

Pemetaan Kerawanan Longsor Berbasis *Maximum Entropy* di Kabupaten Tulungagung

Aurora Anindya*, Arizaldi Wicaksono Putro, Lailla Nirmala Tjatur Utari, Lintang Cahya Kumara, Fina Faizatur Rif'ah, Vallerina Agasta, Naia Naura Risanti, Fathan Surya Pradana, Luthfi Arzaqi Astrian, dan Rainanda Sahri

Departemen Geografi Lingkungan, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia; e-mail: auroraanindya@mail.ugm.ac.id

ABSTRAK

Longsor merupakan salah satu bencana prioritas penanggulangan di Kabupaten Tulungagung karena frekuensinya yang tinggi serta dampak kerugian sosial-ekonomi yang signifikan. Variasi kondisi biofisik dan aktivitas antropogenik di wilayah ini menyebabkan tingkat kerawanan longsor yang beragam. Hingga kini, penerapan metode *Maximum Entropy* (MaxEnt) dalam pemetaan kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung masih terbatas dan belum disertai kajian komputasi yang memadai untuk evaluasi spasial yang andal. Penelitian ini bertujuan untuk memetakan dan menganalisis kerawanan longsor menggunakan algoritma MaxEnt, serta meninjau efektivitas upaya mitigasi bencana yang telah diterapkan di Kabupaten Tulungagung. Data yang digunakan meliputi 132 titik kejadian longsor periode 2018–2025 dan 11 faktor pengontrol longsor. Pemodelan dilakukan dengan pembagian data sebesar 75% sebagai data latih dan 25% sebagai data uji. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor elevasi, litologi, dan jarak terhadap jalan merupakan kontributor paling signifikan terhadap kejadian longsor. Evaluasi kinerja model menggunakan kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC) menghasilkan nilai *Area Under the Curve* (AUC) sebesar 0,934 yang menunjukkan tingkat akurasi sangat baik. Hasil ini menegaskan bahwa metode MaxEnt efektif dalam memetakan zona kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung. Temuan penelitian ini diharapkan dapat menjadi instrumen penapisan awal pada skala regional dalam perumusan strategi mitigasi bencana berbasis tata ruang yang lebih adaptif guna meminimalkan risiko korban jiwa serta kerugian sosial-ekonomi di masa mendatang.

Kata kunci: Kerawanan, longsor, *maximum entropy*, kabupaten tulungagung

ABSTRACT

Landslides represent one of the priority hazards for disaster risk management in Tulungagung Regency due to their high occurrence frequency and substantial socio-economic impacts. The heterogeneity of biophysical characteristics combined with varying anthropogenic pressures across the region results in spatially diverse landslide susceptibility. To date, the application of the Maximum Entropy (MaxEnt) approach for landslide susceptibility mapping in Tulungagung Regency remains limited and has not been sufficiently supported by rigorous computational-based spatial evaluation. This study aims to map and analyze landslide susceptibility using the MaxEnt algorithm and to assess the effectiveness of existing disaster mitigation measures implemented in Tulungagung Regency. The analysis is based on 132 recorded landslide events from 2018 to 2025 and 11 conditioning factors. Model development employed a data partitioning scheme of 75% for training and 25% for validation. The results reveal that elevation, lithology, and distance to roads are the most influential factors controlling landslide occurrence. Model performance evaluation using the Receiver Operating Characteristic (ROC) curve yielded an Area Under the Curve (AUC) value of 0.934, indicating excellent predictive capability. These findings demonstrate that the MaxEnt model is highly effective for delineating landslide susceptibility zones in Tulungagung Regency. The outcomes of this study are expected to serve as an initial screening tool at the regional scale for formulating more adaptive spatial planning-based disaster mitigation strategies aimed at minimising future risks of loss of life and socioeconomic losses.

