

Kajian metode deterministik untuk zonasi kerawanan gerakan tanah di Labuan Bajo Nusa Tenggara Timur

Erik Febriarta^{1,2*}, Denni Susanto³, Aditya Pandu Wicaksono⁴, Ajeng Larasati²

¹Fakultas Teknologi Sumber Daya Alam, Institut Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta, ²Palawa Karya, www.palawakarya.co.id, Yogyakarta, ³Prodi Pengelolaan Hutan, Sekolah Vokasi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, ⁴Teknik Lingkungan, Fakultas Teknologi Mineral, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta

* Koresponden Email: e.febriarta@gmail.com

Direvisi: 2021-01-17 Diterima: 2021-03-03
©2022 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geograf Indonesia (IGI)

Abstrak. Karakteristik morfologi berbukit dengan kemiringan lereng curam berpotensi atau rawan membentuk kejadian longsor (gerakan tanah). Tujuan kajian ini adalah menentukan zona kerawanan gerakan tanah dengan pendekatan spasial deterministik, yakni analisis sifat faktor kelerengan menggunakan parameter kemiringan lereng, jenis batuan, ketebalan pelapukan batuan, struktur geologi (jarak terhadap sesar), sifat geoteknik (ukuran butir), dan kegempaan regional. Selain pengukuran di lapangan, data berikut juga diperoleh dari data sekunder, yakni kemiringan lereng (konversi digital elevation model), jenis batuan, ketebalan pelapukan dan sifat geoteknik (Pusat Survei Geologi), serta kedalaman air tanah (BAPPEDA). Struktur geologi diperoleh dari Pusat Survei Geologi dan analisis jarak menggunakan sistem informasi geografis, sedangkan intensitas hujan dari BMKG dan nilai kegempaan dari BMKG dan Badan Geologi. Berdasarkan hasil analisis, daerah kajian (43,3 km²) memiliki empat zona kerawanan gerakan tanah, yakni sangat rendah (34,73%), rendah (20,98%), sedang (26,78%), dan tinggi (17,51%). Secara umum, Labuan Bajo memiliki kerawanan gerakan tanah yang sangat rendah (34,73%).

Kata kunci: deterministik, gerakan tanah, Labuan Bajo, kelerengan, kerawanan

Abstract. Hilly morphology with steep slopes is a factor of susceptibility to landslides (mass movements). The study was designed to determine mass movement susceptibility zones using a deterministic spatial approach by analyzing slope factors, namely slope gradient, rock type, rock weathering depth, geological structure (distance to fault), geotechnical properties (grain size), and regional seismicity. Aside from measurements in the field, these parameters were also measured from secondary data: slope gradient (conversion of digital elevation model), rock type, weathering type, geotechnical properties (PSG), and groundwater depth (BAPPEDA). In addition, geological structures were obtained from PSG and geographic information systems (distance analysis), rainfall intensity was from BMKG, and seismicity values were from BMKG and the Geological Agency. Based on the analysis results, the study area (43.3 km²) had four susceptibility zones: very low (34.73%), low (20.98%), medium (26.78%), and high (17.51%). In general, Labuan Bajo had a very low susceptibility to mass movements.

Keywords: deterministic, Labuan Bajo, mass movement, slope, susceptibility

PENDAHULUAN

Gerakan tanah merupakan proses perpindahan massa tanah atau formasi batuan dengan pergerakan arah tegak, mendatar, atau miring dari kedudukan (posisi) semula yang dipengaruhi oleh gravitasi, beban, dan arus air (Permen PU, 2007). Gerakan tanah dapat dikategorikan menjadi bencana ketika proses perpindahan masa yang terjadi mengancam dan mengganggu kehidupan dan penghidupan masyarakat hingga mengakibatkan timbulnya korban jiwa, kerusakan lingkungan, kerugian harta benda, dan dampak psikologis (BNPB, 2016). Salah satu bencana gerakan tanah yang sering terjadi di Indonesia adalah longsor.

Longsor rawan terjadi di area dengan kelerengan yang curam seperti perbukitan di Labuan Bajo, Kabupaten Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur. Pada 2019 hingga 2022, bencana longsor akibat hujan lebat memutus ruas jalan penghubung desa dan jalan nasional Labuan Bajo-

Ruteng, merusak rumah penduduk, fasilitas umum, dan infrastruktur, mengakibatkan ratusan orang mengungsi, dan merenggut korban jiwa (Fadhil, 2019; Fahmi, 2019; Jahang, 2021; Edison, 2022). Mengingat Labuan Bajo telah dipersiapkan oleh Kementerian Pariwisata dan Ekonomi Kreatif Republik Indonesia sebagai salah satu destinasi wisata lanskap prioritas pada 2019 (Hadi, 2020), diperlukan pengkajian tingkat kerawanan dengan memetakan zona kerawanan gerakan tanah (longsor) sebagai langkah strategis untuk memitigasi dampak destruktif yang menghambat percepatan pembangunan daerah di Labuan Bajo (BSN, 2016; Ahmad dkk., 2018; Febriarta dan Wibowo, 2021).

Dalam pemodelan potensi kebencanaan atau tingkat kerawanan gerakan tanah (longsor), faktor keamanan lereng merupakan faktor dominan (Klose, 2015; Taufik dkk., 2016;

Sassa dkk., 2018). Dengan menggunakan faktor ini, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral dan Badan Nasional Penanggulangan Bencana menemukan bahwa kerawanan longsor di Labuan Bajo termasuk sedang-tinggi (BNPB, 2011, 2016; PVMBG, 2021a, 2021b). Namun demikian, indeks kerawanan yang digunakan didasarkan atas sifat kelerengan dan belum mempertimbangkan pendekatan geomorfologi, yaitu faktor pengontrol longsor yang merupakan komposit dari beberapa parameter seperti sifat kelerengan dan jenis batuan yang dapat memprediksi potensi pergerakan tanah (Mulyono dan Iqbal, 2015). Secara morfologi, bagian pesisir utara Labuan Bajo merupakan perbukitan Tufa Dasitan dengan kemiringan lereng curam (Gambar 1) yang terbentuk oleh tenaga tektonik dari hasil gunungapi tua (Ratman dan Yasin, 1978).

Selain itu, perbukitan bagian timur tersusun atas formasi batugamping berlapis (Tml) yang terdiri atas batugamping dengan sisipan batugamping tufan, batu kwarsa, tufan, dan konglomerat; konglomerat terdapat di bagian bawah andesit yang terpropilitkan. Menurut Ratman dan Yasin (Ratman dan Yasin, 1978), kenampakan morfologi perbukitan dengan penyusun formasi batuan tersebut memiliki tingkat pelapukan batuan sedang hingga tinggi. Pada lereng dengan derajat kemiringan besar, gaya gravitasi lebih besar dibandingkan friksi antar batuan, tanah, atau sedimen, sehingga kombinasi lereng curam, gaya gravitasi, dan formasi batuan yang mudah terlapukkan dengan jenis penyusun batuan lepas-lepas dapat memicu pergerakan tanah (Perka BNPB, 2012; Taufik dkk., 2016; Syarafina dan Sumunar, 2018; Titisari dkk., 2019). Selain itu, PVMBG (PVMBG, 2018) menyatakan bahwa Labuan Bajo berpotensi terlanda gempa bumi kuat dengan skala intensitas lebih dari VIII MMI (tinggi) yang dapat memicu longsor. Dengan demikian, selain kemiringan lereng, terdapat parameter geomorfologi lainnya yang mengontrol gerakan tanah atau kejadian longsor, yakni jenis batuan, ketebalan pelapukan, stuktur geologi, sifat geoteknik material penyusun batuan, dan potensi kegempaan.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan zona kerawanan gerakan tanah (longsor) di Labuan Bajo secara spasial dengan menggunakan pendekatan faktor pengontrol gerakan tanah secara deterministik. Dalam kajian risiko, pemodelan zona kerawanan dengan pendekatan faktor pengontrol gerakan tanah dalam sistem informasi geografis (Boni dkk., 2020) merupakan upaya mengoptimalkan

penyusunan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak longsor (Perka BNPB, 2012; Rahmad dkk., 2018; Sujit dan Subrata, 2019; Febriarta dan Wibowo, 2021). Selain itu, zona kerawanan beserta faktor penentunya memberikan informasi geospasial yang dapat dijadikan dasar untuk penataan ruang berbasis pengurangan risiko bencana alam (Syahbana dkk., 2013; Miyagi, 2018) dan mempercepat pembangunan berkelanjutan (Perka BNPB, 2012).

