

## Analisis Risiko Longsor Di Wilayah Tropis Berdasarkan Curah Hujan Dan Topografi Berbasis DEM: Studi Literatur Sistematis

Arvie Naufal Fabian Brampu<sup>1)</sup>, Joni Fitra<sup>2)</sup>

<sup>1, 2)</sup> Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Jl. Kapt. Mukhtar Basri No.3,  
Glugur Darat II, Kec. Medan Timur, Kota Medan, Sumatera Utara  
Email: [arviefabian0@gmail.com](mailto:arviefabian0@gmail.com)<sup>1)</sup>, [jonifitra@umsu.ac.id](mailto:jonifitra@umsu.ac.id)<sup>2)</sup>

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v16i1.1356>

(Received: 03 February 2026 / Revised: 08 February 2025 / Accepted: 03 March 2026)

### Abstrak

Risiko longsor di wilayah tropis dipicu interaksi iklim dan topografi, namun kajian sistematis yang memadukan keduanya dengan *Digital Elevation Model* (DEM) masih terbatas. Studi ini menelaah faktor pemicu dan pemanfaatan DEM dalam analisis kerentanan. Metodologi menggunakan analisis tematik terhadap 19 artikel (2015-2025) dari Google Scholar dan Scopus. Hasil menunjukkan lereng curam dan hujan intensitas tinggi sebagai pemicu dominan, terutama di kawasan bergunung. Secara keseluruhan, risiko longsor di wilayah tropis yang dikaji didominasi kategori kerawanan sedang hingga sangat tinggi. DEM terbukti efektif mengekstraksi parameter elevasi, kemiringan, dan aliran. Metode *Frequency Ratio* dan *Analytic Hierarchy Process* mencapai akurasi tertinggi (*Area Under Curve/AUC* 0,90-0,91), diikuti Random Forest (0,85). Kajian ini menyintesis temuan iklim-topografi tropis dan mengidentifikasi celah penelitian terkait integrasi data hujan temporal, resolusi DEM, serta validasi lapangan.

Kata kunci: *Longsor, Curah Hujan, Topografi, Digital Elevation Model, Studi Literatur Sistematis*

### Abstrack

Landslide risk in tropical regions is driven by climatic and topographic interactions, yet systematic studies integrating both with Digital Elevation Model (DEM) data remain limited. This systematic review examines landslide triggers and DEM utilization in vulnerability analysis. The methodology involves a thematic analysis of 19 articles (2015-2025) from Google Scholar and Scopus. Results identify steep slopes and high-intensity rainfall as dominant triggers, particularly in complex mountainous areas. Overall, landslide risk in the studied tropical regions is predominantly categorized as moderate to very high. DEM effectively extracts elevation, slope, and flow parameters. Frequency Ratio and *Analytic Hierarchy Process* achieved the highest accuracy (*Area Under Curve/AUC* 0.90-0.91), followed by Random Forest (0.85). This study synthesizes tropical climate-topography findings and identifies research gaps regarding temporal rainfall integration, DEM resolution, and field validation.

Keywords: *Landslide, Rainfall, Topography, Digital Elevation Model, Systematic Literature Review*

## 1. Latar Belakang

Tanah longsor merupakan salah satu jenis bencana alam yang sering terjadi di wilayah beriklim tropis, terutama di daerah dengan kontur permukaan yang curam dan curah hujan tinggi (Isnaini, 2019; Huang *et al.*, 2022). Di kawasan seperti ini, lereng menjadi sangat rentan mengalami kegagalan struktur tanah akibat beban air yang meningkat saat musim hujan (Hidayat and Zahro, 2020; M Raafiud Darajaat *et al.*, 2020). Dampak dari kejadian longsor tidak hanya sebatas kerugian fisik seperti rusaknya lahan pertanian, pemukiman, dan infrastruktur penting, tetapi juga mengancam keselamatan jiwa manusia (Naryanto *et al.*, 2019). Dalam jangka panjang, longsor bisa memperlambat proses pembangunan, mengganggu fungsi ekosistem, serta menyulitkan upaya pemulihan di wilayah terdampak (Hamida and Widiasamratri, 2019). Oleh karena itu, penting untuk memahami dan mengelola risiko longsor sejak awal melalui pendekatan yang sistematis, termasuk dalam perencanaan wilayah dan pembangunan infrastruktur (Hamida and Widiasamratri, 2019; Sawitri *et al.*, 2021).

Dalam beberapa tahun terakhir, studi mengenai longsor di daerah tropis mulai berkembang pesat (Muchlian and Honesti, 2023). Banyak peneliti menyoroti bagaimana elemen lingkungan seperti intensitas hujan dan kondisi topografi sangat mempengaruhi stabilitas lereng (M Raafiud Darajaat *et al.*, 2020; Huang *et al.*, 2022). Hujan yang turun dalam jumlah besar dalam waktu singkat, atau akumulasi selama beberapa hari, diketahui bisa memicu pergerakan tanah, apalagi jika tanahnya bersifat jenuh air dan berada pada lereng yang cukup curam (Germain, Roy and Jose Teixeira Guerra, 2022). Faktor-faktor lain seperti jenis tanah, pelapukan batuan, degradasi vegetasi, dan perubahan penggunaan lahan juga turut memperparah risiko, terutama pada wilayah dengan tekanan pembangunan yang tinggi.

Kajian risiko longsor sebenarnya sudah lama digunakan dalam bidang kebencanaan dan hidrologi (Milevski *et al.*, 2024). Namun, pendekatan berbasis data ini sekarang mulai diintegrasikan ke dalam bidang teknik sipil, terutama dalam perencanaan wilayah dan pembangunan berbasis geoteknik (Mawardi, Razali and Cyntia, 2019). Dalam proses ini, data spasial dan iklim berperan besar karena bisa memberikan informasi yang lebih akurat dan spesifik mengenai area berisiko (Sudarsono *et al.*, 2021). Salah satu alat yang sangat bermanfaat adalah *Digital Elevation Model* (DEM), yang dapat digunakan untuk menganalisis bentuk permukaan tanah, kemiringan lereng, hingga arah aliran air permukaan (Xie *et al.*, 2021). Ketika data topografi dari DEM dipadukan dengan data curah hujan dari stasiun klimatologi atau satelit, maka analisis risiko longsor menjadi jauh lebih informatif dan dapat dijadikan dasar perencanaan yang lebih matang (Bayuaji, Nugraha and Sukmono, 2015).