Keywords: susceptibility, landslide, maximum entropy, tulungagung regency

Citation: Anindya, A., Putro, A. W., Utari, L. N. T., Kumara, L. C., Rif'ah, F. F., Agasta, V., Risanti, N. N., Pradana, F. S., Astrian, L. A., dan Sahri, R. (2026). Pemetaan Kerawanan Longsor Berbasis *Maximum Entropy* di Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1187-1208, doi:10.14710/jil.24.5.1187-1208

1. PENDAHULUAN

Frekuensi kejadian longsor secara global menunjukkan tren meningkat dalam beberapa dekade terakhir. Meskipun terdapat variasi pola spasial dan temporal, data selama 60 tahun terakhir menunjukkan bahwa bencana longsor tumbuh relatif tinggi dibandingkan bencana seismik (Remondo dkk., 2025). Peningkatan ini didorong oleh interaksi kompleks antara perubahan iklim dan cuaca ekstrem dengan tekanan antropogenik. Dinamika iklim global mendorong curah hujan ekstrem menjadi lebih intens dan sering terjadi, terutama pada wilayah beriklim tropis yang sangat dipengaruhi oleh fenomena siklon pada setiap tahunnya (Mejia-Manrique dkk., 2025). Secara empiris, mayoritas kejadian longsor di dunia terkonsentrasi di wilayah pegunungan daerah tropis dan sedang (Fidan dkk., 2024). Indonesia sebagai negara tropis, khususnya di Pulau Jawa dengan kondisi geologi aktif dan topografi beragam menghadapi tantangan serius dalam memahami pola spasial kejadian longsor. Dampak yang ditimbulkan sangat destruktif dan sering kali menimbulkan korban jiwa dalam jumlah yang besar (Susena dkk., 2025), sehingga diperlukan evaluasi kerawanan longsor yang dapat menjelaskan hubungan antar data kejadian dengan faktor pengontrol secara lebih andal.

Kabupaten Tulungagung merepresentasikan wilayah tropis di Indonesia dengan tingkat kompleksitas faktor pengontrol longsor yang tinggi, baik secara biofisik maupun antropogenik. Selama beberapa tahun terakhir, lebih dari 100 kejadian longsor telah tercatat oleh Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tulungagung akibat kondisi lingkungan yang rentan dan tekanan penggunaan lahan yang tinggi. Kondisi tersebut menjadikan wilayah Tulungagung memiliki tingkat kerawanan longsor yang tinggi di beberapa lokasi. Akan tetapi, tingkat kerawanan tersebut belum diimbangi dengan atensi ilmiah maupun kajian komputasi yang memadai dalam evaluasi kerawanan longsor. Informasi kerawanan longsor sangat penting untuk meminimalkan korban jiwa dan mencegah kerugian ekonomi akibat kerusakan properti, kegagalan infrastruktur jalan, serta gangguan pada jaringan vital daerah (Zhu dkk., 2025; Mejia-Manrique dkk., 2025). Selain itu, informasi kerawanan memberikan jawaban atas pertanyaan “di mana” longsor kemungkinan besar akan terjadi, serta menjadi dasar bagi sistem peringatan dini yang proaktif sehingga proses evakuasi dilakukan lebih tepat dan akurat (Persichillo dkk., 2017).

Informasi kerawanan longsor bergantung pada pemahaman terhadap faktor-faktor yang mengontrol dan memicu terjadinya longsor. Bagian utara Tulungagung didominasi oleh lereng terjal Pegunungan Wilis dengan curah hujan yang tinggi, sehingga meningkatkan kerawanan wilayah ini. Sementara itu, bagian tengah berkembang dataran fluviovulkan yang relatif landai dan bagian selatan dicirikan oleh perbukitan dan tebing-tebing karst. Hingga saat ini, aktivitas pemanfaatan lahan yang

masif melalui berbagai mekanisme yang merusak stabilitas alami lereng dapat memperburuk kejadian longsor. Perkembangan infrastruktur strategis seperti Jalur Lintas Selatan (JLS) dan ekspansi aktivitas permukiman hingga pertanian telah memicu perubahan tutupan lahan dan modifikasi lereng yang signifikan. Kompleksitas interaksi antar faktor pengontrol dan pemicu tersebut menuntut adanya evaluasi kerawanan longsor yang sistematis dan berbasis analisis spasial.