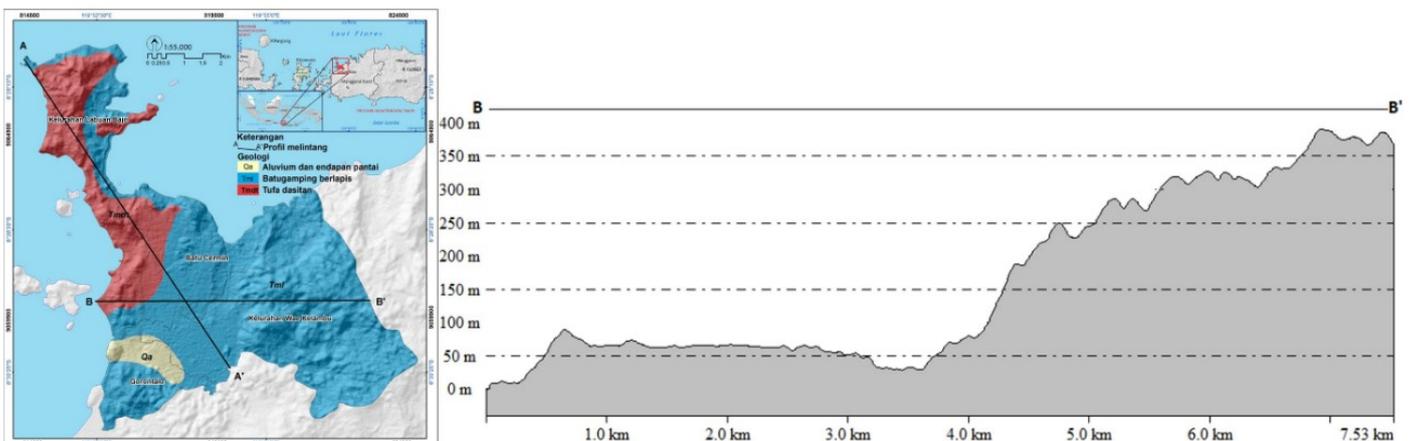
METODE PENELITIAN

Lokasi kajian analisis kerawanan gerakan tanah berada di empat desa di Kecamatan Komodo, Kabupaten Manggarai Barat, Provinsi Nusa Tenggara Timur, yakni Kelurahan Labuan Bajo, Kelurahan Wae Kelambu, Desa Batu Cermin, dan Desa Gorontalo. Daerah kajian dibatasi oleh Laut Flores di sebelah utara, Laut Flores di sebelah barat, Desa Golo Ketak di sebelah timur, dan Desa Golo Bilas dan Desa Nggorang di sebelah selatan.

Penelitian ini menggunakan metode spasial deterministik. Metode ini memodelkan tingkat kerawanan longsor dengan memerhatikan faktor pengontrol gerakan tanah dan menganalisis hasilnya secara spasial (BSN, 2016). Faktor pengontrol gerakan tanah merupakan komposit dari delapan parameter yang dipilih dengan mengacu pada BSN (BSN, 2016) dan Perka BNPB (Perka BNPB, 2012), yakni kemiringan lereng, jenis batuan, ketebalan pelapukan, stuktur geologi, sifat geoteknik, intensitas curah hujan, kedalaman muka air tanah, dan nilai kegempaan.

Pembobotan parameter dan kelas parameter dengan Analytical Hierarchy Process (AHP)

Dalam pemetaan zona kerawanan gerakan tanah (longsor), setiap parameter dianalisis menurut hubungannya dengan distribusi atau kerapatan gerakan tanah serta menurut perannya sebagai gaya penahan atau penggerak lereng (BSN, 2016), salah satunya melalui pembobotan dengan pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP) (Febriarta dkk., 2020). Dalam konteks kerawanan, pembobotan dengan AHP merupakan teknik pengambilan keputusan untuk menentukan tingkat kerawanan dengan cara memberi setiap parameter satu nilai hierarki (bobot) berdasarkan tingkatan pengaruhnya terhadap kerawanan (Wibowo dan Semedi, 2011; Viaciago, 2013; Rahmad dkk., 2018; Febriarta dan Shofarini, 2021). Proses ini menggunakan skala perbandingan berpasangan (pairwise



Gambar 1. Penampang melintang barat-timur menunjukkan kenampakan morfologi Labuan Bajo yang berbukit dengan kelerengan curam (Sumber: Analisis Data (2021); BIG (BIG, 2018))

comparison matrix) menurut (Saaty, 1980). Nilai bobot yang diperoleh merepresentasikan besar pengaruh suatu parameter terhadap parameter yang lainnya dalam mengontrol longsor (Saaty, 2004; Wibowo dan Semedi, 2011; Febriarta dan Wibowo, 2021), sehingga parameter pemicu gerakan tanah yang dominan dapat ditentukan (Permen PU, 2007). Setiap parameter dibagi menjadi beberapa kelas, dan setiap kelas juga diberikan nilai bobot untuk menentukan tingkat kerawanan dan menggambarkan zona kerawanan gerakan tanah (longsor) secara spasial (Pitaloka dkk., 2018; Raharjo dkk., 2019).

Normalisasi data dilakukan untuk mendapatkan nilai korelasi yang konsisten dengan nilai simpangan terkecil. Nilai korelasi yang konsisten menunjukkan bahwa matriks yang dibuat (pairwise comparison matrix) konsisten dan nilai bobot yang diperoleh dapat digunakan untuk menentukan kerawanan di daerah penelitian dengan tingkat kepercayaan yang tinggi. Nilai korelasi ini diperoleh dengan membandingkan nilai indeks konsistensi (CI) dengan rasio konsistensi (CR) (Saaty, 2004; Sassa dkk., 2018).

Analisis kerawanan secara spasial deterministik

Analisis kerawanan deterministik yang dilakukan dalam penelitian ini mengacu pada panduan Standardisasi Nasional Indonesia (SNI) No.8291: 2016 tentang Penyusunan dan Penentuan Zona Kerawanan Gerakan Tanah. Terdapat delapan parameter kerawanan gerakan tanah (longsor) yang dianalisis dalam penelitian ini, yakni kemiringan lereng, jenis batuan, ketebalan pelapukan, stuktur geologi, sifat geoteknik, intensitas curah hujan, kedalaman muka air tanah, dan nilai kegempaan. Sumber data untuk setiap parameter ini disajikan pada Tabel 1.

