

Analisis Spasial Zonasi Kerentanan Longsor pada Ruas Jalan Nasional Banda Aceh – Aceh Jaya

T. Muharrizal Fadhli^{1*}, Rahmatun Maula², Abdul Jalil¹, Tika Hapsari³, Tarmizi⁴

¹Program Studi Teknik Sipil, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia

²Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Malikussaleh, Lhokseumawe, Aceh, Indonesia

³Program Studi Teknik Geologi, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh, Indonesia

⁴Program Studi Teknik Geofisika, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh, Aceh, Indonesia

*Koresponden email: tmuharrizalfadhli@unimal.ac.id

Diterima: 4 April 2026

Disetujui: 12 Mei 2026

Abstract

The Banda Aceh – Aceh Jaya National Road as the principal transportation corridor linking the capital of Aceh Province with the western districts. This 246 km roadway, constructed as part of the post-2004 tsunami reconstruction program funded by USAID, traverses mountainous terrains including the Paro, Kulu, and Geurutee. A total of 29 landslide events were recorded along this corridor during the 2020–2025 period. This research was conducted to map areas with high-susceptibility landslide zones along the road to support the development of a rapid evaluation framework for areas with elevated landslide vulnerability. The Analytical Hierarchy Process method has advantages, especially in landslide studies, to classify landslide hazard zones in detail. There are six main parameters used: lithology, slope gradient, relative relief, land cover, soil moisture, and rainfall intensity. The results indicate that 10 zones are classified as high landslide susceptibility. This model was verified using an event-based on 29 recorded landslide occurrences from 2020 to 2025. Based on the landslide ratio, 10 events (34.5%) occurred within high-susceptibility zones and 15 events (51.7%) within moderate-susceptibility zones. The distribution pattern of landslide occurrences suggests that the accuracy level of the model obtained can be categorized as a good model quality.

Keywords: *vulnerability zoning, analytical hierarchy process, banda aceh - aceh jaya national road*

Abstrak

Jalan Nasional Lintas Banda Aceh - Aceh Jaya merupakan penghubung utama ibukota Provinsi Aceh dengan kabupaten dibagian barat Aceh. Jalan sepanjang 246 km merupakan produk pasca Tsunami 2004 oleh USAID yang melintasi wilayah pegunungan Paro, Kulu, dan Geurutee. Peneliti mencatat telah terjadi 29 kali bencana longsor selama periode tahun 2020-2025. Penelitian ini dilakukan untuk memetakan zona kerentanan tinggi longsor di sepanjang ruas jalan sehingga kedepannya mampu membangun sistem *rapid evaluation* terhadap wilayah dengan kondisi kerentanan tinggi. Metode *Analytical Hierarchy Process* memiliki keunggulan terutama pada kajian tanah longsor karena mampu mengklasifikasikan zona kerawanan longsor secara rinci. Parameter utama yang digunakan pada penelitian ini yaitu parameter litologi, kemiringan lereng, relief relatif, tutupan lahan, kebasahan tanah dan curah hujan. Berdasarkan hasil analisis terdapat 10 zona yang memiliki kerentanan tinggi terhadap tanah longsor. Model ini divalidasi melalui pendekatan berbasis kejadian aktual yaitu 29 titik kejadian longsor periode tahun 2020-2025. Berdasarkan rasio titik longsor, 10 titik longsor (34,5%) berada pada zona kerentanan tinggi dan 15 titik (51,7%) berada pada zona kerentanan sedang. Pola distribusi kejadian longsor tersebut mengindikasikan tingkat akurasi model yang diperoleh dapat dikategorikan sebagai kualitas model baik.

Kata Kunci: *zonasi kerentanan, analytical hierarchy process, jalan nasional banda aceh - aceh jaya*

1. Pendahuluan

Jalan Nasional Lintas Banda Aceh - Aceh Jaya merupakan salah satu Infrastruktur jalan utama yang menghubungkan ibukota Provinsi Aceh dengan kabupaten - kabupaten yang berada di kawasan pantai barat Provinsi Aceh. Infrastruktur jalan mempunyai peranan strategis dalam meningkatkan pembangunan wilayah [1]. Aksesibilitas mendorong perkembangan ekonomi secara signifikan karena meningkatkan konektivitas antara wilayah pedesaan dengan perkotaan [2][1]. Selain fungsi ekonomi, aspek keselamatan

menjadi komponen penting dalam perencanaan dan operasional jalan raya untuk memastikan peningkatan aksesibilitas yang efektif dan berkelanjutan.

Jalan Nasional Lintas Banda Aceh - Aceh Jaya merupakan hasil rekonstruksi jalan pasca-Tsunami tahun 2004 sepanjang 246 km di pesisir barat Aceh yang melibatkan USAID (*United States Agency for International Development*) [3][4]. Jaringan jalan ini sangat penting untuk menghubungkan kabupaten - kabupaten yang berada di bagian barat Provinsi Aceh [5]. Ruas jalan ini melintasi wilayah pegunungan dengan karakteristik topografi yang kompleks, yaitu Pegunungan Paro, Kulu dan Geurutee yang dicirikan oleh kemiringan lereng yang curam serta tikungan yang tajam. Jalan pegunungan memiliki potensi bahaya gangguan aksesibilitas sangat tinggi [6]. Aktivitas lain seperti tektonik yang intens, topografi terjal serta frekuensi curah hujan yang tinggi menjadi salah satu faktor yang menjadikan infrastruktur jalan pegunungan sangat rentan terhadap kejadian aliran debris dan tanah longsor yang berpotensi menutup badan jalan selama periode hujan berlangsung [7][8][9]. Kejadian aliran debris dan tanah longsor merupakan ancaman serius bagi pengguna fasilitas jalan di wilayah pegunungan. Selain hal tersebut, runtuhnya batuan (*rockfall*) yang bersifat acak dengan volume material yang besar juga berpotensi menimbulkan dampak fatal terhadap aksesibilitas jalan pegunungan [6]. Peneliti menemukan telah terjadi 29 kali kejadian longsor di sepanjang jalan Banda Aceh – Aceh Jaya pada periode tahun 2020 – 2025. Informasi mengenai kejadian longsor diperoleh dari pengolahan data sekunder yang bersumber dari media massa cetak, dan platform berita daring dengan mempertimbangkan keterbatasan ketersediaan data resmi sehingga memungkinkan peneliti melakukan identifikasi kejadian secara temporal dan spasial.