Tingginya kerentanan wilayah tropis terhadap kombinasi curah hujan ekstrem dan kompleksitas geomorfologi memosisikan mitigasi longsor sebagai prioritas strategis dalam manajemen bencana. Meskipun teknologi spasial telah berkembang pesat, integrasi sistematis antara *Digital Elevation Model* (DEM) dan dinamika presipitasi khusus kawasan tropis masih menyisakan celah kajian yang signifikan. Sebagian besar studi terdahulu cenderung berfokus pada wilayah non-tropis atau sekadar mengeksplorasi aspek teknis parsial, padahal interaksi spesifik antara topografi curam dan iklim tropis menuntut pendekatan pemodelan yang lebih kontekstual. Fenomena ini menegaskan perlunya pemahaman mendalam

mengenai bagaimana variabel hidrometeorologi dan morfologi diintegrasikan dalam analisis risiko yang komprehensif. Melalui sintesis sistematis dari berbagai studi literatur, penelitian ini berupaya mengisi kekosongan tersebut dengan menawarkan kebaruan dalam penggabungan data DEM dan curah hujan pada ekosistem tropis.

Sejalan dengan rumusan masalah tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah: (1) Mengidentifikasi faktor pemicu serta spektrum kerentanan longsor dengan menitikberatkan pada interaksi dinamis antara intensitas curah hujan dan konfigurasi topografi. (2) Mengevaluasi efektivitas pemanfaatan DEM serta menguji tingkat akurasi berbagai metodologi pemodelan (seperti pendekatan statistik, heuristik, dan machine learning). dan (3) Mengungkap pola spasial sekaligus memetakan celah penelitian yang belum tereksplorasi sebagai basis perencanaan mitigasi.

## 2. Metode Penelitian

Metode Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur sistematis untuk mengevaluasi bagaimana parameter curah hujan dan karakteristik topografi, yang diperoleh dari *Digital Elevation Model* (DEM), digunakan dalam pemodelan risiko longsor di wilayah tropis. Metode ini mengacu pada kerangka kerja sintesis literatur yang mengklasifikasikan *literature review* ke dalam enam dimensi utama diawali dengan fokus, tujuan, perspektif, cakupan, organisasi, dan audiens (Cooper, 1988). Enam dimensi ini digunakan sebagai dasar untuk menyusun struktur telaah literatur secara sistematis. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan struktur yang sistematis dalam merangkum berbagai temuan ilmiah, sekaligus memungkinkan pemahaman yang mendalam dan terarah terhadap topik yang diteliti. Selain itu, untuk memastikan transparansi dan ketertelusuran proses seleksi artikel, digunakan pula panduan PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) dalam tahap penyaringan dan inklusi literatur, sehingga integritas metodologis dalam proses peninjauan dapat terjaga dengan lebih baik (Page *et al.*, 2021).

### 2.1 Pengumpulan Data

Data dikumpulkan dengan menelusuri literatur ilmiah yang dipublikasikan dalam jurnal peer-review sejak tahun 2015 hingga 2025. Fokus pencarian diarahkan pada studi-studi yang memanfaatkan curah hujan dan data DEM untuk menganalisis potensi longsor di wilayah tropis. Kata kunci yang digunakan antara lain "Risiko Longsor", "Curah Hujan", "Topografi", "Landslide Risk", "Rainfall", "Topography", serta kombinasi lainnya yang relevan dengan topik penelitian. Sumber yang digunakan berasal dari artikel-artikel jurnal ilmiah lokal maupun internasional yang memiliki reputasi baik di bidangnya.

Dalam penyusunan tinjauan ini, hanya artikel-artikel yang memenuhi kriteria tertentu yang disertakan. Proses penelusuran literatur dilakukan dengan memanfaatkan *database* Google Scholar dan Scopus, dibantu oleh perangkat lunak Publish or Perish untuk mengekstraksi metadata sitasi secara sistematis serta Mendeley sebagai alat manajemen referensi dan penyaringan awal dokumen. Fokus literatur mengkaji hubungan antara curah hujan, topografi, dan risiko longsor dan juga diarahkan pada studi yang relevan dengan wilayah tropis, mengingat karakteristik geologis dan iklimnya yang khas. Selain itu, artikel yang

digunakan harus memanfaatkan data berbasis *Digital Elevation Model* (DEM) atau metode serupa dalam pemodelan, guna memastikan kesesuaian pendekatan dengan tujuan kajian. Sebaliknya, artikel yang tidak memenuhi kriteria inklusi dieliminasi berdasarkan beberapa aspek: (1) jenis publikasi berupa opini, laporan teknis, atau *grey literature*, (2) studi yang tidak berbasis wilayah tropis atau tidak mencantumkan data spasial eksplisit, (3) dokumen berbahasa selain Inggris dan Indonesia, serta (4) artikel dengan metodologi yang tidak jelas atau tidak teruji validitasnya, seperti model tanpa validasi atau pembobotan tanpa dasar ilmiah. Adapun data utama hasil ekstraksi dari 19 literatur terpilih yang mencakup lokasi studi, faktor pemicu, kerentanan, hingga detail pemanfaatan DEM disajikan secara komprehensif pada Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3 di bagian Hasil dan Pembahasan.

## 2.2 Evaluasi dan Seleksi Literatur

Proses evaluasi dan seleksi literatur dilakukan dengan mengacu pada pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), yang dirancang untuk meningkatkan transparansi dalam pelaporan studi literatur sistematis. Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa proses penyaringan artikel mengikuti langkah-langkah yang terstruktur, mulai dari identifikasi hingga inklusi akhir.