Kemiringan lereng merupakan hasil konversi data elevasi menjadi derajat kemiringan lereng. Data elevasi diperoleh dari DEMNAS dan pengukuran langsung di lapangan dengan slope meter (range finder). Jenis penyusun batuan, kriteria pelapukan, dan sifat geoteknik (ukuran butir) diperoleh dari data litologi Pusat Survei Geologi (PSG, 2018) dengan skala 1:50.000 dan survei lapangan. Data struktur geologi diperoleh dari Pusat Survei Geologi (PSG, 2018) dengan skala 1:50.000, Peta Geologi Lembar Komodo

(Ratman dan Yasin, 1978) dengan skala 1:50.000, dan hasil identifikasi digital elevation model dari BIG (2018) dengan skala 1:50.000. Intensitas curah hujan (mm/hari) dihitung menggunakan data sekunder dari Ambi dkk. (Ambi dkk., 2020) dan BMKG (BMKG, 2020b, 2020c, 2020d). Kedalaman muka air tanah diperoleh dari data sekunder milik BAPPEDA (BAPPEDA, 2011) dengan skala 1:50.000, PATGTL (PATGTL, 2018) dengan skala 1:25.000, dan pembaharuan data kedalaman muka air tanah dengan survei lapangan. Nilai kegempaan (Peak Ground Acceleration / PGA) mengacu pada data sekunder dari ESDM (ESDM, 2009), PVMBG (PVMBG, 2020), dan BMKG (BMKG, 2020a) dengan skala 1:50.000. Skala pemetaan 1:50.000 digunakan untuk memperoleh skala proposional dalam analisis.

Nilai (R) dan bobot (W) masing-masing parameter dihitung secara linier untuk mendapatkan nilai kerawanan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut (BNPB, 2016;

$$\text{Indeks kerawanan} = \text{Kemiringan lereng } (R*W) + \text{Jenis batuan } (R*W) + \text{Ketebalan pelapukan } (R*W) + \text{Struktur geologi } (R*W) + \text{Sifat geoteknik } (R*W) + \text{Intensitas curah hujan } (R*W) + \text{Kedalaman muka air tanah } (R*W) + \text{Kegempaan } (R*W) \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Interval kelas kerawanan} = \frac{\text{Nilai maksimum} - \text{Nilai minimum}}{\text{Jumlah kelas } (4)}$$

Febriarta dan Wibowo, 2021):

Indeks kerawanan gerakan tanah (longsor) kemudian dikelompokkan menjadi empat tingkat atau kelas kerawanan dengan metode equal interval, yakni dengan membagi selisih antara nilai tertinggi dan nilai terendah dengan jumlah kelas yang telah ditentukan seperti yang disajikan persamaan (2) berikut (Sassa dkk., 2018):

(2)

Selanjutnya, hasil penilaian kerawanan divalidasi dengan hasil survei kenampakan longsor di lapangan dan data kejadian longsor di daerah penelitian. Data sekunder kejadian longsor yang diperoleh dari Kristiawan dkk. (Kristiawan dkk., 2019) dan BPBD (BPBD, 2022) dianalisis secara tumpang susun (overlay) dengan peta hasil tingkat kerawanan gerakan tanah (longsor) di Labuan Bajo.

Tabel 1. Parameter analisis kerawanan gerakan tanah (longsor) dengan metode deterministik beserta sumber datanya

Parameter	Data	Sumber Data
Kemiringan lereng	Digital Elevation Model (DEM)	BIG (BIG, 2018); Pengukuran di lapangan (2020)
Jenis batuan	Formasi batuan (geologi)	PSG (PSG, 2018); Survei lapangan (2020)
Ketebalan pelapukan	Formasi batuan (geologi)	Ratman dan Yasin (Ratman dan Yasin, 1978); PSG (PSG, 2018); Survei lapangan (2020)
Stuktur geologi (jarak terhadap kekar, sesar)	Struktur geologi (geologi)	Ratman dan Yasin (Ratman dan Yasin, 1978); BIG (BIG, 2018); PSG (PSG, 2018)
Sifat geoteknik (ukuran butir)	Formasi batuan (geologi)	Ratman dan Yasin (Ratman dan Yasin, 1978); PSG (PSG, 2018); Survei lapangan (2020)
Intensitas curah hujan	Curah hujan (mm/hari)	Ambi dkk. (Ambi dkk., 2020); BMKG (BMKG, 2020b, 2020c, 2020d)
Kedalaman muka air tanah	Hidrologi/ Cekungan air tanah	BAPPEDA (BAPPEDA, 2011); PATGTL (PATGTL, 2018); Survei lapangan (2020)
Nilai kegempaan (Peak Ground Acceleration/PGA)	Kegempaan	ESDM (ESDM, 2009); BMKG (BMKG, 2020a); PVMBG (PVMBG, 2020)

Sumber: Analisis Data (2021)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bobot parameter kerawanan gerakan tanah (longsor)

Analisis parameter kerawanan menggunakan pairwise comparison matrix menghasilkan nilai bobot yang menunjukkan urutan atau hierarki parameter menurut signifikansinya dalam menentukan kerawanan (Tabel 2). Tahap akhir analisis menghasilkan rasio konsistensi (CR) sebesar 7,5%. Menurut Lu dkk (2017), nilai CR ini menunjukkan keakuratan data yang baik dengan nilai toleransi <10% dan hasil pembobotan yang konsisten dan dapat digunakan untuk analisis berikutnya. Kemiringan lereng sebagai parameter yang dominan (kelas 1) memiliki bobot 0,312, sedangkan nilai kegempaan memiliki bobot 0,031. Selain parameter, pembobotan dan perhitungan konsistensi rasio juga dilakukan untuk masing-masing kelas parameter. Berdasarkan hasil analisis yang disajikan di Tabel 3, masing-masing parameter memiliki nilai konsistensi rasio (CR) sebesar 1,0-7,7% yang menunjukkan bahwa bobot yang dihasilkan memiliki tingkat kepercayaan tinggi dan konsisten sehingga dapat digunakan untuk menganalisis tingkat kerawanan gerakan tanah (longsor) di daerah penelitian (Saaty, 2004).

Kerawanan gerakan tanah (longsor) menggunakan metode deterministik

Kondisi penentu kerawanan gerakan tanah (longsor) di Labuan Bajo dikategorikan menurut kelas masing-masing parameter. Hasil pengukuran dan analisis kemiringan lereng, jenis batuan, ketebalan pelapukan, struktur geologi, sifat geoteknik, intensitas curah hujan, kedalaman muka air tanah, dan nilai kegempaan disajikan secara spasial dalam Gambar 3. Subbab ini dibagi menjadi beberapa bagian yang mendiskusikan hasil analisis masing-masing parameter dan zona kelas kerawanan yang diperoleh menggunakan metode deterministik.

Kemiringan lereng

Kemiringan lereng merupakan parameter dengan bobot yang paling besar atau yang paling berperan dalam menentukan kerawanan gerakan tanah (longsor) (Paksi dan Pertiwi, 2018). Kemiringan lereng diperoleh dengan mengonversikan nilai topografi dari data digital elevation model nasional (DemNas) lembar Labuan Bajo 2007: 41 dan 42 yang diperoleh dari BIG (2018) menjadi nilai kemiringan lereng. Data kemiringan lereng diolah dan dikelaskan menurut klasifikasi Van Zuidam (1983) menggunakan sistem

informasi geografis (SIG). Kelas kemiringan lereng memiliki nilai bobot 0,100 (14-20%) hingga 0,382 (>140%). Berdasarkan hasil analisis data kemiringan lereng (CR = 7,4%, tingkat kepercayaan data tinggi), daerah sepanjang pesisir Labuan Bajo memiliki kombinasi topografi landai hingga curam dengan kemiringan lereng 0°-55° (Gambar 3).