Aksesibilitas jalan menjadi kebutuhan pokok dalam menjaga arus penumpang dan barang (logistik). Kerugian yang diakibatkan oleh kejadian tanah longsor akan signifikan ketika menutup ruas jalan utama [10]. Dampak yang dihasilkan bersifat multidimensional seperti kerusakan infrastruktur, terganggunya aktivitas ekonomi serta aksesibilitas dari kabupaten ke ibukota Provinsi Aceh. Dalam rangka mengevaluasi potensi bahaya longsor, pemetaan kerentanan longsor di sepanjang Jalan Nasional Lintas Banda Aceh – Aceh Jaya sangat penting dilakukan untuk mengurangi gangguan aksesibilitas jalan serta kerusakan akibat tanah longsor. Penelitian ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yaitu model pengambilan keputusan berbasis multikriteria (*Multi-Criteria Decision Making*) dengan membandingkan setiap parameter berdasarkan tingkat pengaruhnya dan memiliki keunggulan dalam kajian tanah longsor pada ruas jalan pegunungan [9][11][12]. Setiap parameter dianalisis menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Metode AHP umumnya dikombinasikan dengan SIG untuk memperkuat analisis spasial serta visualisasi peta kerawanan tanah longsor [12][13]. Tujuan penelitian ini adalah untuk memetakan zonasi dengan kerentanan tinggi potensi longsor di sepanjang ruas jalan nasional Banda Aceh – Aceh Jaya dan kedepannya mampu membangun sistem *rapid evaluation* terhadap wilayah dengan potensi tinggi longsor pada area penelitian.

2. Metode Penelitian

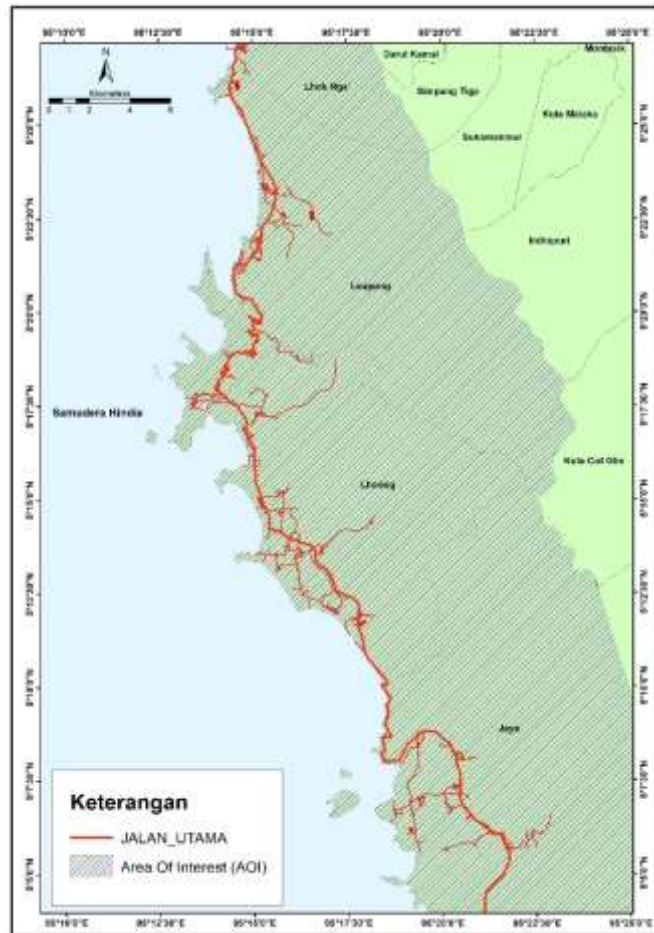
2.1 Lokasi

Lokasi penelitian berada di sepanjang jalan lintas Banda Aceh – Aceh Jaya. Cakupan wilayah penelitian secara koordinat geografis antara 5°5'0" N - 5°25'0" N dan 95°10'0" E - 95°25'0" E (**Gambar 1**). Lokasi penelitian merupakan ruas jalan nasional yang menghubungkan ibukota Provinsi Aceh dengan kabupaten - kabupaten yang berada di kawasan pantai barat Provinsi Aceh dan langsung berbatasan dengan tebing – tebing tanah maupun batuan serta relief tinggi sehingga menjadi area yang berpotensi untuk terjadinya longsor.

2.2. Prosedur Penelitian

Parameter utama yang digunakan pada penelitian ini adalah parameter litologi, kemiringan lereng, relief relatif, tutupan lahan, kebasahan tanah, dan curah hujan (**Tabel 1**). Data spasial dari setiap parameter (**Tabel 1**) selanjutnya diolah menjadi data raster dan diberikan bobot dengan mengacu pada faktor evaluasi bahaya longsor. Bobot prioritas untuk tingkat kerentanan longsor diperoleh melalui metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dan digabungkan dengan cara tumpang susun [14]. Dalam kajian kebencanaan, AHP dimanfaatkan untuk menyusun peta kerawanan tanah longsor secara rinci dengan mengklasifikasikan wilayah ke dalam beberapa zona risiko mulai dari rendah hingga sangat tinggi berbasis Sistem Informasi Geografis [2]. Keakuratan hasil analisis sangat bergantung pada konsistensi dan objektivitas dalam proses perbandingan berpasangan antarparameter [13][15][2]. Seluruh parameter

akan diberikan nilai skor yang kemudian dikalikan dengan nilai bobot dari masing-masing parameter yang mempunyai pengaruh terhadap terjadinya tanah longsor. Penentuan nilai bobot parameter dilakukan dengan membandingkan tiap parameter untuk menentukan besar pengaruh parameter terhadap tanah longsor. Perbandingan berpasangan (*pairwise comparisons*) dilakukan pada setiap parameter. Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) memiliki konsistensi yang tidak baik untuk mendapatkan nilai matrik sehingga diperlukan perhitungan konsistensi indeks untuk memperoleh hasil analisis yang sesuai [16].



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Tabel 1. Parameter penelitian dan sumber data [17][14].

No	Parameter Penelitian	Sumber data
1	Data litologi batuan	https://geoportal.esdm.go.id/geologi/
2	Data Kemiringan Lereng	http://tides.big.go.id/DEMNAS/
3	Data Relief Relatif	http://tides.big.go.id/DEMNAS/
4	Data Tutupan Lahan	https://earthexplorer.usgs.gov/
5	Data Kebasahan Tanah	https://earthexplorer.usgs.gov/
6	Data Curah hujan	https://power.larc.nasa.gov/

Perhitungan uji konsistensi yang diawali dengan menghitung *Lambda max* dengan mengikuti persamaan (1). Menghitung nilai *Consistency Index* (CI) sesuai dengan persamaan (1) dan *Consistency Ratio* (CR) berdasarkan persamaan (2). CI merupakan hasil perhitungan *consistency index*, dan RI merupakan nilai *random consistency index* yang terdapat pada **Tabel 2**. Jika didapatkan nilai $CR < 0,1$ maka hasil perhitungan matriks perbandingan dikatakan konsisten. Sebaliknya, jika nilai $CR > 0,1$ menunjukkan bahwa hasil matriks perbandingan data tidak dapat dibenarkan [16].

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \tag{1}$$

Keterangan:

n = banyak parameter

CI = indeks konsisten (*Consistent Index*)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Keterangan:

RI = indeks random konsistensi

Tabel 2. Hubungan indeks random konsistensi (RI) terhadap banyaknya parameter [18].

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

a. *Data Geologi*

Data geologi memainkan peranan penting dalam menentukan kerentanan tanah longsor di wilayah pegunungan [19]. Kestabilan lereng tidak hanya bergantung pada variasi jenis batuan tetapi juga pada ukuran butir materialnya, tanah berbutir kasar dengan kandungan kerikil memiliki tingkat kerentanan lebih tinggi dibandingkan material berbutir halus [20][21][22][23]. Parameter litologi diekstraksi dari Peta Geologi Lembar Banda Aceh berdasarkan klasifikasi yang tertera pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Klasifikasi Parameter Litologi [17].