Proses dimulai dengan identifikasi awal sebanyak 217 artikel dari basis data yang relevan. Sebanyak 47 artikel dihapus pada tahap awal karena merupakan duplikasi. Dari 170 artikel yang tersisa, dilakukan penyaringan berdasarkan judul dan abstrak untuk mengevaluasi kesesuaian awal dengan topik kajian, yang menghasilkan 105 artikel dieliminasi karena tidak memenuhi kriteria relevansi. Sebanyak 65 artikel kemudian diusulkan untuk ditinjau lebih lanjut, namun 14 di antaranya tidak berhasil diakses untuk peninjauan isi penuh. Evaluasi lebih mendalam terhadap 51 artikel yang berhasil diakses menunjukkan bahwa 32 di antaranya tidak memenuhi kriteria kelayakan, dengan alasan cakupan wilayah yang tidak sesuai (non-Asia), konteks geografis yang tidak relevan (non-tropis), serta tidak mengandung data spasial yang dibutuhkan. Hasil akhir dari seleksi ini menghasilkan 19 artikel yang dianggap memenuhi seluruh kriteria inklusi dan kemudian dimasukkan ke dalam analisis lebih lanjut.

## 2.3 Analisis dan Interpretasi Literatur

Setelah proses seleksi literatur diselesaikan, tahap berikutnya adalah menganalisis dan menginterpretasikan isi dari setiap artikel yang telah memenuhi kriteria inklusi. Pendekatan analisis dalam kajian ini dilakukan secara tematik dengan mengelompokkan informasi ke dalam dua komponen utama yang menjadi fokus pembahasan. Pertama, meneliti peran curah hujan dan karakteristik topografi sebagai faktor pemicu serta penentu tingkat kerentanan longsor, termasuk pengaruh intensitas dan sebaran hujan terhadap kestabilan lereng. Kedua, mengkaji pemanfaatan *Digital Elevation Model* (DEM) dalam pemodelan risiko, khususnya di wilayah tropis dengan dinamika geomorfologi dan iklim yang unik.

Meskipun kajian ini merupakan tinjauan literatur yang tidak melakukan pengolahan data spasial primer, analisis mendalam dan komparatif tetap dilakukan dengan mengevaluasi landasan matematis dan prinsip operasional dari

model-model yang digunakan dalam literatur terdahulu. Berbagai metode pemodelan, mulai dari pendekatan statistik, model pengambilan keputusan multikriteria, hingga machine learning, dievaluasi untuk menganalisis bagaimana probabilitas spasial diukur dan matriks pembobotan faktor disusun. Pada tahap akhir, tingkat ketepatan model prediktif dari berbagai literatur tersebut dikomparasikan secara kritis. Evaluasi performa dari setiap metode pemodelan divalidasi menggunakan metrik kesuksesan prediksi seperti Area Under Curve (AUC) (Fawcett, 2006), yang berfungsi untuk mengukur dan menentukan metode pemodelan spasial mana yang paling optimal serta akurat untuk diaplikasikan dalam mitigasi bencana longsor di wilayah tropis.

Tabel 1 Sumber kajian sesuai fokus penelitian

Fokus	Sumber
Faktor Pemicu dan Kerentanan	(Triwahyuni, Sobirin and Saraswat, 2017; Roy, J. <i>et al.</i> , 2019; Silalahi <i>et al.</i> , 2019; Dou <i>et al.</i> , 2019; Priyono <i>et al.</i> , 2020; Putra <i>et al.</i> , 2021; Agrawal and Dixit, 2022; Diara, Suyarto and Saifulloh, 2022; Erzagian, Wilopo and Fathani, 2023; Philia Christi Latue, Daniel Anthoni Sihasale and Heinrich Rakuasa, 2023; Armadyaputri, Tanggahma and Darmawan, 2024; Syofiah and Ahyuni, 2024; Hilalliyah and Namigo, 2025; J. Fitra <i>et al.</i> , 2025)
Pemanfaatan DEM dalam Pemodelan	(Triwahyuni, Sobirin and Saraswat, 2017; Silalahi <i>et al.</i> , 2019; Rizqi Malik Akbar and Akbar Kurniawan, 2020; Sawitri <i>et al.</i> , 2021; Sur <i>et al.</i> , 2021; Agrawal and Dixit, 2022; Diara, Suyarto and Saifulloh, 2022; Erzagian, Wilopo and Fathani, 2023; Philia Christi Latue, Daniel Anthoni Sihasale and Heinrich Rakuasa, 2023; Syofiah and Ahyuni, 2024; Wijaya, Novianti and Rahmadi, 2024; Faadhilah and Nugroho, 2024; Joni Fitra <i>et al.</i> , 2025)

Setiap temuan dalam literatur tidak hanya diidentifikasi, tetapi juga dibandingkan satu sama lain guna menemukan pola-pola umum, serta potensi celah penelitian yang masih terbuka. Dengan demikian, proses interpretasi tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga analitis, yang bertujuan untuk mengidentifikasi keterkaitan konseptual dan pola tematik dari berbagai studi yang tersebar di berbagai lokasi dan periode waktu. Selanjutnya, dilakukan penilaian kritis terhadap kualitas metodologi masing-masing studi, termasuk validitas data, akurasi model, serta ketepatan interpretasi hasil. Analisis ini bertujuan untuk membentuk landasan argumentatif yang kuat dalam menarik kesimpulan akhir dari studi ini.

#### 2.4 Penyusunan dan Penyajian Hasil

Temuan yang diperoleh dari proses analisis disusun secara sistematis melalui pendekatan naratif deskriptif. Penyusunan hasil mengikuti struktur yang merepresentasikan keterkaitan antara variabel utama dalam studi ini, yakni curah hujan, topografi, dan risiko longsor berbasis DEM. Sesuai dengan pendekatan evaluasi literatur, informasi esensial tidak disajikan dalam bentuk diagram integrasi visual, melainkan diekstraksi secara langsung ke dalam bentuk matriks atau tabel ringkasan serta sintesis tekstual untuk memperkuat penjelasan. Tiap bagian hasil difokuskan untuk menjawab bagaimana iklim dan karakteristik topografi berperan sebagai pemicu kerentanan, serta bagaimana keandalan DEM dievaluasi dalam pemodelan risiko. Penyajian ini juga mencakup penilaian kritis

terhadap keterbatasan data dan bias metodologi dari studi terdahulu untuk memberikan peta jalan bagi penelitian selanjutnya.