Jenis batuan

Kondisi geologi regional Labuan Bajo terdiri dari Formasi Aluvium dan endapan pantai (Qa) pada morfologi dataran pantai, formasi Tufa Dasitan (Tmdt) dengan topografi curam dan berbukit di bagian utara, dan formasi batugamping berlapis (Tml) yang mendominasi penyusun batuan di Kota Labuan Bajo. Ketiga formasi ini termasuk dalam kategori jenis batuan endapan sedimen lepas-lepas dengan nilai bobot 0,80. Setiap jenis batuan memiliki pengaruh yang berbeda terhadap sifat kekompakan batuan (Titisari dkk., 2019) dan, dalam hal ini, jenis batuan endapan sedimen lepas-lepas memberikan pengaruh signifikan terhadap pergerakan tanah (Mulyono dan Iqbal, 2015) dan menjadi penentu kerawanan gerakan tanah yang paling dominan (Enrique dan Milagros, 2017). Oleh karena itu, berdasarkan jenis penyusun batuan (CR=7,7%), Labuan Bajo secara umum memiliki kelas kerawanan gerakan tanah (longsor) tinggi.

Ketebalan pelapukan

Pelapukan merupakan proses fisika dan kimia yang mengakibatkan batuan terdisintegrasi. Menurut Priyono (Priyono, 2015), batuan yang mudah melapuk mempunyai konsistensi yang rendah terhadap kekompakan batuan dan, oleh karenanya, berpotensi memicu gerakan rayapan. Selain itu, ketebalan pelapukan yang intensif akan memengaruhi kestabilan lereng hingga dapat mengakibatkan pergeseran lahan (Ahmad dkk., 2018). Secara umum, berdasarkan ketebalannya (CR = 7,2%), intensitas pelapukan di Labuan Bajo dapat dikategorikan menjadi dua, yakni rendah (terdistribusi di area dengan morfologi datar hingga landai) dan sedang (terdistribusi pada formasi tufa dasitan dengan kemiringan lereng miring hingga agak curam).

Struktur geologi (jarak terhadap sesar/patahan dan kekar)

Terdapat beberapa struktur geologi di sekitar Labuan Bajo, yakni sesar atau patahan di bagian tenggara Pulau Flores dan patahan aktif dari keterusan Gunung Ketak di bagian tengah Pulau Flores. Semakin dekat suatu area

Tabel 2. Kelas (hierarki) dan bobot parameter kerawanan

Parameter	Kelas	Bobot
Kemiringan lereng	1	0,312
Jenis batuan	2	0,217
Ketebalan pelapukan	3	0,130
Struktur geologi (Kekar, sesar)	4	0,143
Sifat geoteknik (ukuran butir)	5	0,082
Intensitas curah hujan (mm/hari)	6	0,047
Kedalaman muka air tanah	7	0,038
Kegempaan	8	0,031

Keterangan: Rasio konsistensi (CR): 7,5%

Sumber: Perka BNPB (Perka BNPB, 2012); BSN (BSN, 2016); Analisis Data (2021)

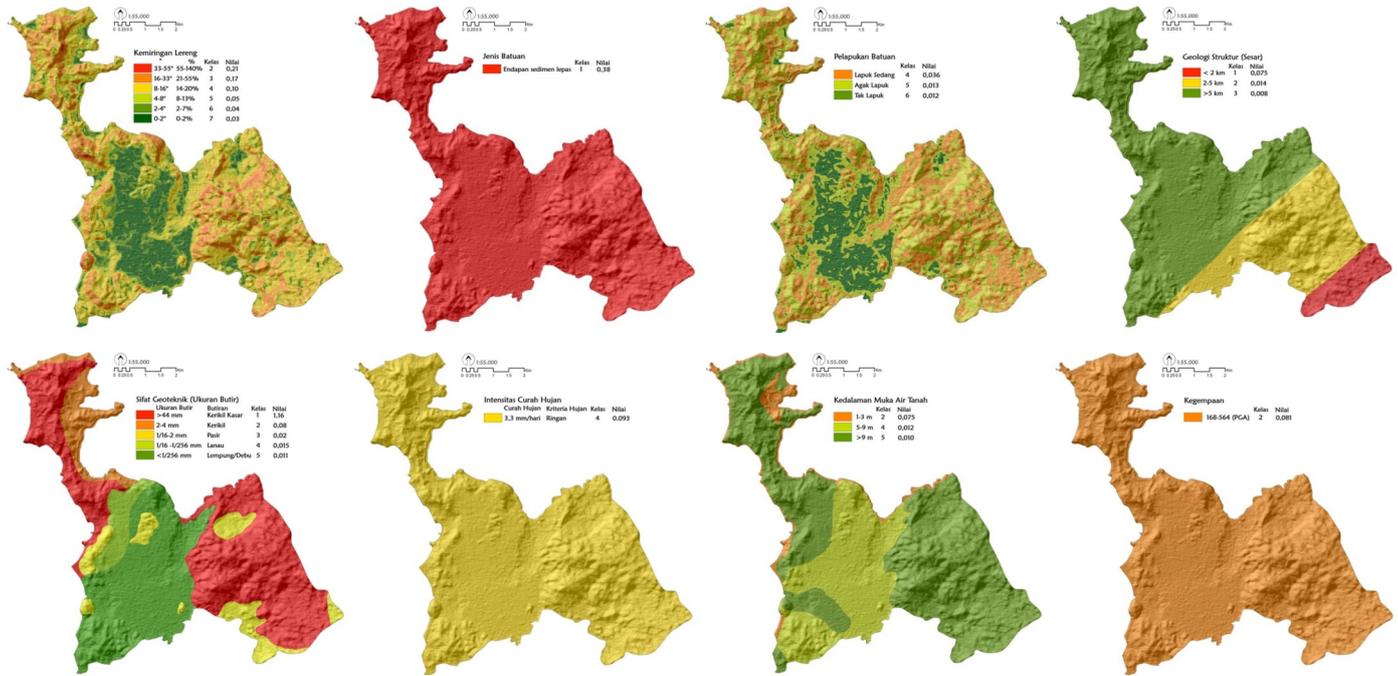
Tabel 3. Kelas, bobot, dan nilai konsistensi rasio (CR) setiap parameter kerawanan

(1) Kemiringan Lereng			(2) Jenis Batuan		(3) Ketebalan Pelapukan		
Kelas	%	Bobot	Kelas	Bobot	Kelas		Bobot
>55	>140	0,382	Endapan Sedimen Lepas	0,800	Tanah Residu/ <i>Residu soil</i> (RS)		0,130
33-55	55-140	0,210	Batu Malihan dan Beku	0,100	Lapuk Sempurna/ <i>Completely weathered</i> (WC)		0,110
16-33	21-55	0,170	Batuan padu	0,070	Sangat Lapuk/ <i>Highly weathered</i> (WH)		0,074
8-16	14-20	0,100			Lapuk Sedang/ <i>Moderately weathered</i> (WM)		0,036
4-8	8-13	0,050			Agak Lapuk/ <i>Slightly weathered</i> (WS)		0,014
2-4	2-7	0,040			Tak Lapuk/ <i>Segar/Unwathered fresh</i> (UW/F)		0,013
0-2	0-2	0,030					
	CR = 7,4%		CR = 7,7%		CR = 7,2 %		

(4) Struktur Geologi		(5) Sifat Geoteknik		(6) Intensitas Curah Hujan			Bobot
Kelas	Bobot	Kelas (Ukuran Butir)	Bobot	mm/hari	Kelas mm/jam	Kriteria	
< 2 km	0,075	> 4 mm (kerikil kasar)	0,160	>100	> 20	Sangat Lebat	0,723
2-5 km	0,014	2-4 mm (Kerikil)	0,081	50 - 100	10 - 20	Lebat	0,106
> 5 km	0,008	1/16-2 mm (pasir)	0,025	20 - 50	5 - 10	Sedang	0,077
< 2 km	0,075	1/16-1/256 mm (lanau)	0,015	5 - 20	1 - 5	Ringan	0,093
2-5 km	0,014	<1/256 mm (lempung/debu)	0,011				
	CR = 1,0%	CR = 3,6%			CR = 2,8%)		

