Merigi Sakti Kelindang Kabupaten Bengkulu Tengah.

Menurut Natawidjaya dan Triyoso <sup>[9]</sup>, frekuensi gempa besar berulang dengan magnitudo 7 di Sesar Segmen Musi adalah 165 tahun yang merupakan tertinggi di antara segmen Sesar Sumatera di wilayah Bengkulu. Berdasarkan kondisi tersebut, Kabupaten Bengkulu Tengah rentan terhadap gempa bumi baik di laut maupun di daratan. Rata-rata curah hujan di Kabupaten Bengkulu Tengah juga cukup tinggi yaitu 2.673 mm/tahun <sup>[10]</sup>. Hal ini dapat terjadi karena Bengkulu Tengah merupakan salah satu *The Intertropical Convergence Zone* (ITCZ) yang memiliki curah hujan tinggi sepanjang tahun <sup>[11]</sup>. Gempa bumi dan curah hujan yang tinggi merupakan faktor utama yang memicu terjadinya tanah longsor.

Selama beberapa dekade terakhir, banyak instansi pemerintah berusaha mencari solusi yang paling tepat untuk meminimalkan kerusakan yang disebabkan langsung dan tidak langsung oleh tanah longsor. Salah satu upaya yang umumnya dilakukan adalah dengan melakukan identifikasi dan pemetaan daerah rawan longsor.

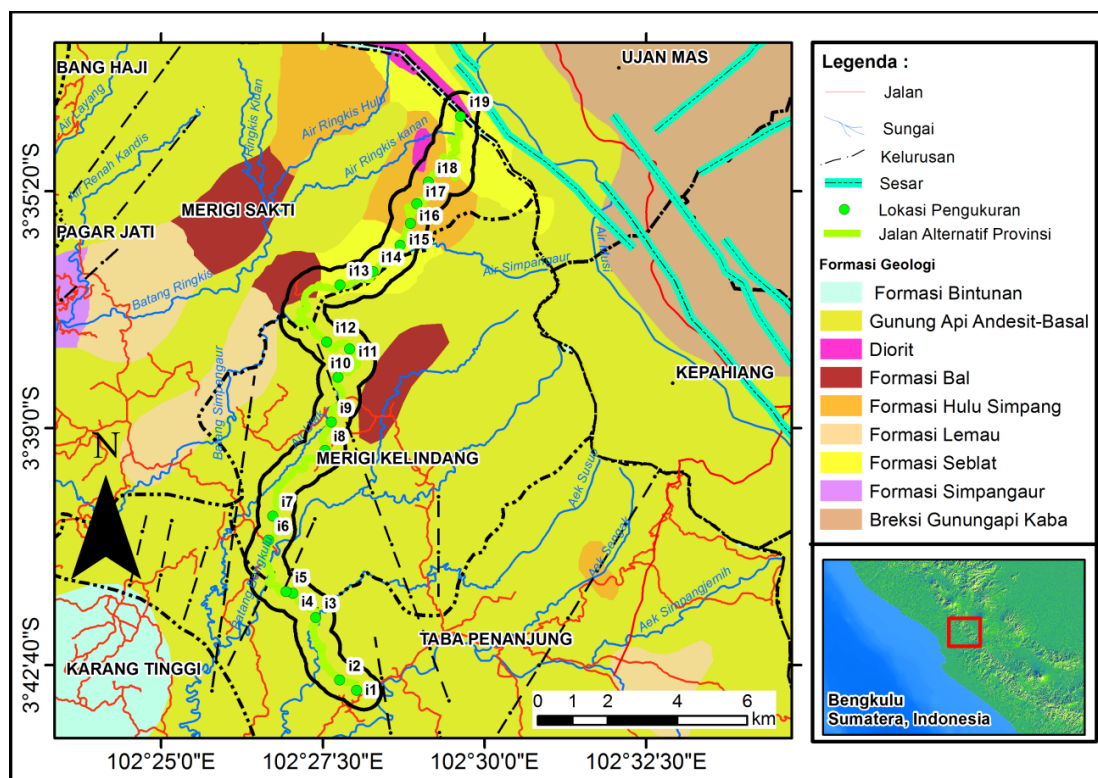
Sebelumnya daerah ini pernah dilakukan penelitian oleh Hadi dkk <sup>[12]</sup> dengan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) tentang investigasi potensi longsor untuk pengurangan risiko bencana. Akan tetapi penelitian yang dilakukan memiliki cakupan area yang sangat luas yaitu se-Kabupaten Bengkulu Tengah, sehingga perlu dilakukan penelitian secara mikrozonasi di jalan alternatif provinsi khususnya di Kecamatan Merigi Sakti Kelindang Kabupaten Bengkulu Tengah guna mendapatkan hasil potensi longsor yang lebih optimal.

Penelitian ini dilakukan dengan metode *Simple Additive Weighting* (SAW) melalui pembobotan beberapa parameter yang mempengaruhi terjadinya longsor. Oleh karena itu, model kerentanan tanah longsor dapat menunjukkan daerah-daerah di mana tanah longsor lebih mungkin terjadi di masa depan, dan selanjutnya dapat memberikan informasi yang berharga untuk perencanaan pembangunan dan manajemen serta mitigasi tanah longsor di jalur alternatif provinsi Kabupaten Bengkulu Tengah.

## METODE

Data pada penelitian ini berupa data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari survei mikrotremor berupa nilai faktor amplifikasi ( $A_g$ ), dan frekuensi dominan tanah ( $f_g$ ), serta data sekunder berupa data curah hujan tahun 2015 - 2019 dari Stasiun Klimatologi BMKG Bengkulu, peta sebaran nilai  $V_s30$  dari USGS, peta kemiringan lereng dari data DEMNAS, peta geologi yang menunjukkan jarak patahan ke titik pengukuran, dan peta PGA batuan dasar dari PUSGEN 2017. Analisis kerentanan secara teknis dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak ArcGIS 10.8.2.

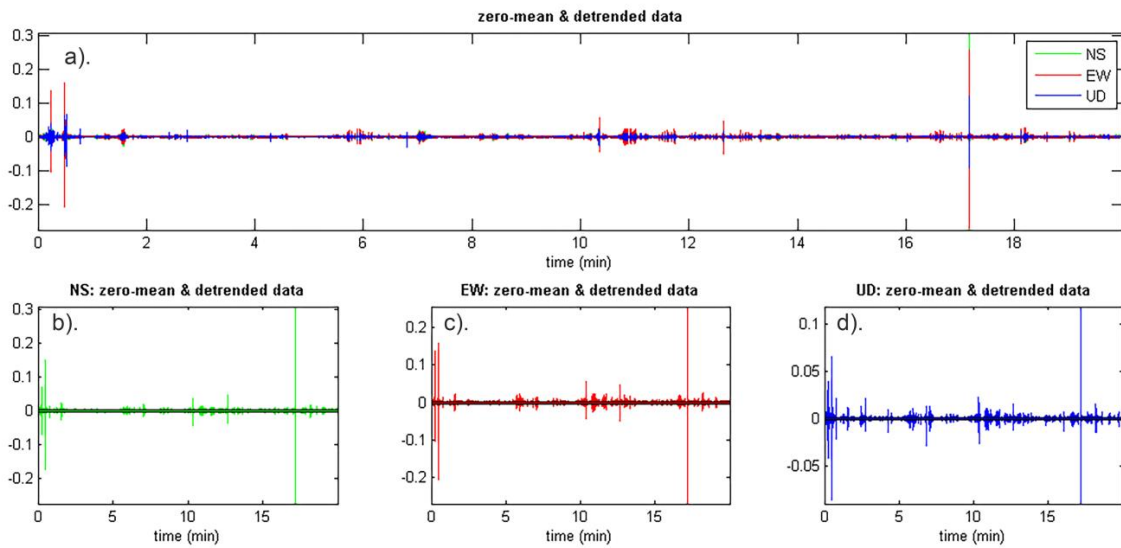
Pengambilan data mikrotremor menggunakan *portable* seismometer PASI Gemini-2 (*triaxial geophone*) sebanyak 19 titik pengukuran (Gambar 1). Pengambilan data mikrotremor merujuk pada *Site Effects Assesment using Ambient Excitation (SESAME)*. Setiap titik dilakukan pengambilan data selama 20-30 menit serta *frekuensi sampling* 200 Hz yang disimpan dalam format SAF (*Sesame ASCII Format*). Selain itu, pada saat pengumpulan data, perlu dicatat koordinat stasiun mikrotremor dan berbagai jenis gangguan yang dapat menimbulkan gangguan (*noise*) pada gelombang getaran yang terekam.