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Faktor Pemicu Dan Kerentanan

Faktor pemicu dan kerentanan merupakan dua elemen kunci dalam memahami risiko longsor, karena keduanya menentukan seberapa besar kemungkinan terjadinya longsor serta dampaknya terhadap wilayah terdampak. Pemicu berkaitan dengan kondisi yang menyebabkan tanah menjadi tidak stabil, sementara kerentanan menggambarkan seberapa rentan elemen di sekitarnya terhadap bahaya tersebut.

Tabel 2 Rekapitulasi faktor pemicu dan kerentanan tanah longsor

Penulis (Tahun)	Lokasi Penelitian	Faktor Pemicu	Faktor Kerentanan	Temuan Kunci
(Triwahyuni, Sobirin and Saraswat, 2017)	Kulon Progo, Yogyakarta, Indonesia	Kemiringan lereng, curah hujan	Topografi curam, kejenuhan tanah	Pola potensi berbeda: SINMAP (sedang), SMORPH (rendah); utara & timur dominan longsor
(Philia Christi Latue, Daniel Anthoni Sihasale and Heinrich Rakuasa, 2023)	Leihitu Barat, Maluku Tengah, Indonesia	Kemiringan lereng curam	Topografi berbukit hingga bergunung	30,68% wilayah berpotensi tinggi, musim hujan meningkatkan risiko
(Syofiah and Ahyuni, 2024)	Solok, Sumatera Barat, Indonesia	Kemiringan lereng, jarak dari jalan, elevasi	Tekanan pembangunan	Elevasi >500 mdpl dan dekat jalan memperbesar kerentanan
(Hilalliyah and Namigo, 2025)	Agam & Bukittinggi, Sumatera Barat, Indonesia	Lereng, jenis tanah, curah hujan	Zona morfologis tinggi	77,5% wilayah rawan tinggi hingga sangat tinggi
(Dou <i>et al.</i> , 2019)	DAS Waduk Dongjiang, China	Curah hujan ekstrem, <i>Drainage density</i>	Kawasan sekitar waduk	Aliran lumpur dipicu Typhoon Bilis akibat akumulasi sedimen
(Agrawal and Dixit, 2022)	Meghalaya, India	Curah hujan tinggi, aktivitas seismik	Lereng Terjal	Area rawan teridentifikasi jelas.
(Roy, J. <i>et al.</i> , 2019)	Darjeeling & Kalimpong, West Bengal, India	Curah hujan, pergerakan seismik	Elevasi, kemiringan lereng, aspek lereng, geomorfologi, geologi, tekstur tanah, penggunaan	Peta 4 kelas, valid untuk mitigasi.

			lahan/LULC, NDVI, TWI, STI, SPI, zona seismik	
(Priyono <i>et al.</i> , 2020)	Karanganyar, Jawa Tengah, Indonesia	Lereng sedang, batuan tua, tanah tebal	Permukiman di lereng	Validasi lapangan kuatkan hasil spasial
(Silalahi <i>et al.</i> , 2019)	Bogor, Jawa Barat, Indonesia	Litologi, Jenis Tanah, <i>Land Cover</i> , <i>Slope Aspect</i> , <i>Hidrologi</i> , Curah Hujan	Wilayah <i>mid</i> hingga selatan Bogor	5 zona kerawanan; wilayah tengah hingga selatan Bogor tergolong sedang ke tinggi
(Diara, Suyarto and Saifulloh, 2022)	Baturiti & Sukasada, Bali, Indonesia	Bentuk lahan vulkanik, geologi retak, lereng >45%, curah hujan >2.400 mm/tahun	Lereng curam, litologi vulkanik, curah hujan tinggi, tanah andosol, vegetasi rendah	Kerawanan tinggi 15,62%; dominan di jalur Candikuning ke Gitgit; mitigasi melalui bronjong serabut kelapa, terasering, konservasi vegetasi
(Putra <i>et al.</i> , 2021)	Pacitan, Jawa Timur, Indonesia	Curah Hujan, <i>Slope</i> dan topografi, Geologi, Jenis Tanah, Penggunaan Lahan	Lahan Pertanian, Kesesuaian lahan terhadap kemampuan lahan (LCC), Rencana tata ruang wilayah (RSP)	Alih lahan meningkatkan bahaya longsor 3× (1998-2018) dan diprediksi puncak di 2030, mengancam 29,47 ha lahan pertanian jika tanpa intervensi.
(Erzagian, Wilopo and Fathani, 2023)	Pegunungan Kulon Progo, Indonesia	Curah hujan tinggi di bulan November - Maret	Elevasi, aspek lereng, litologi, kerapatan kelurusan, jarak sungai/jalan, penggunaan lahan.	4 zona kerentanan longsor
(J. Fitra <i>et al.</i> , 2025)	Deli Serdang, Sumatera Utara, Indonesia	Curah hujan berulang	Tanah jenuh air	Hujan ringan dan berat berulang dapat memicu longsor secara tidak langsung
(Armadyaputri, Tanggahma and Darmawan, 2024)	Kota Batu, Jawa Tengah, Indonesia	Kemiringan lereng, curah hujan	Jenis tanah, tutupan lahan rendah	Klasifikasi kerentanan 5 tingkat; peta digunakan untuk mitigasi dan edukasi publik

Dari berbagai penelitian yang dianalisis, terlihat jelas bahwa kemiringan lereng menjadi faktor utama pemicu longsor, karena lereng yang curam memudahkan tanah kehilangan kestabilan saat mendapat tekanan. Curah hujan ekstrem juga berperan signifikan, terutama ketika air hujan meresap dan membuat

tanah jenuh, sehingga mempercepat proses longsor. Selain itu, jenis tanah dan kondisi kejenuhan air tanah turut memperbesar kerentanan daerah terhadap longsor. Perubahan penggunaan lahan dan pembangunan infrastruktur di wilayah rawan, seperti pembukaan tutupan vegetasi dan penataan yang kurang tepat, memperparah risiko ini. Kerentanan wilayah sangat terkait dengan morfologi dan kondisi geologi setempat, terutama di daerah dengan elevasi tinggi dan struktur tanah yang rentan. Tekanan spasial akibat pembangunan di luar kapasitas lahan asli menyebabkan penurunan stabilitas tanah, apalagi jika disertai degradasi vegetasi dan sistem drainase yang buruk. Oleh karena itu, upaya mitigasi harus memprioritaskan pengelolaan lereng dan curah hujan serta pengaturan penggunaan lahan yang tepat agar potensi longsor dapat diminimalkan secara efektif.