Litologi	Harkat
Kuarsit dan batugamping	0,2
Granit, gabbro	0,3
Gneiss	0,4
Batuan sedimen dominan batu pasir tersemen dengan baik	1,0
Batuan sedimen dominan batu pasir tidak tersemen dengan baik	1,3
Sabak dan filit	1,2
Sekis	1,3
Serpil berselingan dengan batu lempung	1,8
Serpil, filit dan sekis yang sudah lapuk	2,0

b. *Data Kemiringan Lereng*

Faktor kemiringan lereng merupakan faktor yang berkorelasi langsung terhadap tanah longsor. Lereng yang lebih curam lebih rentan terhadap longsor akibat gaya gravitasi yang bekerja pada material tanah dan batuan [24]. Lereng dengan sudut mencapai 45° menunjukkan penurunan stabilitas yang signifikan [21]. Data untuk pembuatan peta kemiringan lereng adalah DEM (*Digital Elevation Model*) Nasional. Konstruksi jalan dapat berdampak signifikan terhadap stabilitas lereng ketika jalan dibangun di area pegunungan karena dapat menciptakan lereng curam baru yang langsung berhadapan dengan jalan [21]. Peta kemiringan lereng dibagi menjadi 5 kelas dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Klasifikasi Kemiringan Lereng [17].

Kemiringan (°)	Keterangan
>45	Sangat Terjal
36-45	Terjal
26-35	Sedang
16-25	Landai
<16	Sangat Landai

c. Data Relief Relatif

Peta relief relatif didapatkan dari pengolahan data raster elevasi DEMNAS dengan menghitung tingkat energi topografi, yaitu selisih antara elevasi maksimum dan minimum dalam satuan grid. Nilai energi topografi merepresentasikan tingkat variasi ketinggian permukaan dan berbanding lurus dengan potensi ketidakstabilan lereng. Perbedaan elevasi yang semakin besar berkorelasi positif dengan risiko terjadinya tanah longsor [22]. Peta relief relatif dibagi tiga kelas dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Klasifikasi Kelas Relief Relatif [17].

Kelas Relief	Relief Relatif (Meter)
Rendah	<100
Sedang	100-300
Tinggi	>300

d. Data Tutupan Lahan

Penentuan area tutupan lahan pada lokasi penelitian dilakukan menggunakan metode *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dari data citra satelit Landsat 8. Band yang digunakan adalah band 5 yang menyatakan kondisi biomassa dan delineasi tubuh air, dan band 4 yang menggambarkan tingkat absorpsi klorofil pada vegetasi. NDVI diperoleh perbandingan rasio antara selisih *band Red* (R) dan *near-infrared* (NIR) dengan jumlah keduanya.

$$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R) \quad (3)$$

$$NDVI = (Band5 - Band4) / (Band5 + Band4) \quad (4)$$

Keberadaan vegetasi berperan dalam meningkatkan kestabilan lereng melalui penguatan struktur tanah. Vegetasi terutama pohon dan semak dapat secara signifikan meningkatkan stabilitas lereng melalui penguatan akar karena mampu meningkatkan kohesi tanah dan kekuatan geser [25][26]. Peta tutupan lahan dibagi ke dalam empat kelas dapat dilihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Klasifikasi Tutupan Lahan [17].

Klasifikasi Tutupan Lahan	Nilai
Tidak Ada Vegetasi	<0,1
Vegetasi Rendah	0,1 – 0,38
Vegetasi Sedang	0,38 – 0,53
Vegetasi Lebat	0,53 - 1

e. Data Kebasahan Tanah

Informasi terkait dengan kebasahan lahan memiliki peran penting dalam proses terjadinya longsor. Permukaan lereng yang retak ketika proses pembukaan lahan menyebabkan daya hisap air tanah akan semakin tinggi [27]. Curah hujan tinggi menyebabkan peningkatan kelembapan tanah sehingga mempengaruhi tekanan air pori dan mengurangi kekuatan tanah [27][28]. Data kebasahan lahan diperoleh metode NDWI (*Normalized Difference Wetness Index*) dengan membandingkan rasio *band Near infrared* (NIR) dan Band SWIR dari data citra satelit Landsat 8. Peta kebasahan lahan kemudian dibagi menjadi lima kelas dapat dilihat pada **Tabel 7**.

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (5)$$

$$NDWI = (Band5 - Band6) / (Band5 + Band6) \quad (6)$$

Tabel 7. Klasifikasi Kebasahan Lahan [17].

Klasifikasi Kebasahan	Nilai
Kering	<0,1
Lembab	0,1 – 0,27
Basah	0,27 – 0,37
Jenuh	0,37 – 0,47
Mengalir	0,47 - 1

f. Data Curah Hujan

Intensitas curah hujan merupakan salah satu pemicu terjadinya bencana alam contohnya banjir [29] terkhusus pada penelitian ini adalah longsor di wilayah jalan pegunungan terutama pada wilayah dengan kemiringan lereng yang curam dan kondisi litologi yang terdeformasi [30][31]. Pemahaman terhadap perilaku aliran air hujan pada wilayah pegunungan menjadi sangat penting terhadap faktor keamanan lereng terutama dalam evaluasi stabilitas lereng di bawah kondisi hujan. Jumlah data curah hujan adalah 10 titik yang tersebar di sepanjang wilayah penelitian untuk periode tahun 2023 – 2025. Data yang digunakan merupakan rata-rata curah hujan maksimum pada rentang periode tahun 2023 – 2025. Pengkelasan parameter curah hujan menjadi 5 kelas dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Klasifikasi Curah Hujan [17].

Klasifikasi Curah Hujan	Nilai (mm/hari)
Hujan Ringan	0,5 - 20
Hujan Sedang	20 - 50
Hujan Lebat	50 - 100
Hujan Sangat Lebat	100 - 150
Hujan Ekstrem	>150

2.3. Klasifikasi Kerentanan Longsor

Landslide Hazard Evaluation Factor (LHEF) merupakan suatu pendekatan yang penting untuk penilaian bahaya longsor di suatu wilayah, khususnya pada ruas jalan di wilayah pegunungan. Metode ini menerapkan pendekatan sistematis untuk mengevaluasi dan memetakan tingkat kerawanan longsor untuk perencanaan wilayah [32]. Dengan menggabungkan berbagai sumber data, metode LHEF mampu mengidentifikasi zonasi kerentanan longsor dan menjadi masukan dalam perumusan strategi mitigasi untuk mengurangi dampak longsor terhadap jaringan jalan. Hasil pengolahan data setiap parameter digabungkan dengan metode tumpang susun (*Overlay*) untuk mendapatkan peta tingkat kerawanan longsor dengan klasifikasi dibagi menjadi 3 kelas dapat dilihat pada **Tabel 9**).

Tabel 9. Klasifikasi Kerentanan Longsor [17].