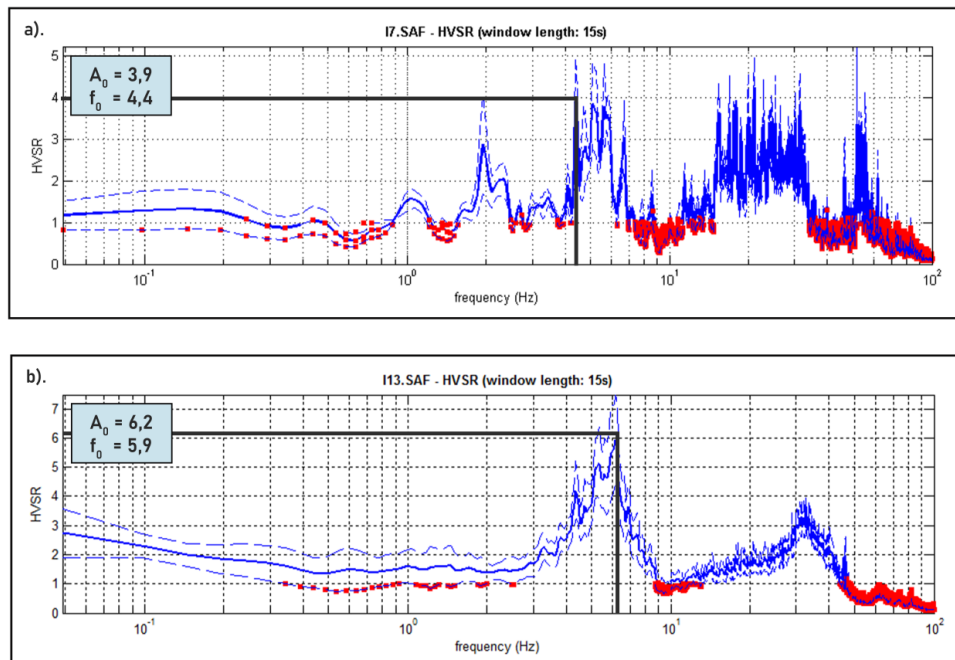
**Gambar 1.** Peta geologi serta titik-titik pengukuran data lapangan (Penyederhaan dari <sup>[13]</sup>)

Data mikrotremor yang terekam di lapangan kemudian dianalisis untuk menentukan spektrum gelombang menggunakan perangkat lunak *WinMASW 5.2 HVSR* dari PASI, Torino, Italia <sup>[14]</sup>. Perangkat lunak ini merupakan paket program untuk mendapatkan nilai frekuensi natural dan faktor amplifikasi, penggunaan *software* ini menawarkan keuntungan dalam hal perhitungan otomatis kriteria reliabilitas <sup>[15]</sup>. Lebar jendela 15 detik dipilih untuk sinyal yang lebih alami. Semakin alami sinyal, semakin banyak data yang dapat dianalisis. Untuk pengolahan data, rentang frekuensi yang dipilih adalah 0,5 Hz sampai 20 Hz. Oleh karena itu, frekuensi yang dipilih sebenarnya dari sinyal natural atau bukan dari *noise*. Rekaman data mikrotremor terdiri dari komponen arah Utara-Selatan (NS), komponen arah Timur-Barat (EW), dan komponen arah vertikal berupa *Up-down* (UD). Contoh sinyal rekaman mikrotremor

yang diperoleh di lapangan dapat dilihat pada Gambar 2. Adapun contoh spektrum hasil pengolahan data untuk mendapatkan nilai  $f_g$  dan  $A_g$  pada titik data pengukuran lapangan ditampilkan pada Gambar 3.



**Gambar 2.** Contoh sinyal rekaman mikrotremor yang diperoleh di lapangan: (a) rekaman mikrotremor gabungan tiga komponen NS, EW, dan UD; (b) perekaman mikrotremor komponen NS; (c) perekaman mikrotremor komponen EW; (d) perekaman mikrotremor komponen UD



**Gambar 3.** Contoh spektrum hasil pengolahan data untuk mendapatkan nilai  $f_g$  dan  $A_g$  pada titik data dengan frekuensi dominan dan amplifikasi berturut-turut: (a) I7 pada (4,4 Hz dan 3,9); (b) I13 pada (6,2 Hz dan 5,9)

PGA batuan dasar diperoleh dari hubungan perubahan kecepatan gelombang geser pada batuan dasar terhadap waktu, perhitungan nilai PGA batuan dasar menggunakan metode *Probabilistic Seismic Hazard Analysis* (PSHA). Perhitungan nilai PGA berasal dari pengaruh

subduksi, sesar, dan sumber *background* gempa *shallow* dan *deep* <sup>[16]</sup>. Dalam bentuk umum, teorema probabilitas total dirumuskan sebagai berikut <sup>[17]</sup>:

$$P[Y > y^*] = \iint P[Y > y^* | m, r] f_m(m) f_R(r) dm dr \tag{1}$$

Nilai PGA batuan dasar digunakan sebagai parameter masukan untuk menghasilkan nilai *Ground Shear Strain* ( $\gamma$ ), yang dirumuskan sebagai berikut <sup>[18-19]</sup>:

$$\gamma = \left( \frac{A_g^2}{f_g} \right) \left( \frac{1}{\pi^2 V_b} \right) \tag{2}$$

dimana  $A_g$  adalah faktor amplifikasi,  $f_g$  adalah frekuensi dominan tanah (Hz),  $a_{max}$  adalah PGA pada batuan dasar (gal), dan  $V_b$  adalah kecepatan gelombang geser pada batuan dasar yang nilainya 600 m/s.

Nilai PGA permukaan tanah menggunakan data gempabumi tahun 1922 – 2022 dari USGS berupa magnitude ( $m$ ), jarak hiposenter ( $r$ ) dan dihitung dengan menggunakan metode Kanai dimana pada metode ini tidak hanya perhitungan rumus, tetapi juga data dari pengamatan lapangan, rumus empiris percepatan getaran tanah di permukaan dirumuskan sebagai berikut <sup>[20]</sup>:

$$\alpha = \frac{5}{\sqrt{T_g}} 10^{(0,61 M) - (1,66 + \frac{3,60}{R} R + 0,167 - \frac{1,83}{R})} \tag{3}$$

dimana  $\alpha$  merupakan nilai akselerasi getaran tanah maksimum pada titik pengukuran (gal),  $T_g$  merupakan frekuensi natural tanah (Hz),  $M$  merupakan magnitudo gempabumi ( $M_w$ ), serta  $R$  merupakan hiposenter ke stasiun pengukuran (Km). Langkah selanjutnya merupakan menghitung jarak *epicenter* ( $\Delta$ ) dan *hypocenter* ( $R$ ). Jarak *epicenter* dan *hypocenter* bisa diperoleh menggunakan persamaan berikut <sup>[21]</sup>:

$$\Delta = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \tag{4}$$

$$R = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \tag{5}$$

dimana  $X_1$  adalah garis lintang *epicenter* gempa,  $X_2$  adalah garis lintang pengamatan,  $Y_1$  adalah garis bujur *epicenter* gempa,  $Y_2$  adalah garis bujur pengamatan, dan  $h$  adalah kedalaman sumber gempa (km).