### 3.2 Pemanfaatan DEM Dalam Pemodelan

Pemanfaatan *Digital Elevation Model* (DEM) dalam pemodelan potensi longsor memainkan peran penting dalam menyediakan informasi topografi yang presisi sebagai dasar analisis spasial. DEM memungkinkan ekstraksi parameter kunci seperti kemiringan, elevasi, bentuk, dan arah lereng yang sangat memengaruhi kestabilan lahan. Dalam berbagai studi, data ini digunakan untuk membangun model prediktif, melakukan klasifikasi tingkat kerentanan, hingga menghasilkan peta zonasi bahaya secara kuantitatif dan sistematis. Ketepatan hasil pemodelan sangat bergantung pada kualitas dan resolusi DEM yang digunakan, menjadikannya elemen teknis krusial dalam sistem informasi geospasial berbasis mitigasi bencana. Seluruh informasi yang disajikan pada Tabel 3 merupakan hasil sintesis dan ekstraksi temuan dari literatur terkait. Data tersebut berfungsi sebagai referensi sekunder untuk memetakan capaian penelitian terdahulu, dan tidak merupakan hasil pengolahan data spasial primer dari penelitian ini.

Tabel 3 Rekapitulasi peran DEM dalam pemodelan longsor

Penulis & Tahun	Metode/Model	Pemanfaatan DEM	Output Kunci
(Triwahyuni, Sobirin and Saraswat, 2017)	SINMAP & SMORPH	Menurunkan kemiringan & bentuk lereng untuk klasifikasi spasial	Potensi sedang (52,8%) & rendah (61%) mendominasi
(Philia Christi Latue, Daniel Anthoni Sihasale and Heinrich Rakuasa, 2023)	SMORPH	DEMNAS untuk kemiringan (6 kelas) & bentuk lereng (3 bentuk)	30,68% wilayah potensi tinggi, dominasi lereng curam
(Wijaya, Novianti and Rahmadi, 2024)	<i>Weighted Overlay</i>	Ekstraksi <i>slope, aspect, length</i> via ArcGIS	Lereng punya bobot dominan (30%), $r = 0,730$
(Syofiah and Ahyuni, 2024)	<i>Random Forest</i>	Mengolah <i>slope</i> & elevasi jadi raster 25×25 m untuk klasifikasi probabilistik	AUC = 0,8533; potensi sangat tinggi = 16,18%
(Faadhilah and Nugroho, 2024)	<i>Support Vector Machine</i> (SVM)	Mengolah kemiringan lereng ( <i>slope</i> ) sebagai faktor	Peta potensi longsor (rendah 42%, menengah 28%, tinggi 30%) dengan

		dominan kerentanan longsor	akurasi validasi 76%
(Sur <i>et al.</i> , 2021)	Fuzzy FNRF	Ekstraksi DEM Cartosat menjadi jadi DTM, klasifikasi slope Jenks	Akurasi prediksi = 89,6% (95% confidence level)
(Joni Fitra <i>et al.</i> , 2025)	Flow Analysis	Ekstraksi <i>slope</i> dan menganalisis aliran permukaan ( <i>flow analysis</i> )	Menghasilkan zona kerentanan dengan peta Index Bahaya
(Sawitri <i>et al.</i> , 2021)	Pembobotan & Scoring	Menurunkan informasi kemiringan lereng dan topografi	Peta zona rawan longsor, termasuk kemiringan lereng hasil ekstraksi DEM.
(Rizqi Malik Akbar and Akbar Kurniawan, 2020)	Pembobotan	Menurunkan informasi kelerengan	Perubahan potensi longsor terbesar terjadi pada 2002 sampai 2013 seluas 127,85 km <sup>2</sup>
(Agrawal and Dixit, 2022)	FR, SE, AHP, Fuzzy-AHP	Meninjau faktor kemiringan, aspek, elevasi, dan analisis spasial	AHP akurasi tertinggi (AUC 0.913), peta kerentanan untuk mitigasi
(Silalahi <i>et al.</i> , 2019)	Frequency Ratio (FR)	Menyusun Peta tematik (kemiringan, aspek, elevasi) dan analisis faktor kerentanan	Lithology, tanah, dan tutupan lahan paling berpengaruh; akurasi 90.10% (AUC)
(Diara, Suyarto and Saifulloh, 2022)	Skoring dan Overlay GIS	Meninjau Slope, bentuk lahan, dan elevasi	Zona rawan tinggi di Baturiti & Sukasada (15.62%); rekomendasi mitigasi teknis dan vegetatif
(Erzagian, Wilopo and Fathani, 2023)	Frequency Ratio (FR)	Menyusun Elevasi, kemiringan, aspek, jarak sungai/jalan, dan analisis spasial	4 zona kerentanan; AUC 80.1% (success rate) dan 81.3% (predictive rate)

Berbagai metode pemodelan yang menggunakan *Digital Elevation Model* (DEM) menunjukkan perbedaan akurasi yang signifikan dalam mengidentifikasi zona rawan longsor. Metode *Frequency Ratio* (FR) dan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) secara konsisten menghasilkan akurasi tinggi dengan nilai *Area Under Curve* (AUC) mencapai 0,90 hingga 0,91, Tingginya akurasi FR didasarkan pada landasan matematisnya yang membandingkan rasio probabilitas spasial kejadian longsor. Berdasarkan kajian literatur, persamaan dasar FR yang digunakan adalah:

$$FR = \frac{\frac{D_i}{A_i}}{\frac{\sum_{i=1}^N D_i}{\sum_{i=1}^N A_i}} \quad (1)$$

atau

$$FR = (M_i/M) / (N_i/N) \quad (2)$$

Sumber : (Silalahi *et al.*, 2019; Erzagian, Wilopo and Fathani, 2023)