(7) Kedalaman Muka Air Tanah		(8) Nilai Kegempaan Peak Ground Acceleration (PGA)					Bobot
Kelas	Bobot	SIG BMKG	MMI	Kelas PGA (gal)	Kriteria		
<1	0,091	V	IX-XII	>564	Sangat Tinggi	0,160	
1-3	0,075	IV	VI-VIII	168-564	Tinggi	0,081	
3-5	0,032	III	VI	89-167	Sedang	0,025	
5-9	0,012	III	III-V	2,9-88	Rendah	0,015	
>9	0,010	I	I-II	<2,9	Sangat Rendah	0,011	
	CR = 2,3%			(CR = 3,7%)			

Sumber: Perka BNPB (Perka BNPB, 2012); BSN (BSN, 2016); Analisis Data (2021)



Gambar 3. Penilaian parameter kerawanan gerakan tanah (longsor) di Labuan Bajo, dari kiri ke kanan: kemiringan lereng, jenis batuan, jenis kelapukan batuan, struktur geologi, sifat geoteknik, intensitas curah hujan, kedalaman muka air tanah, dan kegempaan (pemetaan menggunakan skala data 1:50.000)

dengan zona patahan, semakin tinggi potensi kebencanaan gerakan tanah dan longsohnya (Boni dkk., 2020; Collico dkk., 2020). Berdasarkan jarak terhadap zona patahan ($CR = 1,0\%$, konsistensi data sangat baik), Labuan Bajo secara umum memiliki tiga kelas kerawanan yang disajikan secara spasial di Gambar 3.

Sifat geoteknik (ukuran butir)

Ukuran butir atau tekstur batuan memengaruhi tingkat kestabilan lereng (Lombardo dkk., 2020) dan menentukan tipe gerakan tanah yang mungkin terjadi. Berdasarkan sifat geoteknik ($CR = 3,6\%$, konsistensi data sangat baik), Labuan Bajo secara umum memiliki tekstur batuan berupa pasir hingga kerikil dengan tipe potensi longsor berupa jatuhnya rombakan batuan dan jatuhnya tanah berbutir halus-sedang. Survei lapangan di pesisir dengan topografi miring-curam di bagian utara menemukan longsor tipe jatuhnya pada koordinat x: 816621 mE dan y: 9062846 mS dan elevasi 62 mdpal (Gambar 4a). Material jatuhnya merupakan rombakan batuan dari formasi tufa dasitan (Tmdt) di pesisir pantai bagian utara. Lokasi jatuhnya berada di zona kerawanan sedang. Sementara itu, material dengan tekstur pasir berpotensi memicu longsor berupa jatuhnya tanah berbutir halus-sedang yang melebar, seperti yang ditemukan pada koordinat x: 818396 mE dan y: 9062948 mS dan elevasi 52 mdpal (Gambar 4b). Titik ini berada di formasi batuan batugamping berlapis (Tml) dengan tingkat pelapukan sedang (lihat Gambar 3) yang banyak dijumpai pada morfologi perbukitan dengan topografi agak curam. Jatuhnya material yang melebar mendominasi tipe longsor di bagian timur.

Intensitas curah hujan

Intensitas curah hujan menunjukkan besarnya atau tingginya jumlah hujan yang turun dalam satuan volume mm/hari atau mm/jam (Ambi dkk., 2020; BMKG, 2020d).

Parameter ini memengaruhi tingkat kejenuhan tanah yang menentukan gaya geser pada bidang gelincir lereng (Yamagishi dan Bhandary, 2017). Berdasarkan data yang diperoleh dari BMKG (2020a), curah hujan di daerah penelitian berada dalam rentang 2,9-3,33 mm/hari atau kriteria ringan.

Kedalaman muka air tanah

Kedalaman muka air tanah (meter) yang diperoleh dari BAPPEDA (BAPPEDA, 2011) mengindikasikan ketersediaan air tanah di daerah pesisir dan kota pada morfologi datar hingga agak curam di kedalaman 5-15 m. Data ini turut menunjukkan bahwa distribusi ketersediaan air tanah di sebagian Labuan Bajo berada pada daerah cekungan air tanah (CAT) Labuan Bajo. Sementara itu, tidak terdapat data kedalaman muka air tanah di morfologi perbukitan tufa dasita (bagian utara) karena termasuk daerah non-CAT dan tersusun atas batuan vulkanik yang sifatnya hanya mengalirkan aliran dan memiliki kapasitas rendah dalam menyimpan air. Kondisi ini disebut dengan sistem hidrologi akuifug yang umumnya dicirikan oleh batuan berlapis dan pejal (Todd dan Mays, 2005; Wicaksono dkk., 2020).

Kegempaan

Nilai kegempaan yang diperoleh dari BMKG (2020b) dan PVMGB (2020a) menunjukkan skala intensitas gempa bumi IV (BMKG), skala Modified Mercalli Intensity (MMI) VI hingga VIII, dan nilai Peak Ground Acceleration (PGA) dalam rentang 168-564 atau termasuk ke dalam kategori kegempaan tinggi. Seperti yang terlihat di Gambar 3, kondisi kegempaan ini memengaruhi seluruh daerah Labuan Bajo dan memicu gerakan tanah atau longsor.

Zona kerawanan gerakan tanah (longsor)

Daerah penelitian dibagi menjadi empat zona menurut tingkat kerawannya terhadap kejadian longsor, yakni zona