Konsep dasar metode SAW adalah mencari bobot total penilaian kinerja setiap opsi dari semua kriteria. Metode SAW membutuhkan proses untuk menormalkan matriks keputusan ( $X$ ) ke skala yang proporsional terhadap semua alternatif skor yang tersedia, yaitu <sup>[22]</sup>:

$$r_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}^i} & , \text{jika } j \text{ adalah nilai terbesar} \\ \frac{\min x_{ij}^i}{x_{ij}} & , \text{jika } j \text{ adalah nilai terkecil} \end{cases} \tag{6}$$

dimana  $r_{ij}$  merupakan rating kinerja ternormalisasi berdasarkan alternatif  $A_i$  dalam atribut  $C_j$ , dimana  $i = 1, 2, \dots, m$  dan  $j = 1, 2, \dots, n$ . Nilai preferensi untuk setiap alternatif ( $V_i$ ) diberikan sebagai berikut <sup>[23]</sup>:

$$V_i = \sum_j^n w_j r_{ij} \tag{7}$$

Nilai ( $V_i$ ) yang lebih besar mengindikasikan bahwa alternatif ( $A_i$ ) lebih terpilih. Untuk menentukan pembobotan diberikan indikator bobot kriteria dan peringkat kinerja setiap parameter. Indikator GSS, curah hujan, jarak dari sesar, PGA,  $V_s30$  dan kemiringan lereng dapat dilihat pada Tabel 1.

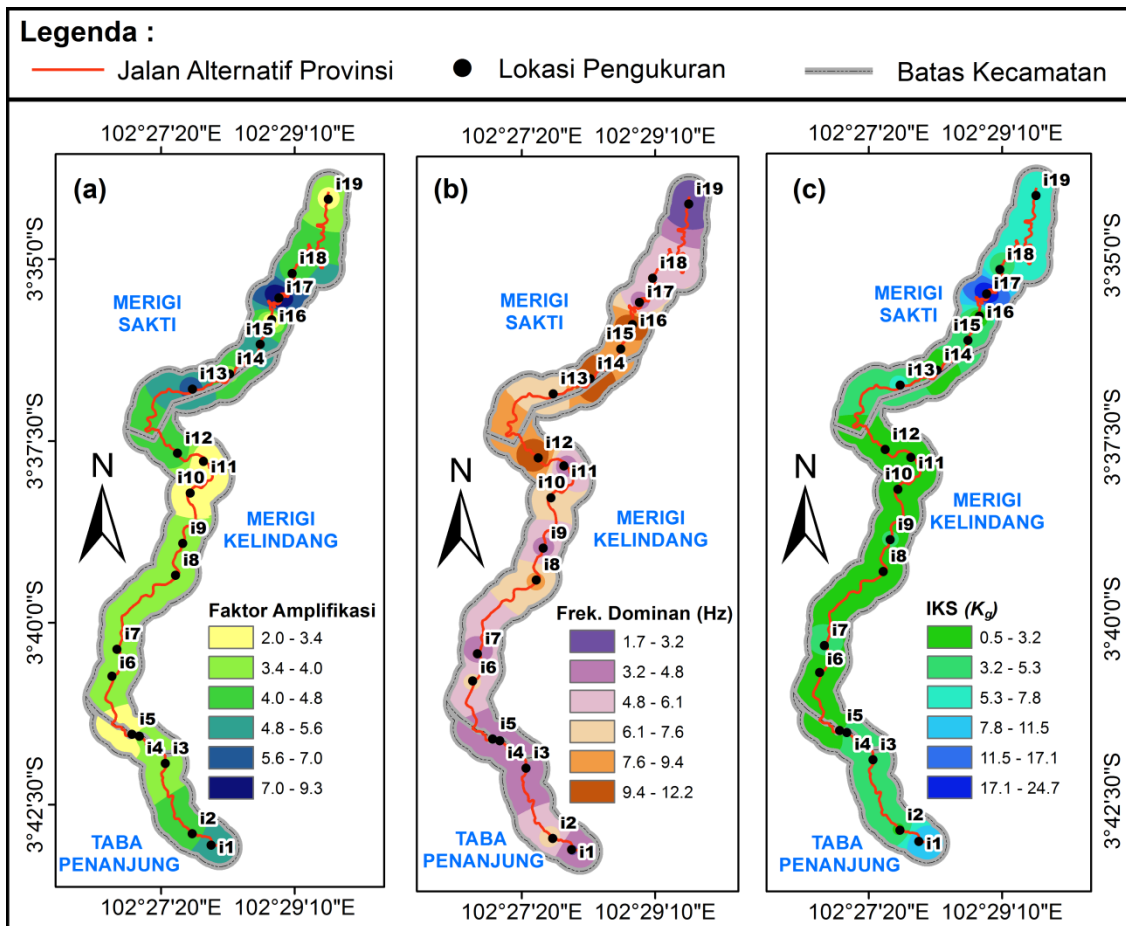
**Tabel 1.** Indikator bobot kriteria dan peringkat kinerja setiap parameter <sup>[24]</sup>

| Indikator                        | Bobot Kriteria | Tingkat Kerentanan | Kelas Indeks   | Peringkat Kinerja |
|----------------------------------|----------------|--------------------|--|-------------------|
| <i>Ground Shear Strain</i> (GSS) | 5              | Tinggi             | $GSS \geq 0,01$  | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $0,0001 \leq GSS \leq 0,01$  | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | $GSS \leq 0,0001$  | 1                 |
| Curah Hujan (mm/tahun)           | 3              | Tinggi             | Curah hujan $\geq 2500$ mm/tahun   | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $1000 \text{ mm / Tahun} \leq \text{Curah hujan} \leq 2500 \text{ mm/tahun}$ | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | Curah Hujan $\leq 1000$ mm/tahun   | 1                 |
| PGA (g)                          | 2              | Tinggi             | $PGA > 0,7 \text{ g}$  | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $0,26 \text{ g} < PGA < 0,7 \text{ g}$                                       | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | $PGA < 0,26 \text{ g}$   | 1                 |
| $V_s30$ (m/s)                    | 4              | Tinggi             | $V_s30 \leq 350 \text{ m/s}$   | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $350 \text{ m/s} \leq V_s30 \leq 750 \text{ m/s}$                            | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | $V_s30 \geq 750 \text{ m/s}$   | 1                 |
| Kemiringan Lereng ( $^\circ$ )   | 3              | Tinggi             | Lereng $> 40^\circ$  | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $25^\circ < \text{lereng} < 40^\circ$  | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | lereng $< 25^\circ$  | 1                 |
| Jarak dari Sesar (km)            | 3              | Tinggi             | Jarak dari Sesar $\geq 1 \text{ km}$   | 3                 |
|                                  |                | Sedang             | $1 \text{ km} \leq \text{Jarak dari Sesar} \leq 5 \text{ km}$                | 2                 |
|                                  |                | Rendah             | Jarak dari Sesar $\leq 5 \text{ km}$   | 1                 |

Interpretasi dan analisis peta potensi longsor berdasarkan penilaian kinerja indeks bobot preferensi dan setiap parameter daerah studi (GSS, curah hujan, PGA, jarak dari sesar,  $V_s30$  dan kemiringan lereng), yang sepenuhnya berkorelasi dengan metode SAW. Peta dengan potensi longsor terbagi dalam tiga kategori: tinggi (skor tertinggi), sedang (skor sedang), dan rendah (skor terendah) <sup>[25]</sup>. Berdasarkan peta potensi longsor tersebut, identifikasi dan pemetaan wilayah potensi longsor dikategorikan tinggi, sedang, dan rendah dengan berbagai analisis.