Keterangan

$D_i$  atau  $M_i$  = Jumlah piksel/kejadian longsor pada kelas faktor tertentu

$\sum D_i$  atau  $M$  = Total kejadian longsor

$A_i$  atau  $N_i$  = Luasan area kelas tersebut  
 $\sum A_i$  atau  $N$  = Total luasan area penelitian

Nilai rasio (FR) dari tiap faktor ini kemudian dijumlahkan untuk membentuk *Landslide Susceptibility Index* (LSI). Menandakan kemampuan yang kuat dalam mengintegrasikan faktor topografi dan spasial secara sistematis. Pendekatan berbasis *machine learning*, seperti Random Forest, juga memberikan hasil yang andal dengan AUC sebesar 0,85, menunjukkan efektivitasnya dalam menangkap pola kompleks data raster kemiringan dan elevasi. Sementara itu, metode *Support Vector Machine* (SVM) dan Fuzzy FNNR mampu mencapai akurasi hingga 76% dan 89,6%. Secara keseluruhan, model yang menggabungkan analisis statistik dengan teknik *machine learning* menunjukkan potensi terbaik dalam pemetaan risiko longsor.

Mengingat AHP terbukti sebagai salah satu metode dengan tingkat akurasi tertinggi (AUC > 0,90) dalam berbagai literatur, penting untuk mendalami bagaimana pendekatan ini beroperasi secara spasial. Berdasarkan (Agrawal and Dixit, 2022) AHP memecah masalah kerentanan yang kompleks menjadi sebuah hierarki keputusan yang lebih sederhana. Proses ini melibatkan pendefinisian masalah, penentuan tujuan, alternatif, serta pembuatan matriks perbandingan berpasangan (*Pairwise Comparison Matrix*) untuk menentukan bobot dan prioritas keseluruhan dari faktor maupun sub-faktor yang berkontribusi terhadap kejadian longsor. Dalam penerapannya, faktor-faktor pengkondisi longsor beserta kelasnya disusun dalam urutan hierarkis dan diberi nilai numerik antara skala 1 hingga 9 berdasarkan penilaian terhadap tingkat kepentingan relatifnya. Nilai skala yang lebih tinggi menunjukkan dominansi yang lebih besar dari suatu faktor atas faktor lainnya pada matriks tersebut. Untuk meminimalkan bias subjektivitas, literatur memvalidasi keandalan pembobotan menggunakan uji Rasio Konsistensi (Consistency Ratio / CR) dengan persamaan berikut:

$$CR = CI/RI \quad (3)$$

di mana nilai *Consistency Index* dihitung dengan

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (4)$$

Sumber : (Agrawal and Dixit, 2022)

Keterangan

RI = *Random Index*  
 $\lambda_{max}$  = Nilai eigen maksimum matriks  
n = Jumlah faktor kriteria

Literatur menetapkan batas nilai CR < 0,1 untuk memastikan pembobotan terhindar dari bias subjektivitas. Setelah matriks perbandingan berpasangan selesai disusun, nilai-nilai di dalamnya kemudian dinormalisasi untuk memperoleh nilai bobot kriteria (*criteria weights*), yang pada akhirnya merepresentasikan bobot akhir dari setiap faktor penentu dalam pemodelan kerentanan lahan.

### 3.3 Integrasi Faktor Risiko Longsor

Sintesis mendalam terhadap literatur menunjukkan bahwa integrasi antara faktor pemicu dan variabel kerentanan berbasis *Digital Elevation Model* (DEM) menciptakan kerangka pemodelan sistematis yang esensial bagi akurasi prediksi

longsor di wilayah tropis. Proses ini bermula dari identifikasi variabel input yang mengombinasikan parameter dinamis berupa curah hujan ekstrem dengan karakteristik statis lahan seperti morfometri lereng (kemiringan dan elevasi) serta kondisi geoteknik tanah. Melalui pemanfaatan data DEM, parameter topografi tersebut diekstraksi secara presisi untuk kemudian diolah menggunakan algoritma matematis yang tervalidasi, baik melalui pendekatan statistik, metode heuristik seperti *Analytic Hierarchy Process* (AHP), maupun implementasi *Machine Learning* yang lebih kompleks.

Output dari pemrosesan data ini kemudian ditransformasikan menjadi representasi spasial berupa peta zonasi yang mengklasifikasikan wilayah ke dalam tingkatan risiko rendah hingga tinggi. Keberadaan peta risiko tersebut tidak hanya menjadi produk visual semata, melainkan instrumen saintifik utama dalam merancang strategi mitigasi yang terukur. Dengan landasan data yang kuat, pemangku kepentingan dapat menetapkan prioritas intervensi, mulai dari perbaikan sistem drainase dan konservasi tanah, hingga penataan ruang yang lebih adaptif. Secara keseluruhan, integrasi koheren antara aspek hidrometeorologi dan geomorfologi ini memastikan bahwa setiap kebijakan mitigasi yang diambil bersifat tepat sasaran dan berkelanjutan di tengah dinamika lingkungan yang fluktuatif.

## 4. Kesimpulan dan Saran

### 4.1 Kesimpulan

Kajian literatur sistematis terhadap 19 penelitian di wilayah tropis mengungkap bahwa kemiringan lereng curam dan intensitas curah hujan tinggi merupakan dua pemicu utama yang secara sinergis meningkatkan potensi ketidakstabilan lereng. Kondisi tersebut menjadi lebih kritis pada kawasan bergunung dengan tanah jenuh air, morfologi yang kompleks, serta tekanan pembangunan yang tinggi. Faktor lain, seperti perubahan penggunaan lahan, degradasi vegetasi, dan karakteristik geologi setempat, turut memperkuat tingkat kerentanan terhadap bencana ini. Berdasarkan sintesis pemodelan spasial dari berbagai literatur tersebut, disimpulkan bahwa tingkat risiko longsor di kawasan tropis secara umum berada pada kategori ancaman sedang hingga sangat tinggi, yang menuntut prioritas mitigasi tata ruang yang mendesak.