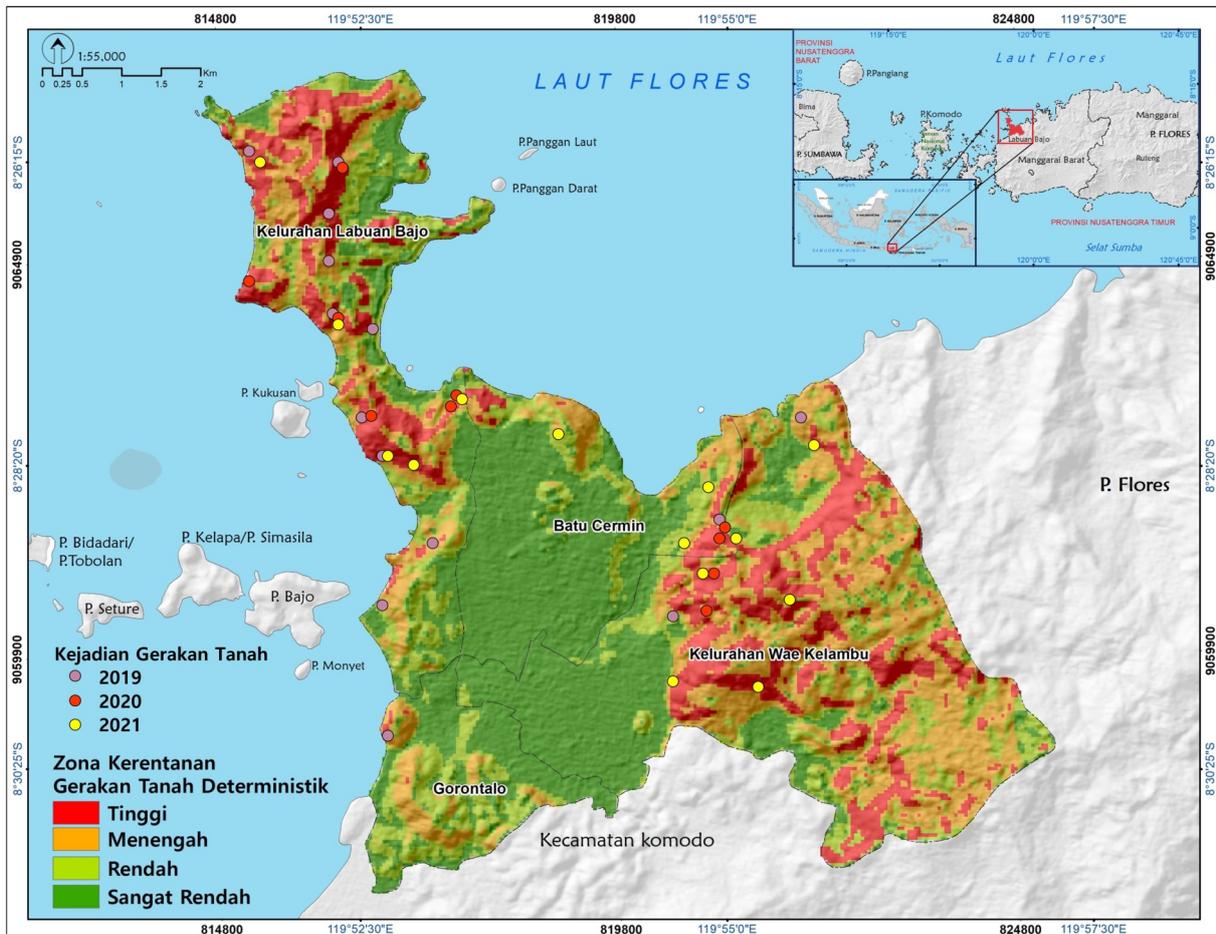


a). Tipe jatuhnya rombakan batuan



b). Tipe jatuhnya tanah berbutir halus-sedang

Gambar 4. Longoran tipe jatuhnya



Gambar 5. Peta zona kerawanan gerakan tanah (longsor) di Kota Labuan Bajo yang diperoleh dengan metode deterministik dan validasi menggunakan data kejadian pada 2019-2021

kerawanan sangat rendah, rendah, sedang, dan tinggi. Distribusi masing-masing zona kerawanan disajikan secara spasial di Gambar 5 dengan luasan zona menurut kelurahan/desa di Tabel 4. Sepertiga area penelitian memiliki tingkat kerawanan sangat rendah (34,73%), diikuti dengan tingkat kerawanan sedang (26,78%), rendah (20,98%), dan tinggi (17,51%). Menurut wilayah administrasi, Kelurahan Wae Kelambu didominasi dengan tingkat kerawanan sedang (16,74% dari total area penelitian), Kelurahan Labuan Bajo dengan tingkat kerawanan rendah (6,79%), dan dua desa/kelurahan lainnya dengan tingkat kerawanan sangat rendah, yakni Batu Cermin (12,7%) dan Gorontalo (4,87%).

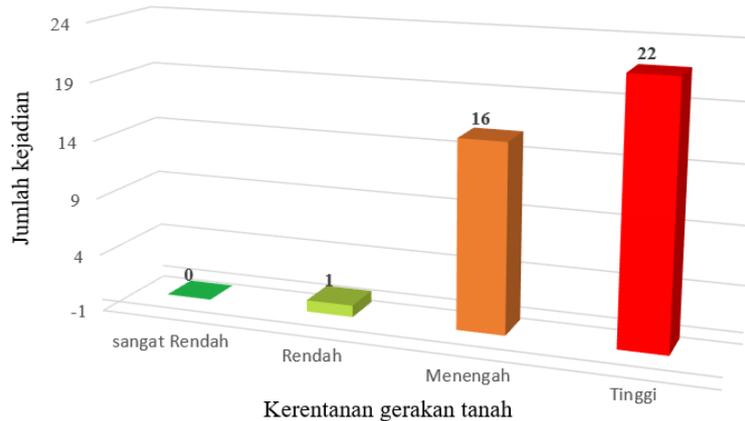
Setiap zona memiliki jumlah kejadian longsor yang berbeda pada 2019-2021 (Gambar 6). Longsor paling banyak terjadi di zona kerawanan tinggi (22), diikuti dengan zona kerawanan sedang (16) dan rendah (1). Terdapat kecenderungan bahwa longsor lebih banyak terjadi di zona kerawanan yang lebih tinggi dan bahwa kejadian longsor hampir tidak pernah ditemukan di zona kerawanan sangat rendah hingga rendah.

Menurut parameter penentu kerawanan gerakan tanah (longsor), kerawanan sangat rendah dicirikan dengan kemiringan lereng $<3^\circ$ (landai-datar), kondisi batuan penyusun tak lapuk (belum terjadi proses pelapukan), dan

Tabel 4. Luas zona kerawanan gerakan tanah (longsor) di Labuan Bajo menurut kelurahan/desa

No	Desa	Sangat Rendah		Rendah		Sedang		Tinggi	
		km ²	%						
1	Kel. Labuan Bajo	2,34	5,40	2,94	6,79	2,81	6,49	2,88	6,66
2	Kel. Wae Kelambu	5,02	11,59	3,39	7,82	7,25	16,74	4,36	10,07
3	Batu Cermin	5,57	12,87	1,27	2,93	0,80	1,84	0,32	0,74
4	Gorontalo	2,11	4,87	1,49	3,43	0,74	1,72	0,02	0,05
	Total	15,04	34,73	9,08	20,98	11,60	26,78	7,58	17,51

Sumber: Analisis Data (2021)



Gambar 6. Jumlah kejadian gerakan tanah (longsor) di setiap zona kerawanan (Kristiawan dkk., 2019; BPBD, 2022)

tekstur pasir dengan butiran halus-sedang. Zona ini terdistribusi di pusat Kota Labuan Bajo (15,04 km² atau 34,73% dari total area) dengan morfologi dataran dan tidak ada kejadian longsor tercatat pada 2019-2021. Zona kerawanan rendah memiliki potensi kejadian longsor dengan proporsi 5-10% dari total kejadian longsor aktual. Zona ini dicirikan oleh kemiringan lereng 3-9° (landai) hingga 17-36° (sangat terjal), pelapukan dengan intensitas rendah, dan berjarak 2-5 km dari zona patahan. Tingkat kerawanan rendah terdistribusi mengelilingi area Kota Labuan Bajo hingga batas lereng kaki perbukitan tufa dan perbukitan batugamping Karst Nggorang bagian selatan (9,08 km² atau 20,98%). Di zona ini, terdapat satu kejadian longsor tipe jatuhnya di Desa Batu Cermin pada 2021.

Zona kerawanan sedang memiliki potensi kejadian longsor dengan proporsi 10-25% dari total kejadian longsor aktual. Zona ini dicirikan dengan morfologi bergelombang hingga perbukitan, kemiringan lereng 9-33° (terjal-curam), material penyusun batuan bersifat lepas-lepas (endapan sedimen lepas), intensitas pelapukan sedang, berada relatif dekat dengan zona patahan (2-5 km), dan termasuk kawasan rawan kegempaan sedang-tinggi. Zona ini mendominasi area pesisir pantai berbukit (26,78 km² atau 26,78%). Seperti yang terlihat di Gambar 6, tercatat sebanyak enam kejadian longsor pada 2019, empat pada 2020, dan enam pada 2021 di zona ini.

Zona kerawanan tinggi merupakan zona dengan kejadian longsor yang paling sering, yakni dengan proporsi >25% dari total kejadian longsor aktual. Menurut data historis di Gambar 6, terdapat total 22 kejadian longsor di zona ini, yakni delapan pada 2019, enam pada 2020, dan delapan

pada 2021 di zona ini. Walaupun zona ini memiliki luasan terendah dibandingkan dengan zona lainnya (7,58 km² atau 17,51%), proporsi kejadian yang tinggi menunjukkan bahwa zona ini terpapar bahaya longsor yang tinggi. Kerawanan tinggi dicirikan dengan kemiringan lereng >33° (terjal), material penyusun batuan bersifat lepas-lepas (sedimen lepas mendominasi), pelapukan intensif (kondisi lapuk sedang hingga sangat lapuk yang menghasilkan ketebalan pelapukan yang relatif tebal). Seperti yang terlihat di Gambar 5, tingkat kerawanan ini ditemukan di puncak-puncak perbukitan berlereng terjal di bagian barat daya daerah penelitian, perbukitan tufa dasitan, dan perbukitan batugamping Karst Nggorang di bagian tenggara.