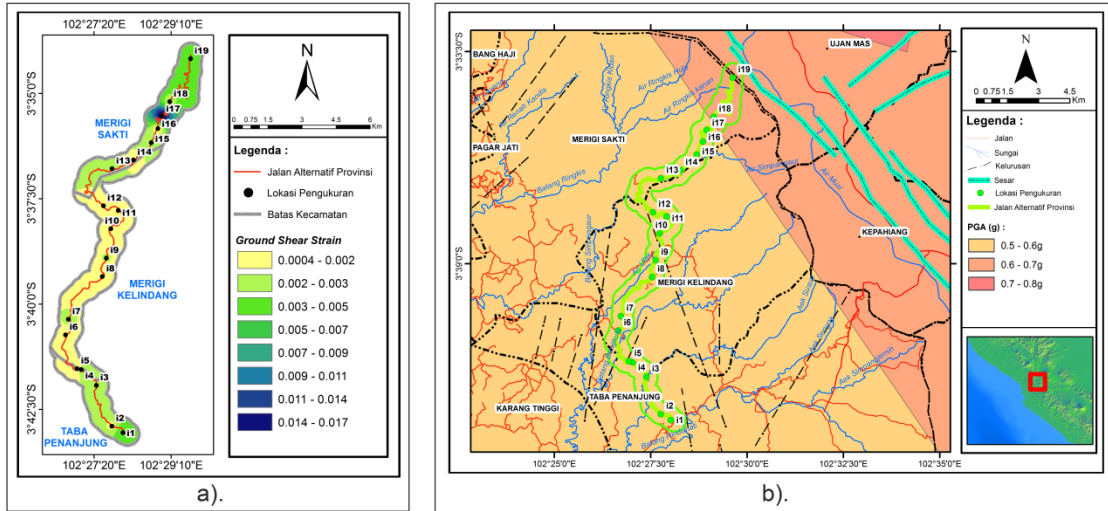
## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai faktor amplifikasi antara 2,0 sampai dengan 9,3 (Gambar 4a) dan nilai frekuensi natural antara 1,7 Hz sampai dengan 12.2 Hz (Gambar 4b). Kemudian nilai faktor amplifikasi dibagi dengan nilai frekuensi dominan masing-masing titik sehingga diperoleh nilai *seismic vulnerability index* pada wilayah penelitian. Hasil perhitungan nilai *seismic vulnerability index* berkisar antara 0,5 – 24,7 yang ditampilkan pada Gambar 4c.

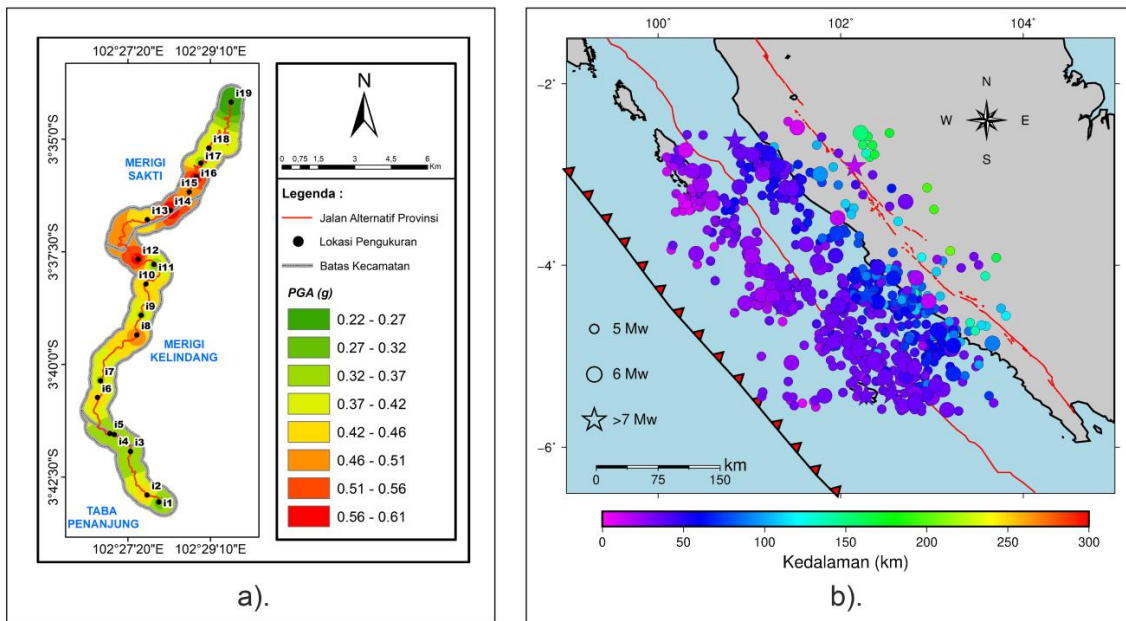


**Gambar 4.** Peta hasil pengolahan data mikrotremor pada setiap titik pengukuran data dilapangan: (a) Peta Faktor Amplifikasi, (b) Peta Frekuensi Dominan (Hz), (c) Peta Indeks Kerentanan Seismik

Sebaran indeks kerentanan seismik menunjukkan bahwa bagian selatan dan utara daerah penelitian memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan daerah seberangnya. Semakin tinggi indeks kerentanan seismik, semakin tinggi pula risiko bahaya gempa berdasarkan frekuensi alami dan faktor amplifikasinya. Data yang diperoleh dari lapangan adalah frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan PGA batuan dasar sebagai masukan untuk mendapatkan nilai GSS pada setiap titik pengukuran. Gambar 5 menunjukkan nilai sebaran GSS dan PGA batuan dasar di lokasi penelitian. Peta sebaran GSS menunjukkan bahwa rentang nilai GSS berada pada orde  $10^{-3}$  dan  $10^{-2}$  yang merupakan nilai regangan geser sedang sampai tinggi. Besarnya nilai GSS di wilayah studi lebih dominan dipengaruhi oleh besarnya nilai PGA pada batuan dasar. Klasifikasi pembobotan didasarkan pada kisaran nilai GSS, dimana nilai terendah  $< 10^{-4}$ , sedang  $10^{-4}$ - $10^{-3}$ , dan tinggi  $10^{-2}$ - $10^{-1}$  [26-27].



**Gambar 5.** (a) Peta distribusi nilai *Ground Shear Strain*, dan (b) Peta PGA batuan dasar pada lokasi penelitian (dimodifikasi dari PUSGEN 2017 [28])

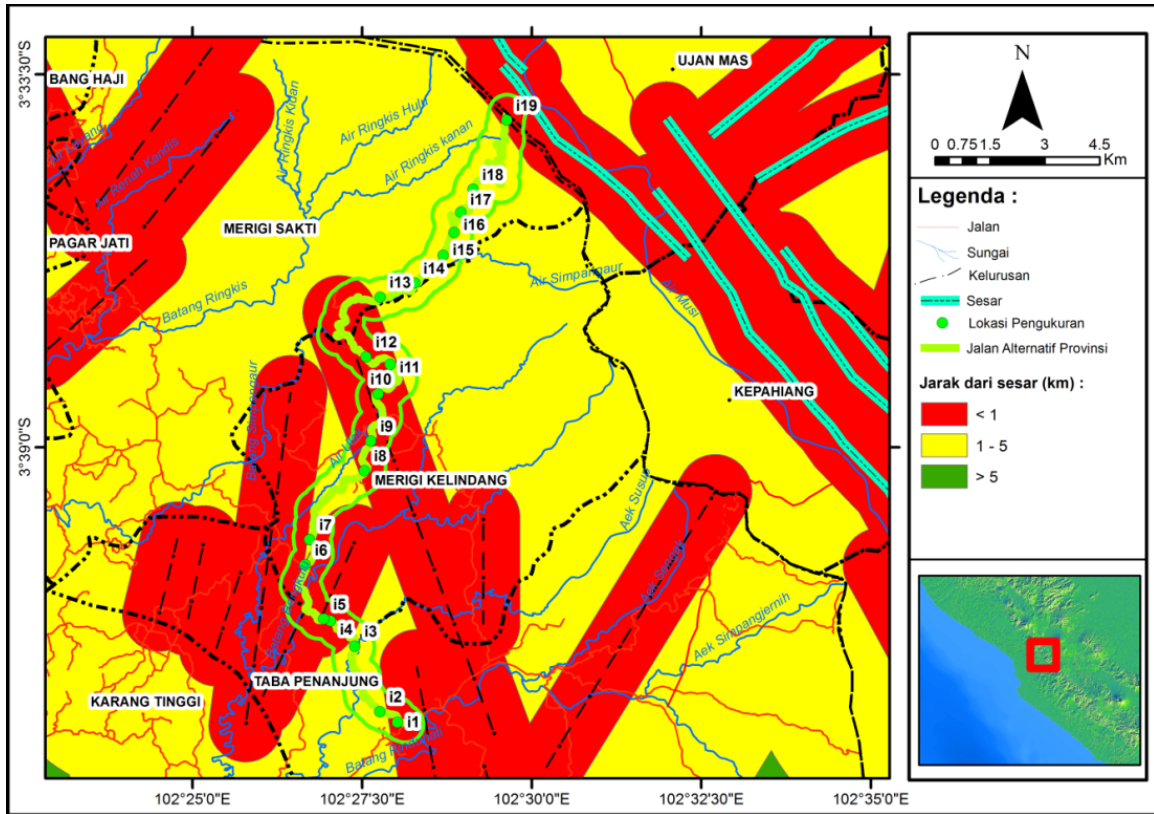


**Gambar 6.** (a) Peta PGA Permukaan menggunakan persamaan Kanai, dan (b) Peta seismisitas gempabumi pada daerah penelitian dari USGS