Peran *Digital Elevation Model* (DEM) terbukti esensial dalam pemodelan risiko, khususnya untuk mengekstraksi parameter topografi seperti kemiringan, elevasi, bentuk lereng, dan arah aliran permukaan. Analisis menunjukkan bahwa metode *Frequency Ratio* dan *Analytic Hierarchy Process* memberikan akurasi tertinggi (AUC 0,90-0,91), diikuti Random Forest (AUC 0,85). Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi data DEM resolusi tinggi dengan pengamatan curah hujan real-time dari *rainfall radar* berpotensi meningkatkan akurasi peta kerentanan serta mendukung implementasi sistem peringatan dini (*early warning system*).

### 4.2 Saran

Penelitian disarankan untuk mengevaluasi secara komparatif pengaruh berbagai resolusi DEM terhadap akurasi model di wilayah tropis, mengembangkan model prediksi yang menggabungkan parameter hidrometeorologi real-time dengan dinamika penggunaan lahan, serta menguji

penerapan peta kerentanan dalam perencanaan infrastruktur dan kebijakan mitigasi di daerah berisiko tinggi. Dengan pendekatan integratif semacam ini, prediksi dan pengelolaan risiko longsor dapat dilakukan secara lebih akurat, tepat sasaran, dan berkelanjutan.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat dan dukungan dana yang diberikan, khususnya Rektor dan Wakil Rektor Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Ketua LPPM Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU) beserta jajarannya, Dekan dan Wakil Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Ketua Program Studi Teknik Sipil beserta seluruh dosen teknik sipil. Artikel ini merupakan bagian dari hasil penelitian hibah internal Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara skim penelitian dosen pemula dengan nomor kontrak 051/II.3-AU/UMSU-LP2M/C/2024 (peneliti utama: Joni Fitra, S.T, M.T, M.Sc).

### Daftar Kepustakaan

- Agrawal, N. and Dixit, J. (2022) "Assessment of landslide susceptibility for Meghalaya (India) using bivariate (frequency ratio and Shannon entropy) and multi-criteria decision analysis (AHP and fuzzy-AHP) models," *All Earth*, 34(1), pp. 179–201. Available at: <https://doi.org/10.1080/27669645.2022.2101256>.
- Armadyaputri, A.N., Tanggahma, Y.Z. and Darmawan, Y. (2024) "Pemetaan Daerah Rawan Longsor Berbasis Data Penginderaan Jauh di Kota Batu Jawa Timur," *Jagratar: Journal of Disaster Research*, 2(2), pp. 61–70. Available at: <https://doi.org/10.36080/jjdr.v2i2.182>.
- Bayuaji, D.G., Nugraha, A.L. and Sukmono, A. (2015) "Analisis Penentuan Zonasi Risiko Bencana Tanah Longsor Berbasis Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus: Kabupaten Banjarnegara) Dhuha," *Jurnal Geodesi Undip*, 4(1), p. 42. Available at: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/geodesi/article/view/10604>.
- Cooper, H.M. (1988) "Organizing knowledge syntheses: A taxonomy of literature reviews," *Knowledge in Society*, 1(1), p. 104. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF03177550>.
- Diara, I.W., Suyarto, R. and Saifulloh, M. (2022) "Spatial Distribution of Landslide Susceptibility in New Road Construction Mengwitani-Singaraja, Bali-Indonesia: Based on Geospatial Data," *International Journal of GEOMATE*, 23(96), pp. 95–103. Available at: <https://doi.org/10.21660/2022.96.3320>.
- Dou, J. *et al.* (2019) "Torrential rainfall-triggered shallow landslide characteristics and susceptibility assessment using ensemble data-driven models in the Dongjiang Reservoir Watershed, China," *Natural Hazards* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03659-4>.

- Erzagian, E., Wilopo, W. and Fathani, T.F. (2023) "Landslide Susceptibility Zonation Using GIS-Based Frequency Ratio Approach in the Kulon Progo Mountains Area, Indonesia," *Progress in Landslide Research and Technology*, Part F4147(2), pp. 115–126. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-031-44296-4_3).
- Faadhilah, A. and Nugroho, H. (2024) "Pemetaan Daerah Rawan Longsor di Kabupaten Bandung Barat menggunakan Metode Machine Learning dengan Teknik SVM," *Jurnal Rekayasa Hijau*, 8(2), pp. 185–199. Available at: <https://doi.org/10.26760/jrh.v8i2.185-199>.
- Fawcett, T. (2006) "An introduction to ROC analysis," 27, pp. 861–874. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.
- Fitra, Joni *et al.* (2025) "Penaksiran Indeks Bahaya Tanah Longsor Dengan Pemanfaatan Citra Digital Elevation Model ( DEM )," 05(2), pp. 94–104.
- Fitra, J. *et al.* (2025) "The Impact of Rainfall on the Likelihood of Landslides in the Deli Serdang Regency," *Journal of Physics: Conference Series*, 2989(1). Available at: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2989/1/012035>.
- Germain, D., Roy, S. and Jose Teixeira Guerra, A. (2022) "Empirical Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence in Serra do Mar, Angra dos Reis, Brazil," *Landslides* [Preprint]. Available at: <https://doi.org/10.5772/intechopen.100244>.
- Hamida, F.N. and Widyasamratri, H. (2019) "Risiko Kawasan Longsor Dalam Upaya Mitigasi Bencana Menggunakan Sistem Informasi Geografis," *Pondasi*, 24(1), p. 67. Available at: <https://doi.org/10.30659/pondasi.v24i1.4997>.
- Hidayat, R. and Zahro, A.A. (2020) "Penentuan Ambang Curah Hujan untuk Memprediksi Kejadian Longsor," *Jurnal Sumber Daya Air*, 16(1), pp. 1–10. Available at: <https://doi.org/10.32679/jsda.v16i1.483>.
- Hilalliyah, N. and Namigo, E.L. (2025) "Pemetaan Zona Rawan Longsor di Kawasan Agam-Bukittinggi Berbasis Google Earth Engine Menggunakan Teknik Evaluasi Multi-Kriteria," *Jurnal Fisika Unand*, 14(3), pp. 242–248. Available at: <https://doi.org/10.25077/jfu.14.3.242-248.2025>.
- Huang, F. *et al.* (2022) "Regional rainfall-induced landslide hazard warning based on landslide susceptibility mapping and a critical rainfall threshold," *Geomorphology*, 408, p. 108236. Available at: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108236>.
- Isnaini, R. (2019) "Analisis Bencana Tanah Longsor di Wilayah Provinsi Jawa Tengah," *Islamic Management and Empowerment Journal*, 1(2), pp. 143–160. Available at: <https://doi.org/10.18326/imej.v1i2.143-160>.
- M Raafiud Darajaat *et al.* (2020) "Pengaruh Intensitas Dan Durasi Hujan Terhadap Kestabilan Lereng Tanah Residual Vulkanik Di Jalur Liwa-Kemuning, Lampung Barat," *Padjadjaran Geoscience Journal (PGJ)*, 4(2), pp. 181–190. Available at: <https://doi.org/10.24198/pgj.v4i2.29092>.
- Mawardi, M., Razali, M.R. and Cyntia, C. (2019) "Landslide Analysis Using Digital Elevation Models," *Inersia, Jurnal Teknik Sipil*, 10(2), pp. 21–28. Available at: <https://doi.org/10.33369/ijts.10.2.21-28>.
- Milevski, I. *et al.* (2024) "Multi-hazard modeling of erosion and landslide susceptibility at the national scale in the example of North Macedonia," *Open Geosciences*, 16(1). Available at: <https://doi.org/10.1515/geo-2022->