Kelas Relief	Rentang Nilai
Tinggi	<100
Sedang	100-300
Rendah	>300

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil

Hasil perhitungan bobot masing-masing kriteria beserta nilai *Consistency Ratio* (CR) disajikan pada (Tabel 10) berdasarkan pengolahan data menggunakan matriks perbandingan berpasangan (*pairwise comparison matrix*). Nilai *Consistency Ratio* (CR) yang diperoleh sebesar $\leq 0,075$ menunjukkan bahwa perbandingan berpasangan yang dilakukan memiliki tingkat konsistensi pada batas yang dapat diterima. Hasil analisis AHP menunjukkan bahwa kemiringan lereng memiliki bobot tertinggi, yaitu sebesar 0,3 (30%), dibandingkan parameter lainnya. Temuan ini mengindikasikan bahwa variasi kemiringan lereng memiliki pengaruh paling signifikan terhadap potensi terjadinya longsor di sepanjang jalan nasional Banda Aceh – Aceh Jaya. Secara geomorfologi, kondisi lereng yang semakin curam terutama pegunungan cenderung meningkatkan ketidakstabilan massa tanah dan batuan, sehingga berkontribusi signifikan terhadap potensi terjadinya longsor pada jaringan jalan wilayah pegunungan. Kemiringan lereng merupakan salah satu faktor utama yang mengontrol terjadinya longsor [24][33][30]. Hasil peta tiap parameter dengan klasifikasi diselanjutnya dilakukan penggabungan dengan teknik tumpang susun untuk memperoleh peta zonasi kerentanan longsor di sepanjang Jalan Nasional Lintas Banda Aceh-Aceh Jaya.

a. Peta Geologi

Penyusunan peta geologi wilayah penelitian mengacu pada peta geologi regional lembar Banda Aceh (**Gambar 2a**). Wilayah penelitian tersusun oleh Alluvium Muda (Qh), merupakan endapan kerikil, pasir, lumpur dan endapan muda lainnya. Formasi Tangla (Tlt), merupakan batuan asal gunungapi,

batupasir, konglomerat kerakal, dan arenit kuarsaan. Formasi Batugamping Lamno (Mull), merupakan batugamping berwarna gelap dengan rombakan batuan gunungapi. Formasi Gunungapi Bentaro (Muvb), merupakan basal, aglomerat, retas mafik, dan pipa basal. Formasi Lho'nga (Mul), merupakan filit, serpih, sedimen gunungapi dan turbidit, batugamping, tipis. Formasi Lhoong (Mulh), merupakan wake gunungapi, sedikit batupasir dan batulanau, batuan gunungapi mafik dan batugamping. Formasi Batu gamping Raba (Murl), merupakan batugamping lempungan dan silikaan berwarna gelap, berlapis tipis.

Tabel 10. Hasil Perhitungan Bobot masing-masing kriteria dan *Consistency Ratio* (CR)

Perbandingan Berpasangan							
Parameter	kemiringan lereng	Litologi	Relief	Kebasahan tanah	Tutupan lahan	Curah hujan	
kemiringan lereng	1,0	2,0	5,0	2,0	5,0	3,0	
Litologi	0,5	1,0	5,0	2,0	4,0	2,0	
Relief	0,2	0,2	1,0	0,2	2,0	0,3	
Kebasahan tanah	0,5	0,5	6,0	1,0	3,0	0,3	
Tutupan lahan	0,2	0,3	0,5	0,3	1,0	0,3	
Curah hujan	0,3	0,5	3,0	3,0	3,0	1,0	

Pembobotan Parameter							
Parameter	kemiringan lereng	Litologi	Relief	Kebasahan tanah	Tutupan lahan	Curah hujan	Bobot
kemiringan lereng	0,4	0,4	0,2	0,2	0,3	0,4	0,3
Litologi	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,23
Relief	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,05
Kebasahan tanah	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,0	0,15
Tutupan lahan	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1	0,0	0,04
Curah hujan	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,1	0,17
Total	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

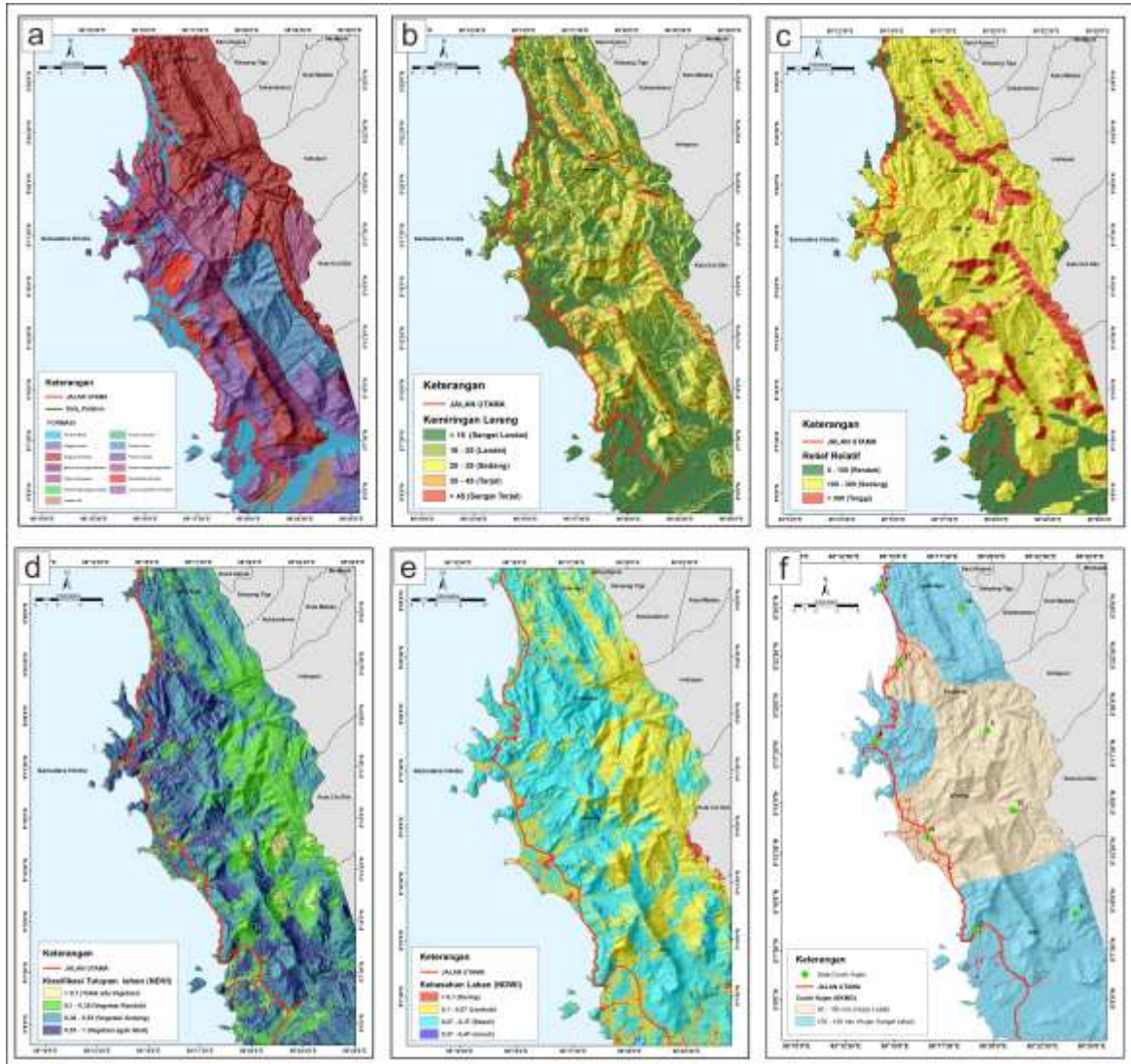
Perhitungan Nilai <i>Consistency Ratio</i> (CR)									
Parameter	Lereng	Litologi	Relief	Kebasahan tanah	Tutupan lahan	Curah hujan	Nilai (λ)	CI	CR
kemiringan lereng									
lereng	0,3	0,5	0,3	0,3	0,2	0,5	6,4804		
Litologi	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	6,6189		
Relief	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	6,1339		
Kebasahan tanah	0,2	0,1	0,3	0,2	0,1	0,1	6,4411	0,0931	0,0751
Tutupan lahan	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0	0,1	6,3213		
Curah hujan	0,1	0,1	0,2	0,5	0,1	0,2	6,7981		