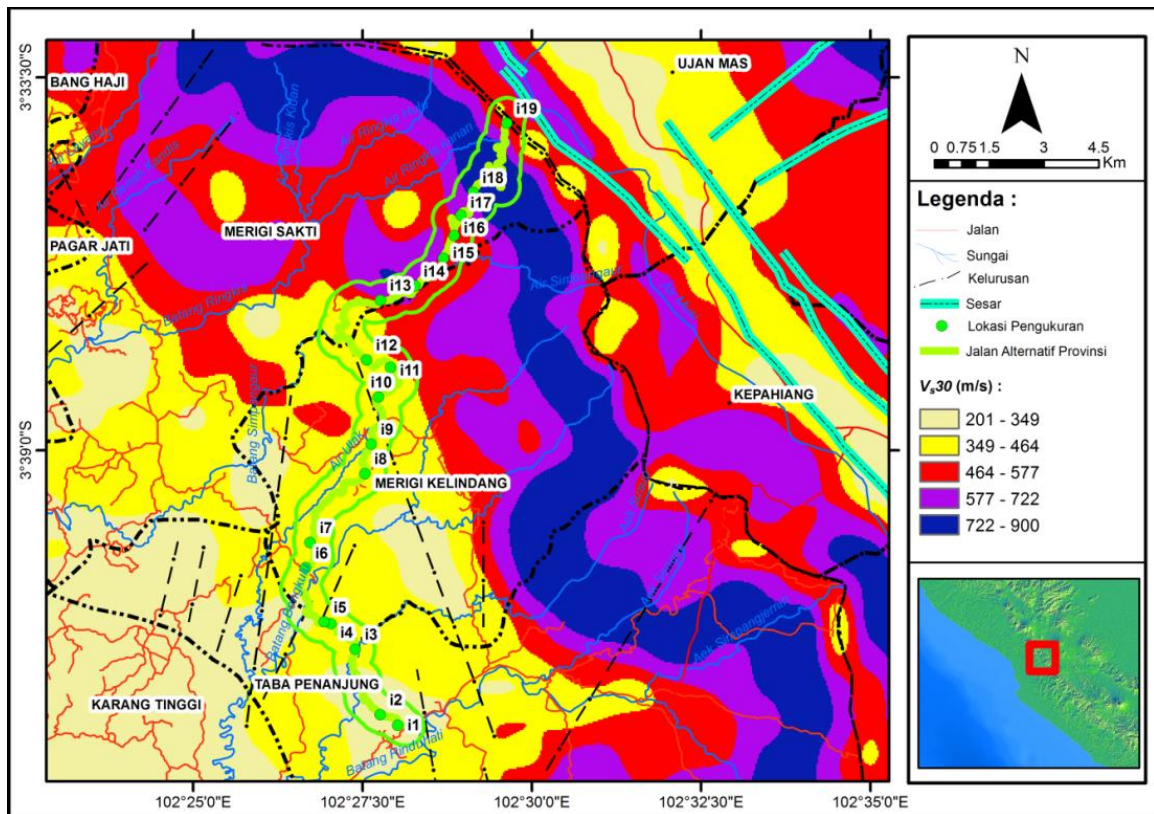
Pada penelitian ini, data gempabumi yang digunakan adalah data gempabumi dalam kurun waktu 100 tahun (1922-2022) dari USGS (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>) dengan magnitudo gempa  $\geq 5$  M. Nilai PGA dihitung menggunakan persamaan Kanai [20] dan peta sebaran PGA dan seismisitasnya ditunjukkan pada Gambar 6. Besarnya nilai percepatan tanah maksimum daerah penelitian yang dihasilkan berkisar dari 0,22 g – 0,61 g. Percepatan getaran tanah berfluktuasi kuat dalam puluhan detik selama gempa bumi, sebagai akibatnya *peak ground acceleration* umumnya diambil menjadi parameter terpenting pada studi tanah longsor akibat gempa [29].

Jarak dari sesar daerah penelitian telah diekstraksi dari peta geologi daerah penelitian pada skala 1:250.000 dengan bantuan alat *Euclidian distance buffering* dari perangkat lunak ArcGIS (Gambar 7), dan dibagi menjadi tiga kategori: < 1 km, 1 km - 5 km, dan > 5 km.





Gambar 7. Peta jarak dari sesar (km) (dimodifikasi dari [13])

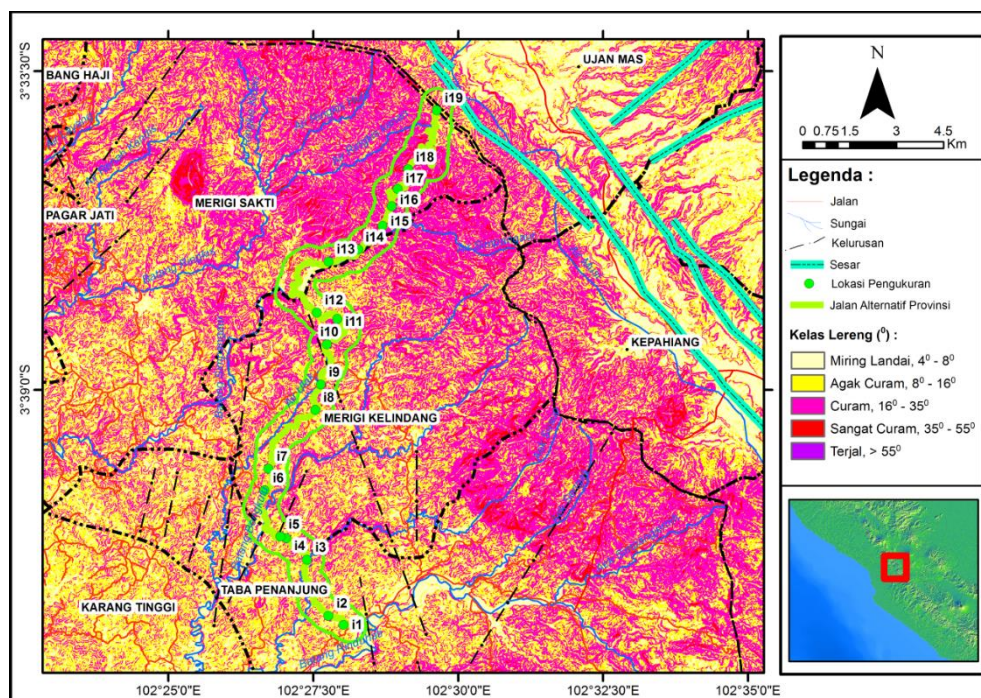


Gambar 8. Peta sebaran  $V_{s30}$  (modifikasi dari [30])