KESIMPULAN

Di Kota Labuan Bajo, terdapat empat (4) zona kerawanan gerakan tanah (longsor) dengan kemiringan lereng sebagai faktor penentu yang dominan. Kota ini memiliki tingkat kerawanan yang umumnya sangat rendah (15,04 km² atau 34,73% dari total area penelitian), diikuti dengan kerawanan rendah (9,08 km² atau 20,98%), sedang (26,78%), rendah (20,98%), dan tinggi (17,51%). Terdapat kecenderungan bahwa proporsi kejadian longsor meningkat seiring dengan tingkatan kerawanan gerakan tanah (longsor), yakni 5% dari total kejadian longsor aktual di zona kerawanan rendah, 5-15% di zona kerawanan sedang, dan >25% di zona kerawanan tinggi. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penentuan dan perencanaan lahan di masing-masing zona, sebagai contoh permukiman tidak dibangun di zona kerawanan sedang-tinggi untuk mengurangi risiko longsor, pelandaian

atau penguatan sudut di lereng terjal, dan pemberian marka zona bahaya gerakan tanah atau longsor.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ini merupakan analisis lanjut dari kegiatan Perencanaan Pembangunan Persemaian Modern Labuan Bajo Provinsi Nusa Tenggara Timur. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kesatuan Pengelolaan Hutan (KPH) Labuan Bajo Wilayah Manggarai Barat dan juga Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK) Republik Indonesia yang telah memfasilitasi dan mendukung penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Penulis Pertama Erik Febriarta: mendisain metode penelitian, analisis data dan membuat naskah publikasi. **Penulis Kedua** melakukan analisis dan interpretasi hasil. **Penulis Ketiga** Aditya Pandu Wicaksono: melakukan pengolahan/pemodelan dengan system informasi geografis. **Penulis Keempat** Ajeng Larasati: melakukan perhitungan skoring pemodelan dan mereview naskah publikasi

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, A., Lopulisa, C., Imran, A. M., & Baja, S. (2018). Mineral Tanah sebagai Indikator Stabilitas Tanah pada Daerah Berlereng: Studi Kasus Tombolopao Kabupaten Gowa. *Jurnal Ecosolum*, 7(1), 33. <https://doi.org/10.20956/ecosolum.v7i1.5214>
- Ambi, F. N., Sutadji, H. I., Geru, A. S., & Louk, A. C. (2020). Analisis Kecenderungan (Trend) Suhu Udara Dan Curah Hujan Di Pulau Flores (Labuan Bajo, Ruteng, Maumere, Dan Larantuka). *Jurnal Fisika : Fisika Sains Dan Aplikasinya*, 5(1), 42–56. <https://doi.org/10.35508/fisa.v5i1.1962>
- BAPPEDA. (2011). *Penyusunan Master Plan Air Minum Bersih Dalam Kota Labuan Bajo Kabupaten Manggarai Barat Provinsi Nusa Tenggara Timur* (Laporan Ak). Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Pemerintah Kabupaten Manggarai Barat.
- BIG. (2018). *DemNas Labuan Bajo Lembar 2007: 41 dan 42*. Badan Informasi Geospasial. <https://doi.org/10.20956/ecosolum.v7i1.5214>
- BMKG. (2020a). *Analisis Curah Hujan Nusa Dasarian Tenggara Hari-an*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). <http://www.meteoalor.id/siaran-pers&info-aktual/informasi-iklim-prov-ntt-dasarian-1-juli-2020.php>.
- BMKG. (2020b). *Analisis Hujan April 2020 dan Prakiraan Hujan Juni, Juli dan Agustus 2020*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).
- BMKG. (2020c). *Analisis Hujan Juni 2020 dan Prakiraan Hujan Agustus, September dan Oktober 2020*. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG).
- BMKG. (2020d). *Analisis Hujan Mei 2020 dan Prakiraan Juli, Agustus dan September 2020*. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Pusat Informasi Perubahan Iklim Kedepkatan Bidang Klimatologi Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- BNPB. (2011). *Indek Rawan Bencana Indonesia*. BNPB.
- BNPB. (2016). *Risiko Bencana Indonesia*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB).
- Boni, R., Martelli, L., Massa, M., Mascandola, C., & Petronio, L. (2020). Characteristics of landslide path dependency revealed through multiple resolution landslide inventories in the Nepal Himalaya. *Engineering Geology*, 105722. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105722>
- BPBD. (2022). *Laporan Bencana Alam Longsor*. Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Nusa Tenggara Timur. <https://bpbd.nttprov.go.id/Berita/detail/111/Laporan-Bencana-Alam-Longsor>
- BSN. (2016). *Standar Nasional Indonesia (SNI) 8291:2016 tentang Penyusunan dan Penentuan Zona Kerentanan Gerakan Tanah*. Badan Standardisasi Nasional (BSN).
- Collico, S., Arroyo, M., Urgeles, R., Gràcia, E., Devincenzi, M., & Pérez, N. (2020). Probabilistic mapping of earthquake-induced submarine landslide susceptibility in the South-West Iberian margin. *Marine Geology*, 429(July). <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.106296>
- Edison, M. S. (2022). Curah Hujan Tinggi di Manggarai Barat, Waspada Longsor. *Pikiran Rakyat*. <https://labuanbajoterkini.pikiran-rakyat.com/peristiwa/pr-1643410693/curah-hujan-tinggi-di-manggarai-barat-waspada-longsor>
- Enrique, M., & Milagros, P. R. (2017). *Practical Decision Making: An Introduction to the Analytic Hierarchy Process (AHP) Using Super Decisions*. Springer Briefs in Operations Research.
- ESDM. (2009). *Keencanaan: Zona Kerentanan Gerakan Tanah*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Badan Geologi (ESDM). <https://geoportal.esdm.go.id/keencanaan>
- Fadhil, H. (2019). Orang Tewas, 3 Hilang, dan 684 Mengungsi Akibat Longsor di NTT. *DetikNews*. <https://news.detik.com/berita/d-4460827/5-orang-tewas-3-hilang-dan-684-mengungsi-akibat-longsor-di-ntt>
- Fahmi, Y. (2019). Longsor dan Banjir di Labuan Bajo Renggut 2 Korban Jiwa. *Liputan 6*. <https://www.liputan6.com/news/read/3912603/longsor-dan-banjir-di-labuan-bajo-renggut-2-korban-jiwa>
- Febriarta, E., Permatasari, A. L., & Suherningtyas, I. A. (2020). *Modul 01 Penilaian & Penentuan Zona Kerentanan Gerakan Tanah (Longsor) Pendekatan Analytical Hierarchy Process (AHP)*. Fakultas Sains dan Teknologi Universitas AMIKOM Yogyakarta.
- Febriarta, E., & Shofarini, D. I. (2021). Penilaian Zona Kerentanan Air Tanah Terhadap Pencemaran dengan Metode SINTACS di Ranai (Pulau Bunguran). *Jurnal Wilayah Dan Lingkungan*, 9(1), 34–49. <https://doi.org/10.14710/jwl.9.1.34-49>
- Febriarta, E., & Wibowo, Y. A. (2021). Kerentanan Gerakan Tanah Menggunakan Teknik Geospasial Statistik di Macang Pacar, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Geografi*, 18(1), 9–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.15294/jg.v18i1.26234>
- Hadi, D. W. (2020). *Pembangunan Persemaian Modern Mendukung Wisata Labuan Bajo*. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLKH).
- Jahang, B. S. S. (2021). Ruas jalan negara Labuan Bajo-Ruteng tertutup tanah longsor. *ANTARA*. <https://www.antaranews.com/berita/2582345/ruas-jalan-negara-labuan-bajo-ruteng-tertutup-tanah-longsor>
- Kristiawan, Y., Putra, I. E., & Kharis, S. (2019). Inventarisasi Gerakan Tanah Paska Bencana Longsor 7 Maret 2019 Di Jalur Trans Nusa Kabupaten Manggarai Barat, Nusa Tenggara Timur. *Bulletin Vulkanologi Dan Bencana Geologi*, 13(1), 33–40.
- Lombardo, L., Tanyas, H., & Nicu, I. C. (2020). Spatial modeling of multi-hazard threat to cultural heritage sites. *Engineering Geology*, 277(July). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105776>
- Lu, Y., Xu, H., Wang, Y., & Yang, Y. (2017). Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: A case in Huai'an City. *Water Resources and Industry*, 18(October), 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2017.10.001>
- Martin, K. (2015). *Landslide Databases as Tools for Integrated Assessment of Landslide Risk*. Springer.
- Miyagi, T. (2018). *Landslide Dynamic Volume 1: Fundamental, Mapping and Monitoring, Landslide Mapping Through the Interpretation of Aerial Photographs*. Springer.
- Mulyono, A., & Iqbal, P. (2015). Karakteristik Fisik Tanah Longsor di Jalur Transek Liwa-Bukit Kemuning Lampung Barat. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 6(1), 9–18.
- Paksi, J. A. I., & Pertiwi, D. A. S. (2018). Analisis Kondisi Atmosfer dengan Memanfaatkan Citra Satelit Cuaca dan Karakteristik