b. Peta Kemiringan Lereng

Berdasarkan hasil pengolahan data raster elevasi dari data *Digital Elevation Model Nasional* (DEM_{Nas}). Kelas lereng terbagi atas lima, yaitu: sangat landai (<16°), landai (16–25°), sedang (25–35°), terjal (35–45°), dan sangat terjal (>45°) (**Gambar 2b**). Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi kelas lereng sangat dikontrol oleh kondisi topografi. Secara umum terlihat jaringan jalan lintas nasional Banda Aceh – Aceh Jaya berada di wilayah dengan kemiringan lereng sedang hingga terjal, yang mengindikasikan bahwa jaringan jalan tersebut memiliki potensi ketidakstabilan lereng yang relatif tinggi.

c. Peta Relief Relatif

Peta relief relatif berperan penting dalam delineasi batasan morfologi guna membedakan area lembah dan pegunungan dan daerah morfologi tidak beraturan. Dengan mengetahui energi topografi yang besar maka dapat mendeteksi potensi bidang gelincir untuk terjadinya longsor. Berdasarkan hasil pengolahan data, ruas jalan utama berbatasan langsung dengan area yang memiliki relief relatif sedang dengan kisaran energi topografi 100–300 meter dapat dilihat pada (**Gambar 2c**). Frekuensi longsor cenderung lebih tinggi di daerah dengan relief relatif antara 300 dan 400 [34]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa zona yang dilalui oleh jalan utama tersebut memiliki kerentanan terhadap potensi longsor.



Gambar 2. Hasil Analisis data setiap parameter; (a) Peta Geologi, (b) Peta Kemiringan Lereng, (c) Peta Relief Relatif, (d) Peta Tutupan Lahan, (e) Peta Kebasahan Tanah, (f) Peta Curah Hujan.

d. Peta Tutupan Lahan

Peta tutupan lahan disajikan pada (**Gambar 2d**) sebagai representasi spasial tingkat kerapatan vegetasi pada wilayah penelitian. Area yang berbatasan langsung dengan ruas jalan utama termasuk dalam kelas vegetasi sedang (hijau sedikit gelap) hingga vegetasi lebat (biru keunguan). Pada zona dekat pesisir didominasi warna kuning – hijau muda (NDVI rendah – sedang) yang dikelompokkan sebagai pemukiman dan tanah terbuka. Jalan utama yang melewati zona ini akan rentan longsor runtuh (*rockfall*) dari tebing pegunungan. Pada zona pegunungan didominasi warna biru – ungu (NDVI tinggi) dapat dikelompokkan sebagai hutan lebat dan vegetasi sehat yang menjadi kawasan resapan dan penting untuk kestabilan lereng. Hasil analisis tutupan lahan menegaskan bahwa kombinasi antara kondisi vegetasi, morfologi lereng, dan aktivitas manusia menjadi faktor penting dalam peningkatan resiko terjadinya longsor.

e. Peta Kebasahan Tanah

Peta kebasahan tanah menunjukkan tingkat kandungan air (kelembabapan) di dalam tanah pada suatu area dipengaruhi oleh curah hujan, jenis tanah, tutupan lahan, kemiringan lereng, dan drainase permukaan. Peta ini didapatkan dari perhitungan *Normalized Difference Water Index* (NDWI) dan fokus ke air permukaan (**Gambar 2e**). Sebagian besar wilayah perbukitan berbatasan langsung dengan jalan

utama didominasi oleh zona basah hingga jenuh yang ditandai oleh warna biru terang sampai biru gelap. Area ini terutama berada pada lereng – lereng curam dan lembah sempit yang berpotensi tinggi mengalami peningkatan tekanan pori ketika terjadi hujan lebat. Keberadaan jalan yang berada tepat dekat dengan lereng basah meningkatkan risiko terjadinya longsor dikarenakan kondisi air tanahnya relatif basah hingga sangat jenuh sepanjang tahun [34].

f. Peta Curah Hujan

Peta curah hujan dapat dilihat pada (**Gambar 2f**) menunjukkan distribusi intensitas hujan di wilayah pesisir barat Aceh, dengan dua kategori utama yaitu hujan lebat (50–100 mm) dan hujan sangat lebat (100–150 mm). Zona hujan lebat mendominasi sebagian besar wilayah Lhoong dan Leupung. Zona hujan sangat lebat berada pada wilayah Lhoknga, sebagian Kecil Lhoong dan Aceh Jaya, terutama pada daerah-daerah dengan topografi pegunungan serta lembah-lembah sempit yang mengarah ke pantai barat. Pola ini mengindikasikan bahwa daerah tersebut mengalami akumulasi curah hujan tinggi yang dapat memicu peningkatan aliran permukaan, erosi, serta potensi kejenuhan tanah pada lereng curam. Sebagian badan jalan berada tepat di bawah lereng perbukitan yang terpapar curah hujan 100–150 mm. Sementara itu, hanya sebagian kecil wilayah utara (Lhok Nga–Darul Kamal) yang berada pada zona hujan lebat (50–100 mm). Secara keseluruhan, peta ini menunjukkan bahwa hampir seluruh jalan utama berada dalam kawasan hujan sangat lebat, sehingga perlu penanganan yang lebih serius, seperti perbaikan drainase lereng, stabilisasi tebing, dan pemantauan rutin pada musim penghujan untuk mengurangi risiko bencana longsor dan gangguan jalan raya [12].

g. Peta Tingkat Kerawanan Longsor

Peta tingkat kerawanan longsor (**Gambar 3a**) menunjukkan bahwa wilayah dengan kerentanan tinggi (ditandai warna merah) terutama berada di sepanjang daerah berlereng curam dan jalur pegunungan dari utara hingga selatan wilayah penelitian. Kondisi ini mengindikasikan perlunya prioritas mitigasi pada zona-zona kritis tersebut, terutama di sekitar jaringan jalan utama yang rentan terdampak aktivitas geologi dan curah hujan tinggi.