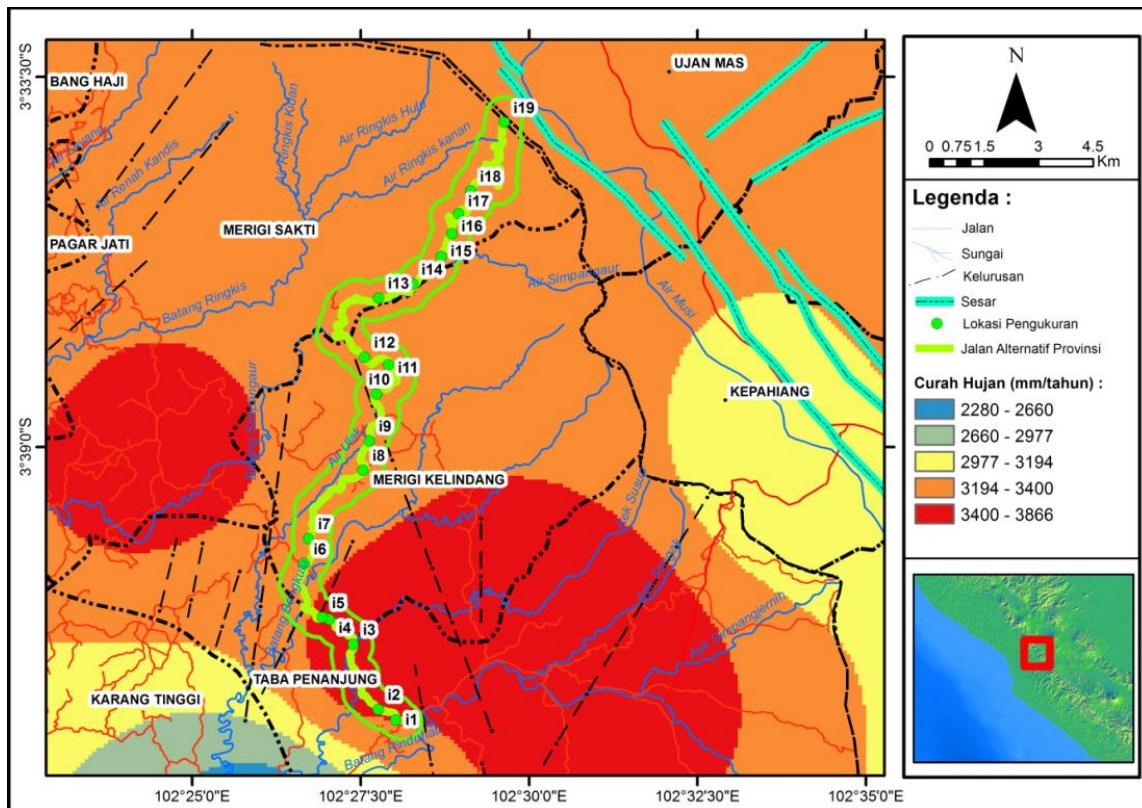
Peta  $V_{s30}$  yang diperoleh berasal dari data USGS dengan *grid* antar titik pengamatan sekitar 930 m (Gambar 8). Penggunaan peta  $V_{s30}$  didasarkan pada korelasi yang sesuai di

daerah tektonik aktif yang memiliki kecocokan yang lebih besar untuk nilai  $V_{s30}$  daripada di daerah yang stabil, yaitu 70% [31]. Untuk itu metode USGS yang menggunakan nilai kemiringan topografi sebagai proksi untuk mendapatkan nilai  $V_{s30}$  cocok untuk daerah penelitian ini yang selanjutnya digunakan untuk nilai pembobotannya. Nilai sebaran  $V_{s30}$  di daerah penelitian adalah 201 m/s - 900 m/s. Daerah yang memiliki nilai  $V_{s30}$  lebih rendah lebih berisiko terhadap ancaman gempa [32]. Kecepatan gelombang seismik yang melewati batuan tergantung pada kekerasan batuan. Semakin lunak suatu batuan maka semakin rendah kecepatan gelombang seismik pada batuan tersebut dan sebaliknya [31]. Pada batuan lunak, amplitudo yang dihasilkan lebih besar, sehingga berisiko terhadap guncangan yang lebih kuat. Guncangan gempa di daerah yang memiliki nilai  $V_{s30}$  rendah dapat menyebabkan kerusakan serius. Jika terjadi di lereng dapat berisiko longsor. Untuk kelas indeks untuk kategori  $V_{s30}$  mengacu pada SNI 1726-2012 [33].

Peta kemiringan lereng diperoleh dari DEMNAS Badan Informasi Geospasial (BIG) (<https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/#/>) (Gambar 9). Peta tersebut digunakan sebagai pembanding dengan data lapangan berupa sudut kemiringan yang diukur secara langsung. Kelas indeks kemiringan mengacu pada Zuidam [34]. Dia telah membagi lereng menjadi tujuh tingkatan dari datar hingga curam ( $0^\circ$  hingga  $> 55^\circ$ ). Untuk tinggi lereng, kriteria pembobotan didasarkan pada fenomena yang terjadi di lapangan. Menurut Hadi [31], ketinggian lereng  $\geq 25$  m memiliki risiko longsor tinggi, ketinggian lereng 10 m - 25 m memiliki risiko sedang, dan ketinggian lereng  $\leq 10$  m memiliki risiko rendah. Sebagian besar studi tentang kerentanan akibat gerakan massa menggunakan sudut kemiringan sebagai salah satu variabel independen yang paling penting [35]. Sudut kemiringan kritis di daerah pegunungan untuk pemindahan massa adalah  $30^\circ$ – $32^\circ$  [36], meskipun lereng dengan sudut yang lebih rendah dapat menjadi tidak stabil. Longsor dapat terjadi pada kelas kemiringan lereng  $15^\circ$ – $30^\circ$ , dan kecenderungan longsor tertinggi terjadi pada kelas kemiringan lereng  $> 25^\circ$  [37], meskipun beberapa penelitian menyimpulkan bahwa sebagian besar longsor terjadi pada kelas kemiringan lereng  $30^\circ$  -  $40^\circ$  [38].



**Gambar 9.** Peta kemiringan lereng beserta titik data pengukuran. Peta dibuat menggunakan data DEMNAS BIG 0.27-arcsecond. Klasifikasi kelas lereng mengacu pada pembagian kelas lereng menurut Zuidam [34]

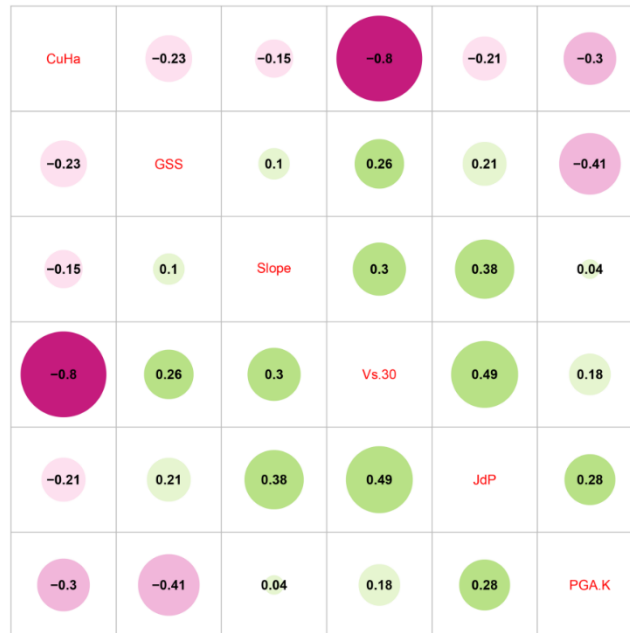


**Gambar 10.** Peta sebaran curah hujan tahunan rata-rata dan data pengukuran di lokasi penelitian dan sekitarnya. Data diolah berdasarkan rata-rata curah hujan tahunan periode 2015–2020 dari BMKG Stasiun Klimatologi Bengkulu

Untuk data sekunder, data curah hujan tahunan di Kabupaten Bengkulu Tengah periode 2015-2020 diperoleh dari Stasiun Klimatologi BMKG Provinsi Bengkulu<sup>[39]</sup>. Setelah mendapatkan data curah hujan tahunan di daerah penelitian, dibuat peta sebaran curah hujan tahunan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10. Peta ini dapat digunakan untuk menentukan nilai curah hujan tahunan di titik-titik tujuan pengukuran. Curah hujan rata-rata tahunan di wilayah studi berkisar antara < 2.200 mm/tahun sampai > 3.800 mm/tahun. Daerah dengan curah hujan > 2.500 mm/tahun berpotensi mengalami longsor<sup>[40]</sup>.

Kelas curah hujan diklasifikasikan menurut Kirmanto (2017)<sup>[40]</sup> yang menyatakan bahwa kategori rendah jika curah hujan tahunan < 1.000 mm/tahun, kategori sedang jika curah hujan tahunan antara 1.000 mm/tahun sampai 2.500 mm/tahun, dan kategori tinggi jika curah hujan tahunan > 2.500 mm. /tahun.