- Tanah pada Kejadian Tanah Longsor di Pesisir Barat Lampung Sepanjang Tahun 2014. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 9(2), 65–75.
- PATGTL. (2018). *Cekungan Air Tanah (CAT)*. Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://geoportal.esdm.go.id/geologi/>
- Perka BNPB. (2012). *Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana Nomor 02 tahun 2012*. Badan Nasional Penganggulangan Bencana (BNPB).
- Permen PU. (2007). *Peraturan Menteri Pekerjaan Umum (Permen PU) Pedoman Penantaan Ruang Kawasan Rawan Bencana longsor No. 22/PRT/M/207*. Menteri Pekerjaan Umum.
- Pitaloka, I., Suprayogi, A., & Nugraha, A. (2018). Identifikasi Daerah Rawan Longsor Dengan Menggunakan Metode Smorph Dan Sig (Studi Kasus : Kecamatan Semarang Barat). *Jurnal Geodesi Undip*, 7(4), 176–184.
- Priyono. (2015). Hubungan Klasifikasi Longsor, Klasifikasi Tanah Rawan Longsor dan Klasifikasi Tanah Pertanian Rawan Longsor. *GEMA*, 1(1), 1602–1616.
- PSG. (2018). *Geologi* (ESDM (Ed.)). Pusat Survei Geologi, Pemutakhiran Peta Potensi Energi Baru Terbarukan, Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- PVMBG. (2018). *Kawasan Rawan Bencana Gempa Bumi Indonesia* (Juni 2018). Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, Badan Geologi. <https://geoportal.esdm.go.id/kebencanaan/>
- PVMBG. (2020). *Kawasan Rawan Bencana (KRB) Gempabumi*. Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). <https://geoportal.esdm.go.id/kebencanaan/>
- PVMBG. (2021a). *Wilayah Potensi Gerakan Tanah Di Provinsi Nusatenggara Timur Bulan November 2021*. Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <http://www.vsi.esdm.go.id/index.php/gerakan-tanah/kejadian-gerakan-tanah/1519-laporan-singkat-pemeriksaan-gerakan-tanah-di-kecamatan-pulung-kabupaten-ponorogo-provinsi-jawa-timur>
- PVMBG. (2021b). *Zona Kerentanan Gerakan Tanah Indonesia* (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (Ed.)). Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Raharjo, P. D., Widiyanto, K., Winduhutomo, S., & Al' Afif, M. (2019). Peranan Geomorfologi dalam Perencanaan Bangunan Zona Ancaman Longsor Tinggi di Kawasan Geopark Karangsembung-Karangbolong Bagian Utara. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 10(3), 139–148.
- Rahmad, R., Suib, S., & Nurman, A. (2018). Aplikasi SIG Untuk Pemetaan Tingkat Ancaman Longsor Di Kecamatan Sibolangit, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara. *Majalah Geografi Indonesia*, 32(1), 1. <https://doi.org/10.22146/mgi.31882>
- Ratman, N., & Yasin, A. (1978). *Peta Geologi Lembar Komodo, Nusatenggara*. Direktorat Geologi.
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill Book Company.
- Saaty, T. L. (2004). Decision making — the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP). *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1–35. <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>
- Sassa, K., Guzzetti, F., Yamagishi, H., Arbanas, Ž., Casagli, N., McSaveney, M., & Dang, K. (Eds.). (2018). *Landslide Dynamics: ISDR-ICL Landslide Interactive Teaching Tools*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57774-6>
- Sujit, M., & Subrata, M. (2019). *Geoinformatics and Modeling of Landslide Susceptibility and Risk, An RS and GIS based model building approach in the Eastern Himalaya*. Springer.
- Syahbana, A. J., Tohari, A., Soebowo, E., Sarah, D., & Sugianti, K. (2013). Desain Cut Slope Chart Untuk Evakuasi Kestabilan Lereng Diatas Badan Jalan, studi kasus: Cinona, Cisalak dan Cijengkol Kabupaten Bandung Barat Jawa Barat. *Jurnal Lingkungan Dan Bencana Geologi*, 4(1), 33–47.
- Syarafina, A. Z., & Sumunar, D. R. S. (2018). Tingkat dan Sebaran Risiko Bencana Tanah Longsor di Kecamatan Windusari Kabupaten Magelang. *Geomedia: Majalah Ilmiah Dan Informasi Kegeografian*, 15(2). <https://doi.org/10.21831/gm.v15i2.19559>
- Taufik, M., Kurniawan, A., & Putri, A. R. (2016). Identifikasi Daerah Rawan Tanah Longsor Menggunakan SIG (Sistem Informasi Geografis). *Jurnal Teknik ITS*, 2(1), 78–82.
- Titisari, A. D., Khul Husna, H. Z., Putra, I. D., & Indrawan, I. G. B. (2019). Penentuan Zona Kerentanan Longsor Berdasarkan Karakteristik Geologi dan Alterasi Batuan. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (Indonesian Journal of Community Engagement)*, 4(2), 141. <https://doi.org/10.22146/jpkm.35935>
- Todd, D. K., & Mays, L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Viaciago, G. (2013). *Landslide Science and Practice, Volume 3, Spatial Analysis and Modeling Geomechanical basis of Landslide Classification and Modeling of Triggering*. Springer.
- Wibowo, A., & Semedi, J. M. (2011). Model Spasial dengan SMCE untuk kesesuaian kawasan industri (Studi kasus di Kota Serang). *Jurnal Globe*, 13(1), 50–59.
- Wicaksono, A. P., Ferbriarta, E., Nurani, D. T. T., & Larasati, A. (2020). Evaluasi Kebutuhan Air Persemaian Di Kawasan Karst Nggorang Manggarai Barat, Labuan Bajo, Nusa Tenggara Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(3), 572–581. <https://doi.org/10.14710/jil.18.3.572-581>
- Yamagishi, H., & Bhandary, N. P. (Eds.). (2017). *GIS Landslide*. Springer Japan. <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54391-6>
- Zuidam, R. A. van. (1983). *Guide to Geomorphologic aerial photographic interpretation and mapping*. Enschede: Section of Geology and Geomorphology. ITC.