0718.

- Muchlian, M. and Honesti, L. (2023) “Tren Penelitian Tanah Longsor di Indonesia Rentang Tahun 2011-2021 Berdasarkan Analisis Bibliometrik,” *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 7(1), pp. 247–254. Available at: <https://doi.org/10.33379/gtech.v7i1.1968>.
- Naryanto, H.S. *et al.* (2019) “Analisis Penyebab Kejadian dan Evaluasi Bencana Tanah Longsor di Desa Banaran, Kecamatan Pulung, Kabupaten Ponorogo, Provinsi Jawa Timur Tanggal 1 April 2017,” *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), p. 272. Available at: <https://doi.org/10.14710/jil.17.2.272-282>.
- Page, M.J. *et al.* (2021) “The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews,” *BMJ*, 372, p. n71. Available at: <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>.
- Philia Christi Latue, Daniel Anthoni Sihasale and Heinrich Rakuasa (2023) “Pemetaan Daerah Potensi Longsor di Kecamatan Leihitu Barat, Kabupaten Maluku Tengah, Menggunakan Metode Slope Morphology (SMORPH),” *INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi*, 2(3), pp. 486–495. Available at: <https://doi.org/10.55123/insologi.v2i3.1912>.
- Priyono, K.D. *et al.* (2020) “Risk analysis of landslide impacts on settlements in Karanganyar, Central Java, Indonesia,” *International Journal of GEOMATE*, 19(73), pp. 100–107. Available at: <https://doi.org/10.21660/2020.73.34128>.
- Putra, A.N. *et al.* (2021) “Landslide risk analysis on agriculture area in pacitan regency in east java indonesia using geospatial techniques,” *Environment and Natural Resources Journal*, 19(2), pp. 141–152. Available at: <https://doi.org/10.32526/ennrj/19/2020167>.
- Rizqi Malik Akbar and Akbar Kurniawan (2020) “Pemanfaatan Data Citra Satelit Multi Temporal untuk Identifikasi Potensi Tanah Longsor di Lereng Gunung Bromo Kabupaten Pasuruan,” *Jurnal Teknik Its*, 9(2).
- Roy, J. *et al.* (2019) “A Novel Ensemble Approach for Landslide Susceptibility Mapping (LSM) in Darjeeling and,” *Remote Sensing*, 11(23), p. 2886.
- Sawitri, R. *et al.* (2021) “Aplikasi Citra Landsat untuk Pemetaan Daerah Rawan Longsor di Kabupaten Bandung,” *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 2(2), pp. 65–73. Available at: <https://doi.org/10.23960/jgrs.2021.v2i2.42>.
- Silalahi, F.E.S. *et al.* (2019) “Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia,” *Geoscience Letters*, 6(1). Available at: <https://doi.org/10.1186/s40562-019-0140-4>.
- Sudarsono, B. *et al.* (2021) “Pembuatan Digital Elevation Model (DEM) Menggunakan UAV untuk Keperluan Identifikasi Tanah Longsor di Ruas Jalan Desa Liang Bunyu, Kabupaten Nunukan, Kalimantan Utara,” *Prosiding FIT ISI*, 1, p. 290. Available at: <https://proceedings.undip.ac.id/index.php/isiundip2021/article/download/641/386>.
- Sur, U. *et al.* (2021) “Landslide probability mapping by considering fuzzy numerical risk factor (FNRF) and landscape change for road corridor of Uttarakhand, India,” *Environment, Development and Sustainability*, 23(9), pp. 13526–13554. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01226-1>.

- Syofiah, Y.S. and Ahyuni (2024) “Pemetaan Kawasan Bahaya Bencana Longsor Di Kabupaten Solok Menggunakan Metode Random Forest,” *Jurnal Buana* [Preprint], (4).
- Triwahyuni, L., Sobirin and Saraswat, R. (2017) “Analisis Spasial Wilayah Potensi Longsor dengan Metode SINMAP dan SMORPH di Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta,” *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 8, pp. 69–76. Available at: <https://jurnal.polban.ac.id/ojs-3.1.2/proceeding/article/view/701>.
- Wijaya, A.H., Novianti, T.C. and Rahmadi, E. (2024) “Pemetaan Daerah Bahaya Tanah Longsor Di Kecamatan Balik Bukit Kabupaten Lampung Barat Dengan Metode Weighted Overlay,” 1(2), pp. 62–71. Available at: <https://doi.org/10.36982/jops.v1i2.4904>.
- Xie, W. *et al.* (2021) “Landslide hazard assessment based on Bayesian optimization–support vector machine in Nanping City, China,” *Natural Hazards*, 109(1), pp. 931–948. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04862-y>.