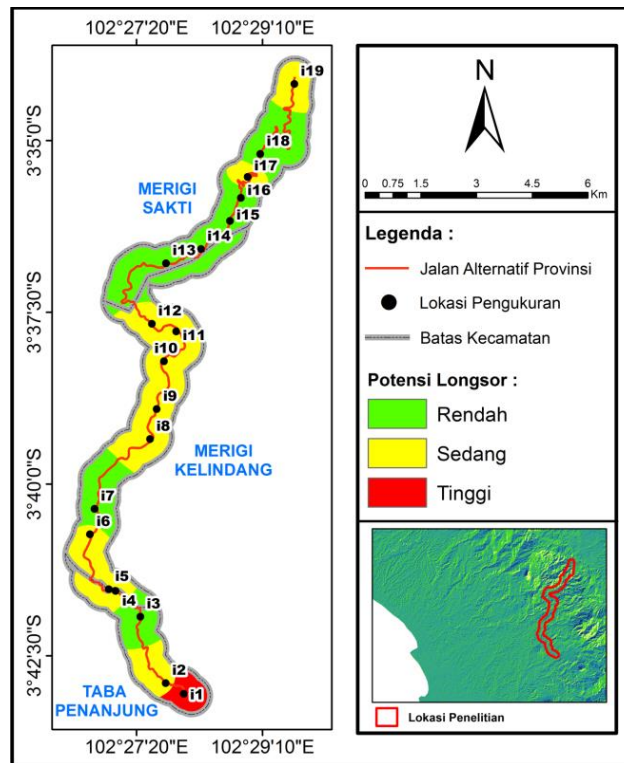
Dalam konteks penilaian tanah longsor, faktor pengkondisian berperan untuk merepresentasikan informasi lingkungan suatu wilayah<sup>[41]</sup>. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengecekan dan pengecualian terhadap faktor-faktor yang dapat menimbulkan gangguan (*noise*) dalam pemodelan kerentanan tanah longsor, yang dapat menurunkan kinerja prediksi model<sup>[42]</sup>. *Pearson correlation coefficient* digunakan untuk menilai korelasi antara setiap faktor pengkondisi<sup>[41]</sup>. *Pearson correlation coefficient* adalah kombinasi dari kekuatan dan arah hubungan variabel. Nilainya berkisar antara -1 hingga 1, di mana -1 menunjukkan korelasi terbalik terkuat, dan +1 menunjukkan korelasi variabel yang kuat. Korelasi yang sangat kuat jika nilainya > 0,7<sup>[43]</sup> (Gambar 11).



**Gambar 11.** *Pearson correlation coefficient* dari enam faktor pemicu longsor yang digunakan. Catatan "Slope" mewakili kelas lereng, "Vs30" mewakili Vs30, "JdP" mewakili jarak dari patahan, "PGA K" mewakili percepatan tanah puncak, "CuHa" mewakili curah hujan, dan "GSS" mewakili regangan geser tanah

Dari hasil peta, kita dapat melihat bahwa potensi longsor terbagi dalam tiga kategori: potensi tinggi berwarna merah, berpotensi sedang berwarna kuning, dan berpotensi rendah berwarna hijau. Hasil pengolahan peta potensi longsor pada jalur alternatif pada Gambar 12 menunjukkan tingkat potensi rendah dengan luas 1.197,19 ha atau 47,4% dan tingkat potensi sedang dengan luas 1.216,74 ha atau dominan 48,2%, sedangkan tingkat potensi tinggi seluas 109,87 hektar atau 4,4% sebagaimana ditampilkan pada Tabel 2. Daerah dengan potensi longsor tinggi perlu lebih waspada terhadap risiko longsor terutama di daerah padat penduduk seperti permukiman dengan bangunan dan infrastruktur jalan. Jika terjadi longsor di kawasan tersebut, dapat menimbulkan korban jiwa dan kerusakan jaringan transportasi.

Dilakukan penyelidikan dengan metode penilaian kerentanan tanah longsor di jalan alternatif provinsi menggunakan analisis pembobotan statistik SAW berdasarkan faktor-faktor pemicu terjadinya tanah longsor, yang mencakup sekitar enam faktor yaitu kemiringan lereng (*slope*), Vs30, PGA, GSS, curah hujan, dan jarak dari sesar. Kemudian, kami mengekstraksi setiap faktor tersebut berdasarkan dengan tingkat bahaya/risiko yang sudah dinilai oleh pembobotan statistik SAW. Dengan demikian, diperoleh hubungan yang konsisten antara peta kerentanan tanah longsor yang dibuat dan distribusi kejadian tanah longsor pada daerah penelitian. Oleh karena itu, hasil dari penelitian ini memiliki kemampuan untuk mengklasifikasikan bahaya longsor. Selain itu, metode ini dapat mengekstraksi lereng yang tidak stabil dan berkontribusi pada pengembangan langkah-langkah yang efisien untuk daerah yang sesuai dan teknologi pencegahan bencana lereng. Secara khusus, metode dalam penelitian ini didasarkan pada metode SAW dan sistem informasi geografis (SIG) yang sudah ada. Namun, metode SAW ini dianggap selangkah lebih maju dari metode evaluasi yang sudah ada. Keuntungan lebih lanjut dari metode ini adalah bahwa analisis dapat dilakukan hanya menggunakan data yang tersedia secara lebih murah.



**Gambar 12.** Peta potensi longsor yang dihasilkan dari metode SAW

**Tabel 2.** Luas Tingkat Potensi Tanah Longsor

| Potensi Longsor | Luas (ha) | Persentase (%) |
|-----------------|-----------|----------------|
| Rendah          | 1197,19   | 47,4           |
| Sedang          | 1216,74   | 48,2           |
| Tinggi          | 109,87    | 4,4            |

**KESIMPULAN**

Pembuatan peta prediksi bencana (*Landslide Susceptibility Map*) merupakan salah satu tugas penting yang menarik dan perlu dilakukan oleh para peneliti kebencanaan. Pada penelitian kali ini, pemetaan kerawanan longsor dievaluasi pada jalur alternatif provinsi, Kabupaten Bengkulu Tengah. Hal ini melibatkan pemetaan kerentanan model *Simple Additive Weighting* (SAW) berdasarkan faktor penyebab longsor termasuk indikator GSS, curah hujan, jarak dari sesar, PGA,  $V_s30$  dan kemiringan lereng. Sebagian besar jalur alternatif provinsi (48,2%) berada pada tingkat rawan longsor sedang, sedangkan sebagian 47,4% berada pada tingkat kerawanan longsor tinggi. Hanya 4,4% jalur alternatif provinsi ini berada pada tingkat kerawanan rendah terhadap kejadian longsor.

**UCAPAN TERIMAKASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih setulusnya kepada Laboratorium Geofisika Jurusan Fisika FMIPA Universitas Bengkulu yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini.

Ucapan terima kasih juga kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) yang telah menyediakan data DEMNAS, serta USGS atas data Vs30 dan katalog gempabumi.