3.2 Pembahasan

Berdasarkan hasil pengolahan data, diperoleh bahwa wilayah penelitian seluas 63.242 ha diklasifikasikan menjadi tiga kelas kerentanan longsor yaitu rendah, sedang, dan tinggi dapat dilihat pada (**Tabel 11**).

Tabel 11. Zona Kerentanan Luasan Area

Zona Kerentanan	Luas Area (Ha)	Area (%)
Rendah	15.110,9	23,9
Sedang	39.056,0	61,8
Tinggi	9.075,0	14,3
Total	63.241,9	100,0

Zona kerentanan sedang mencakup area terluas, yaitu 39.056,0 ha atau sekitar 61,8% dari total wilayah penelitian. Wilayah ini umumnya melampar dari Barat Laut – Tenggara dan beberapa lokasi lain yang tidak tersebar dengan luas. Zona kerentanan rendah memiliki luasan 15.110,9 ha atau sekitar 23,9% dari wilayah penelitian. Zona ini umumnya berada pada bagian Timur Laut dan sebagian kecil Tenggara. Zona kerentanan tinggi mencakup 9.075,0 ha atau sekitar 14,3% dari total wilayah penelitian dan memiliki kecenderungan mengikuti pola sebaran perbukitan dan beberapa wilayah lain yang berada dekat dengan jalan raya. Analisis tidak hanya dilakukan secara menyeluruh tetapi difokuskan pada koridor ruas Jalan Nasional Lintas Banda Aceh–Aceh Jaya. Tujuan pemilahan ini untuk mengidentifikasi segmen-segmen jalan yang paling rentan terhadap kejadian longsor [35]. Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa terdapat 10 Zona yang memiliki kerentanan tinggi (**Gambar 3b**).

Setiap titik zona dengan tingkat kerentanan tinggi dominan berbatasan langsung dengan tebing area pegunungan seperti zona 10 yang merupakan jalan utama menuju kota Calang atau kota Meulaboh yang apabila terjadi bencana longsor maka perjalanan akan terputus dan tidak ada jalan alternatif. Model

zona kerentanan longsor divalidasi melalui pendekatan berbasis kejadian aktual (*event-based validation*) dengan menggunakan 29 titik kejadian longsor yang terdokumentasi sepanjang periode 2020–2025 di sepanjang jalan lintas Banda Aceh – Aceh Jaya dapat dilihat pada **Tabel 12**.

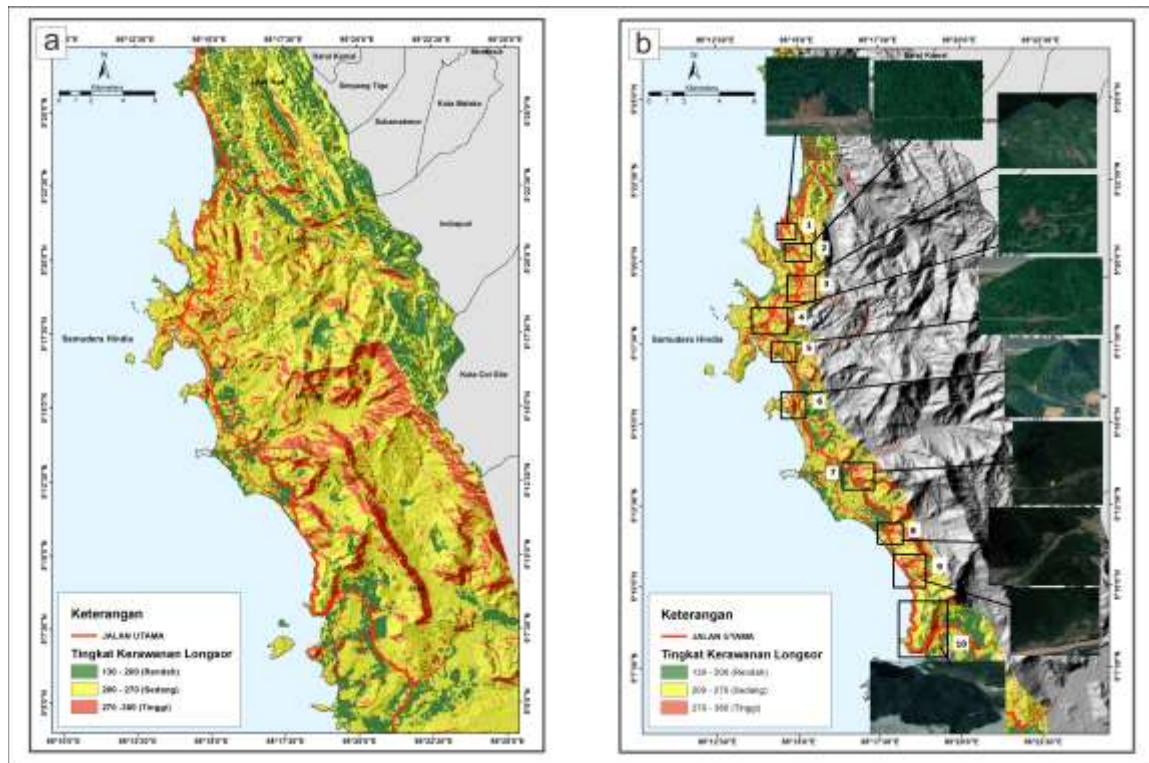
Tabel 12. Data Kejadian Longsor di sepanjang Jalan Nasional Banda Aceh - Aceh Jaya 2020 - 2025

No	Waktu Kejadian	Lokasi_dan_KM	Latitude	Longitude	Rujukan Media
1	29-Nov-25	Lhokseudu, KM 27-28	5,3852	95,2415	Serambinews.com
2	11-Nov-25	Gn. Geurutee, Babah le (KM 64)	5,135	95,28	Antara Aceh
3	18 Okt 2025	Kawasan Lhokseudu (KM 27)	5,43473	95,25042	AJNN.net
4	20 Mei 2025	Gunung Paro (KM 32)	5,36	95,236	Serambi Indonesia
5	Januari 2025	Kawasan Lhoong (KM 50-an)	5,25623	95,26285	Kompas.com
6	20-Sep-24	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	Serambinews.com
7	18 Agst 2024	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	AJNN.net
8	23 Mei 2024	Gn. Geurutee (KM 68)	5,1412	95,2833	RRI Banda Aceh
9	12 Mei 2024	Gunung Geurutee (KM 66)	5,132	95,278	Antara Foto
10	21-Nov-23	Gunung Kulu (KM 40)	5,275	95,238	Serambinews.com
11	04 Okt 2023	Gn. Geurutee (KM 64)	5,135	95,28	HabaAceh.id
12	01-Sep-23	Gunung Paro (KM 35)	5,33402	95,23401	Detik.com
13	Agustus 2023	Gn. Geurutee (KM 60-an)	5,12754	95,27451	Media Center Aceh
14	30-Jun-23	Gunung Paro (KM 35)	5,33402	95,23401	LKBN Antara Aceh
15	23-Jan-23	Gunung Paro (KM 36)	5,32851	95,2312	Kanal Aceh
16	05-Nov-22	Gunung Geurutee (KM 62)	5,12754	95,27451	Serambinews.com
17	Oktober 2022	Lhokseudu / Paro (KM 30)	5,38451	95,24103	Waspada Aceh
18	08 Mei 2022	Gunung Kulu (KM 40)	5,275	95,238	Serambinews.com
19	10-Jan-22	Gunung Paro (KM 35)	5,33402	95,23401	LKBN Antara Aceh
20	Sep-21	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	Modus Aceh
21	23 Agst 2021	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	Serambi Indonesia
22	12-Jun-21	Leupung / Lhokseudu (KM 27)	5,3852	95,2415	HabaAceh.id
23	Maret 2021	Gn. Geurutee (KM 60-an)	5,12754	95,27451	Serambinews.com
24	17-Jul-20	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	Detik.com
25	17-Jul-20	Gn. Geurutee (KM 60-an)	5,12754	95,27451	Serambinews.com
26	24-Jun-20	Gunung Kulu (KM 42)	5,26784	95,24155	Serambinews.com
27	08 Mei 2020	Gn. Geurutee, Babah le (KM 69)	5,1412	95,2833	AJNN.net
28	08 Mei 2020	Gunung Paro (KM 37)	5,32851	95,2312	Serambinews.com
29	08 Mei 2020	Gunung Paro (KM 40)	5,275	95,238	Serambinews.com