## DAFTAR PUSTAKA

- 1 Keefer, D.K. 1984. Landslides Caused by Earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*. Vol. 95, Hal. 406–421.
- 2 Hansen, A. 1984. *Landslide Hazard Analysis*. In *Slope Instability*. Brunsten, D., Prior, E., Eds.; Wiley: New York, USA, Hal. 523–602.
- 3 Dai, F.C.; Lee, C.F.; Ngai, Y.Y. 2002. Landslide Risk Assessment and Management: An Overview. *Engineering geology*. Vol. 64, Hal. 65–87.
- 4 Dahal, R.K.; Hasegawa, S.; Masuda, T.; Yamanaka, M. 2006. Roadside Slope Failures in Nepal During Torrential Rainfall and Their Mitigation. *Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides*, Hal. 503–514.
- 5 Glade, T. 2003. Landslide Occurrence as A Response to Land Use Change: A Review of Evidence From New Zealand. *Catena*, Vol. 51, Hal. 297–314.
- 6 Kanungo, D.P.; Arora, M.K.; Sarkar, S.; Gupta, R.P. A 2006. comparative study of conventional, ANN black box, fuzzy and combined neural and fuzzy weighting procedures for landslide susceptibility zonation in Darjeeling Himalayas. *Engineering geology*, Vol. 85, Hal. 347–366.
- 7 Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard, and risk zoning for land use planning. *Engineering geology*, Vol. 102, Hal. 99–111.
- 8 Promper, C.; Puissant, A.; Malet, J.P.; Glade, T. 2014. Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios. *Applied Geography*, Vol. 53, Hal. 11–19.
- 9 Natawidjaya, D.H. and Triyoso, W., 2007. The Sumatran Fault Zone: From Source to Hazard. *Journal of Earthquake and Tsunami*, Vol. 1, No. 1, Hal. 21–47.
- 10 Anonim. 2020. *Kabupaten Bengkulu Tengah Dalam Angka*. BPS Kab. Bengkulu Tengah, Kabupaten Bengkulu Tengah, Prov. Bengkulu, Hal. 444.
- 11 Sudrajat, A. 2007. *Bengkulu Sebagai Daerah Rawan Bencana*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Bengkulu.
- 12 Hadi, A. I., Refrizon, R., Farid, M., Harlianto, B., & Sari, J. I. 2021. Landslide Potential Investigation for Disaster Risk Reduction in Central Bengkulu Regency, Bengkulu Province, Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, Vol. 8, No. 3, Hal. 313–328.
- 13 Gafoer, S., Amin, T.C. & Pardede. 2007. *Geological map of Bengkulu Quadrangle, Sumatra, scale 1:250,000*. Department of Mines and Energy. Bandung.
- 14 Anonim. 2013. *HVSR data acquisition unit GEMINI-2*. User manual PASI, Torino, Italy (Unpublished).
- 15 Anonim. 2004. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Tehnique on Ambient Vibrations: Measurements, Processing and Interpretation*, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME. [Ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf](ftp://ftp.geo.uib.no/pub/seismo/SOFTWARE/SESAME/USER-GUIDELINES/SESAME-HV-User-Guidelines.pdf) [15 April 2022].
- 16 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*. Kementerian Pekerjaan Umum. Bandung.
- 17 Kramer, S.L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, Hal. 45–124.
- 18 Nakamura, Y.; Saita, J.; Sato, T. 2003. Development of vulnerability assessment models using microtremor/strong motion. In *Proceedings of the 6th EQTAP Workshop, Kashikojima, Japan, 1–2 December*.
- 19 Nakamura, Y. 2008. On the H/V spectrum. In *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, 12–17 October 2008*.
- 20 Douglas, J., 2004. *Ground Motion Estimation Equation 1964–2003*. Department of Civil dan Environmental Engineering Imperial College London South Kensington Campus, United Kingdom.

- 21 Bullen, K.E.1987. *An Introduction to the Theory of Seismology, 3rd ed.* Cambridge University Press: Cambridge, UK, Hal. 231–234.
- 22 Fell, R.; Corominas, J.; Bonnard, C.; Cascini, L.; Leroi, E.; Savage, W.Z. 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning on behalf of the JTC-1 Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes. *Engineering geology*, Vol. 102, Hal. 99–111
- 23 Kusumadewi, S.; Hartati, S.; Harjoko, A.; Wardoyo, R. 2006. *Fuzzy Multi-Attribute Decision Making (Fuzzy MADM), 1st ed.* Graha Ilmu: Yogyakarta, Indonesia. Hal. 69–81.
- 24 Hadi, A.I., Brotospito, K.S., Pramumijoyo, S., and Hardiyatmo, H.C., 2018. Regional Landslide Potential Mapping in Earthquake-Prone Areas of Kepahiang Regency, Bengkulu Province, Indonesia. *Geosciences*, Vol. 8, Hal. 1-16.
- 25 Anonim. 2012. *Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 02 Tahun 2012 Tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana.* Badan Nasional Penanggulangan Bencana, Jakarta. <https://bnpb.go.id/uploads/migration/pubs/30.pdf> [15 April 2022].
- 26 Ishihara, K., 1996. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics.* Oxford University Press Inc.: New York, USA, Hal. 330.
- 27 Oliveira, C.S., Roca, A., and Goula, X., 2008. *Assessing and Managing Earthquake Risk (Geoscientific and Engineering Knowledge for Earthquake Risk Mitigation: developments, tools, techniques).* Springer: Netherlands, Hal. 545.
- 28 Pusgen, T. P. S. G. N. 2017. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017.* Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman, Kementerian PUPR: Bandung, Indonesia.
- 29 Yuan RM, Deng QH, Cunningham D, Xu C, Xu XW, Chang CP.2013. Density distribution of landslides triggered by the 2008 Wenchuan earthquake and their relationships to peak ground acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 4, Hal. 2344–2355.
- 30 Allen, T.I. dan Wald, D.J., 2007. *Topographic Slope as a Proxy for Global Seismic Site Conditions (V<sub>s30</sub>) and Amplification around the Globe.* [https://pubs.usgs.gov/of/2007/1357/pdf/OF07-1357\\_508.pdf](https://pubs.usgs.gov/of/2007/1357/pdf/OF07-1357_508.pdf) [5 July 2016].
- 31 Zhang, Y.B., Xiang, C.L., Chen, Y.L., Cheng, Q.G., Xiao, L., Yu, P.C., & Zhi, W.C.. 2019. Permanent Displacement Models of Earthquake-Induced Landslides Considering Near-Fault Pulse-Like Ground Motions. *Journal of Mountain Science*, Vol. 16, No. 6, Hal. 1244–57.
- 32 Hadi, 2019. *Landslide Potential Study of the Kepahiang Regency Areas, Bengkulu Province Especially Due to the Earthquake Using the Elastic Parameter Approach.* PhD Thesis at Dept. of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Universitas Gadjah Mada, Hal. 56-182.
- 33 Anonim. 2012. *Standar Nasional Indonesia 1726-2012 tentang Tata Cara Perencanaan Tahan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung dan Non Gedung.* Badan Standarisasi Nasional, Jakarta. Hal. 149.
- 34 Zuidam, R.A.V., 1983. *Guide to Geomorphological Aerial Photographic Interpretation and Mapping.* ITC, Eschede: The Nederland. Hal. 325.
- 35 Kayastha P, Dhital MR, dan De Smedt F .2013. Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. *Computers & Geosciences.* Vol. 52, Hal. 398–408.
- 36 Tofelde S, Dusing W, Schildgen TF, Wittmann H, Alonso R, dan Strecker MR .2017. Changes in denudation rates and erosion processes in the transition from a low-relief, arid orogen interior to a high-relief, humid mountain-front setting, Toro basin, southern central Andes, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, abstract.*
- 37 Chen, Z., Liang,S., Ke, Y., Yang, Z., & Zhao, H. 2020. Landslide Susceptibility Assessment Using Different Slope Units Based on the Evidential Belief Function Model. *Geocarto International.* Vol. 35, No. 15, Hal. 1641–64.
- 38 Guo, C.W., Yi, D.H, Ling, K.Y., & Helal, A. 2017. Size and Spatial Distribution of Landslides Induced by the 2015 Gorkha Earthquake in the Bhote Koshi River Watershed. *Journal of Mountain Science*, Vol. 14, No. 10, Hal. 1938–50.

- 39 Anonim. 2020. *Curah Hujan Kabupaten Bengkulu Tengah*. Laporan Tahunan BMKG Provinsi Bengkulu, Bengkulu (Unpublished).
- 40 Kirmanto, D., 2007. *Pedoman Penataan Ruang Kawasan Rawan Bencana Longsor*. [Http://landspatial.bappenas.go.id/komponen/peraturan/the\\_file/permen22\\_2007.pdf](http://landspatial.bappenas.go.id/komponen/peraturan/the_file/permen22_2007.pdf) [5 Mei 2022].
- 41 Yao, J., Qin, S., Qiao, S., Liu, X., Zhang, L., & Chen, J. 2022. Application of a two-step sampling strategy based on deep neural network for landslide susceptibility mapping. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, Vol. 81, No. 148.
- 42 Huang, F., Yao, C., Liu, W., Li, Y., & Liu, X. 2018. Landslide susceptibility assessment in the Nantian area of China: a comparison of frequency ratio model and support vector machine. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, Vol. 9, No. 1, Hal. 919-938.
- 43 Hong, H., Liu, J. & Zhu, A.X. 2020. Modeling landslide susceptibility using LogitBoost alternating decision trees and forest by penalizing attributes with the bagging ensemble. *Science of the total environment*, Vol. 718, No. 137231.