Berdasarkan rasio titik longsor, 10 dari 29 titik longsor (34,5%) berada pada zona kerentanan tinggi dan 15 titik (51,7%) berada pada zona kerentanan sedang (**Tabel 13**). Pola distribusi kejadian longsor tersebut mengindikasikan tingkat akurasi model yang diperoleh dapat dikategorikan sebagai kualitas model baik. Peta kondisi kerentanan longsor sepanjang ruas jalan lintas Banda Aceh-Aceh Jaya sangat bermanfaat untuk menggambarkan kondisi ruas jalan dan menjaga akses dan arus lalu lintas tetap lancar [10]. Data mengenai 29 kejadian longsor di sepanjang ruas jalan Banda Aceh – Aceh Jaya pada periode 2020–2025 diperoleh melalui **inventarisasi data sekunder berbasis laporan media digital** (seperti *Serambinews.com*, *AJNN.net*, *LKBN Antara*, *Detik.com*, dan *Kompas.com*) serta catatan instansi terkait yang kemudian divalidasi secara spasial menggunakan koordinat geografis.

Tabel 13. Tingkat Kerentanan Kejadian

Tingkat Kerentanan	Jumlah Kejadian	Persentase (%)
Rendah	4	13,8
Sedang	15	51,7
Tinggi	10	34,5
Total	29	100



Gambar 3. Zonasi Kerentanan Longsor; (a) Peta Kerentanan Longsor Secara Umum, (b) 10 Zona dengan tingkat kerentanan Tinggi di Sepanjang Jalan lintas Banda Aceh – Aceh Jaya

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, model zonasi kerentanan tanah longsor pada ruas Jalan Nasional Banda Aceh – Aceh Jaya yang dibangun menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) mampu mengidentifikasi 10 zona kritis dengan tingkat kerentanan tinggi secara spasial. Integrasi enam parameter menunjukkan bahwa kemiringan lereng merupakan faktor pengontrol paling dominan dengan bobot 0,3 (30%), diikuti oleh faktor litologi (0,23). Secara kewilayahan, zona kerentanan sedang mendominasi area penelitian seluas 39.056,0 ha (61,8%), sementara zona kerentanan tinggi mencakup 9.075,0 ha (14,3%).

Validasi model menggunakan 29 titik kejadian longsor periode 2020–2025 menunjukkan bahwa 86,2% kejadian aktual berada pada klasifikasi kerentanan yang sesuai, dengan rincian 10 titik (34,5%) pada zona tinggi dan 15 titik (51,7%) pada zona sedang. Tingkat akurasi kumulatif tersebut, didukung oleh nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,0751, mengindikasikan bahwa kualitas model tergolong baik dan sangat representatif terhadap kondisi aktual di lapangan. Dengan demikian, pendekatan ini dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam perencanaan mitigasi serta pengembangan sistem *rapid evaluation* untuk meningkatkan keselamatan dan ketahanan infrastruktur jalan pada wilayah rawan longsor.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Universitas Malikussaleh dan Program Studi Teknik Geologi Universitas Syiah Kuala yang telah memberikan dukungan akademik, fasilitas diskusi ilmiah, serta berbagai masukan konstruktif selama proses penelitian dan penulisan artikel ini serta juga para reviewer yang telah bersedia mereview artikel ilmiah ini.

6. Referensi

- [1] H. Li, T. Hu, X. Ma, and B. Cheng, "The impact of transportation infrastructure on the regional economic integration in China : A CGE analysis," *Int. Rev. Econ. Financ.*, vol. 99, no. February, hal. 104045, 2025, doi: 10.1016/j.iref.2025.104045.
- [2] R. Srinivasan, B. N. Shashikumar, A. Suputhra, M. Lalitha, dan S. Dharumarajan, *Mapping of landslide susceptibility using large-scale soil information and GIS-based analytical hierarchy*

- process technique*. Chapter 35. 2024.
- [3] Asmiatun, Siti, and Nur Wakhidah. "Identifikasi Pengelompokan Kondisi Permukaan Jalan Menggunakan Algoritma K-Means." *Jurnal Pengembangan Rekayasa dan Teknologi* 14.1 (2019): 17-23.
- [4] M. A. Z. Anwar, S., Radhiah, R., & Nasution, "Evaluation of USAID Aceh road surface condition using dynamic time warping method: A preliminary study.," *Adv. Transp. Stud.*, vol. 61, hal. 119–134, 2023.
- [5] M. Isya, N. Fadhly, dan A. Saputra, "Multi Criteria Analysis of Road Handling Type at Banda Aceh – Meulaboh National Road Segment Indonesia," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1845, hal. 1–8, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012058.
- [6] Y. C. Chen, & Li, J. K., dan L. G. Ran, "A Review of Rockfall Control Measures along Highway," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 353–354, hal. 2385–2391., 2013.
- [7] Q. Zou, P. Cui, G. G. D. Zhou, S. Li, & Tang, J., dan S. Li, "Progress in Physical Geography: Earth and Environment," *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 42, no. 3, hal. 305–329, 2018.
- [8] S. Wei, S. Kamran, dan U. Nazir, "Heliyon Review article A systematic review of the flood vulnerability using geographic information system," *Journal homepage: www.cell.com/heliyon*. vol. 8, no. September 2021, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09075.
- [9] A. N. Leeonis *dkk.*, "Importance of Geographic Information System (GIS) Application to Reduce the Impact of Flood Disasters in Malaysia : A Meta-Analysis," *Journal Water MDPI*. hal. 1–28, 2025.
- [10] S. S. Chandrasekaran, S. Elayaraja, dan S. Renugadevi, "Damages to Transport Facilities by Rainfall Induced Landslides During November 2009 in Nilgiris , India," *Journal Proceedings of the Second World Landslide Forum* no. October, hal. 1–6, 2011.
- [11] A. I. Rifai, S. K. Bhakti, dan S. Handayani, "The Case Study of Using Geotextiles Reinforced Structure to Repair Mountain Road Landslide in Toraja - Indonesia," *Journal Civil Engineering and Architecture* vol. 11, no. 6, hal. 3826–3836, 2023, doi: 10.13189/cea.2023.110642.
- [12] T. Riming, P. Dey, S. K. Patnaik, dan M. Narzary, "Modeling Landslide Hazard in the Eastern Himalayan Mountain Region of the Papumpare District of Arunachal Pradesh, India Using Multicriteria Decision-Making (MCDM) and Geospatial Techniques," *Nature Environment and Pollution Technology An International Quarterly Scientific Journal*. 2025.
- [13] L. Mengstie, A. Nebere, M. Jothimani, dan B. Taye, "Landslide susceptibility assessment in Addi Arkay, Ethiopia using GIS , remote sensing , and AHP," *Quat. Sci. Adv.*, vol. 15, no. July, hal. 100217, 2024, doi: 10.1016/j.qsa.2024.100217.
- [14] R. Anbalagan, D. Chakraborty, dan A. Kohli, "Landslide hazard zonation (LHZ) mapping on meso-scale for systematic town planning in mountainous terrain," *Journal of Scientific & Industrial Research*. vol. 67, no. July, hal. 486–497, 2008.
- [15] P. Thammaboribal, N. Tripathi, dan S. Lipiloet, "Using of Analytical Hierarchy Process (AHP) in Disaster Management : A Review of Flooding and Landslide Susceptibility Mapping," *International Journal of Geoinformatics*. vol. 21, no. 4, hal. 178–196, 2025.
- [16] T. L. Saaty, *How To Make A Decision : The Analytic Hierarchy Process*. 1990.
- [17] R. Anbalagan, "Landslide hazard evaluation and zonation mapping in mountainous terrain," *Engineering Geology*. vol. 32, no. 4, 1992.
- [18] N. Pasambo, E. A. Patandianan, dan E. M. Mayzarah, "Karakteristik Kondisi Geologi di Kelurahan Ransiki , Kabupaten Manokwari Selatan , Provinsi Papua Barat Terhadap Potensi Bahaya Likuifaksi," *J. Geosains dan Remote Sens.*, vol. 6, no. 2, hal. 99–112, 2025.
- [19] Sugianto, A. Deli, E. Miswar, M. Rusdi, dan M. dan Irham, "The Effect of Land Use and Land Cover Changes on Flood Occurrence in Teunom Watershed , Aceh Jaya," *Land*, vol. 11, hal. 1271, 2022, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.3390/land11081271>
- [20] Q. Zhang, Z. Liang, W. Liu, W. Peng, H. Huang, dan S. Zhang, "Landslide Susceptibility Prediction : Improving the Quality of Landslide Samples by Isolation Forests," *Journal Sustainability MDPI*. hal. 1–17, 2022.
- [21] Y. Chen, Z. Ye, H. Liu, R. Chen, Z. Liu, dan H. Liu, "A GIS-Based Approach for Flood Risk Zoning by Combining Social Vulnerability and Flood Susceptibility : A Case Study of Nanjing , China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021.

- [22] F. El Amarty, A. Chakir, L. Benaabidate, dan A. Lahrach, "Assessing Landslide Susceptibility Using Analytical Hierarchy Process (AHP) and Frequency Ratio (FR) in the Oued Lebene Watershed , North Morocco يليلحتلا يمرهلا لسلسلتلا ةيلمع مادختساب ةيضراً تا رايهنلا ةضرع ريذقت ن بل يداو ضوح ةلاح ةسا رد," *Iraqi J. Sci.*, vol. 66, no. 9, hal. 3981–4000, 2025, doi: 10.24996/ijcs.2025.66.9.36.
- [23] F. Machay, S. El Moussaoui, dan H. El Talibi, "Insights into large landslide mechanisms in tectonically active Agadir , Morocco : The significance of lithological , geomorphological , and soil characteristics," *Sci. African*, vol. 22, no. May, hal. e01901, 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01901.
- [24] N. Simon, J. Akhir, A. Napiyah, dan T. Kee, "Pemetaan potensi bencana tanah runtuh menggunakan faktor penilaian bencana tanah runtuh dengan pendekatan GIS," *Geol. Soc. Malaysia, Bull.* 55, vol. 55, no. August, hal. 47–53, 2009.
- [25] W. Ruihong, "iScience II Slope protection effect of typical vegetation in the Three Gorges reservoir area under extreme rainfall," *ISCIENCE*, vol. 27, no. 6, hal. 110057, 2024, doi: 10.1016/j.isci.2024.110057.
- [26] Arnone, Elisa, et al. "Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides." *Water Resources Research* 52.11 (2016): 8590-8612.
- [27] B. Tan, P. De Vera, J. Abrazaldo, C. Ng, dan A. Chaudhuri, "Flood-associated disease outbreaks and transmission in Southeast Asia," *Frontiers in Microbiology*. no. October, hal. 1–14, 2025, doi: 10.3389/fmicb.2025.1694246.
- [28] B. Xiong, J. Tang, dan C. Lu, "Unsaturated seepage and fluid-solid coupling analysis of rainfall infiltration of slope," *Adv. Mater. Res.*, vol. 255–260, hal. 3488–3492, 2011.
- [29] R. Maula, D. F. Marlisa, I. Kamaruddin, dan Q. I. Qamal, "Analisis Dampak Lingkungan dengan Pendekatan DPSIR Akibat Pola Penggunaan Lahan (Studi Kasus : Kabupaten Bantaeng Sulawesi Selatan)," *Journal Serambi Engineering*. vol. XI, no. 1, 2026.
- [30] Y. Liu, Z. Deng, dan X. Wang, "The Effects of Rainfall , Soil Type and Slope on the Processes and Mechanisms of Rainfall-Induced Shallow Landslides," *Aplied Sci.*, vol. 11652, no. 11, hal. 1–14, 2021.
- [31] A. Chinkulkijniwat dkk., "Stability characteristics of shallow landslide triggered by rainfall," *Journal of Mountain Science Article*. 2019.
- [32] S. Anbazhagan dan V. Ramesh, "Landslide hazard zonation mapping in ghat road section of Kolli," *Journal of Mountain Science Article*. 2014.
- [33] I. Şandric, Z. Chiţu, B. Mihai, dan I. Săvulescu, "Landslide Susceptibility for the Administrative Area of Breaza, Prahova County, Curvature Landslide Susceptibility for the Administrative Area of Breaza, Prahova County, Curvature Subcarpathians, România" *Journal of Maps*. vol. 5647, 2012, doi: 10.4113/jom.2011.1168.
- [34] H. Qiu, "Editorial Landslide Geomorphology : Pattern , Process and Stability," *J. Earth Sci.*, vol. 36, no. 1, hal. 327–332, 2025.
- [35] R. K. Chingkhei, A. Shiroyleima, L. R. Singh, dan A. Kumar, "Landslide Hazard Zonation in NH-1A in Kashmir Himalaya, India Share and Cite :," *Int. J. Geosci.*, vol. 4, no. 10, 2013, doi: 10.4236/ijg.2013.410147.