Kebutuhan akan evaluasi kerawanan longsor menjadi krusial karena memiliki peran strategis sebagai dasar penyusunan kebijakan mitigasi berbasis spasial, khususnya dalam konteks pengurangan risiko bencana. Informasi zonasi kerawanan longsor menjadi langkah awal yang sangat penting untuk penilaian bahaya dan risiko, khususnya dalam mengidentifikasi wilayah yang rawan, memprioritaskan area yang memerlukan tindakan mitigasi, serta mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (Persichillo dkk., 2017; Corominas dkk., 2014). Zonasi kerawanan longsor mampu mengidentifikasi area berpotensi longsor di masa depan melalui integrasi data kejadian longsor masa lalu dengan faktor-faktor pengontrol utama yang merepresentasikan proses terjadinya longsor (Ali dkk., 2025). Keandalan zonasi kerawanan menjadi krusial karena kesalahan dalam mengidentifikasi tingkat kerawanan dapat berimplikasi langsung pada meningkatnya potensi kerugian (Höhn dkk., 2025).

Evaluasi kerawanan longsor sering dihadapkan pada kendala pemodelan, mulai dari tingginya bias subjektivitas pada pendekatan kualitatif (Umbara dkk., 2024), hingga tingginya tuntutan ketersediaan data latih yang masif pada algoritma *Machine Learning* konvensional (Shen dkk., 2023). Sebagian besar model prediktif spasial umumnya mewajibkan ketersediaan data area non-longsor (*absence data*). Padahal, validitas *absence data* ini sangat sulit dipastikan di lapangan dan rentan memicu bias pada hasil prediksi (Melati dkk., 2024). Algoritma *Maximum Entropy* (MaxEnt) menawarkan keunggulan distingtif sebagai model berbasis *presence-only*. Pendekatan ini mengeliminasi bias pembuatan *absence data* dan terbukti menghasilkan prediksi spasial yang stabil meski hanya mengandalkan data kejadian longsor (Tekin dkk., 2020; Boussouf dkk., 2023).

Efektivitas MaxEnt telah diuji di beberapa wilayah tropis Indonesia, antara lain Kabupaten Kuningan, Jawa Barat (Suhermat dkk., 2024), dan Kecamatan Teluk Ambon Baguala, Ambon (Rakuasa & Pertuack, 2025). Studi-studi tersebut umumnya berfokus pada pemetaan zonasi kerawanan dengan cakupan data inventarisasi yang terbatas. Selain itu, studi terdahulu masih mengembangkan model berdasarkan karakteristik wilayah masing-masing, sehingga pola kerawanan serta kontribusi faktor pengontrol dan pemicunya perlu dikaji kembali pada wilayah dengan kondisi fisiografis dan tekanan

penggunaan lahan yang berbeda. Kondisi tersebut menjadi penting di Kabupaten Tulungagung yang memiliki kompleksitas bentanglahan dan didukung oleh ketersediaan data inventarisasi longsor yang lebih ekstensif. Oleh karena itu, diperlukan pemodelan yang secara khusus mengidentifikasi pola kerawanan serta faktor pengontrol dan pemicu longsor di Kabupaten Tulungagung.

Penelitian ini bertujuan memodelkan kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung menggunakan algoritma MaxEnt. Peta kerawanan longsor yang dihasilkan diharapkan dapat menyediakan informasi awal untuk mengidentifikasi wilayah prioritas mitigasi pada skala regional. Penelitian ini juga mengidentifikasi upaya mitigasi yang telah diterapkan untuk memberikan Gambaran mengenai kesiapsiagaan masyarakat dalam menghadapi potensi bencana. Dengan demikian, hasil penelitian diharapkan dapat mengintegrasikan informasi spasial kerawanan dengan kondisi kesiapsiagaan masyarakat dalam mendukung perumusan strategi mitigasi di Kabupaten Tulungagung.

2. METODE PENELITIAN

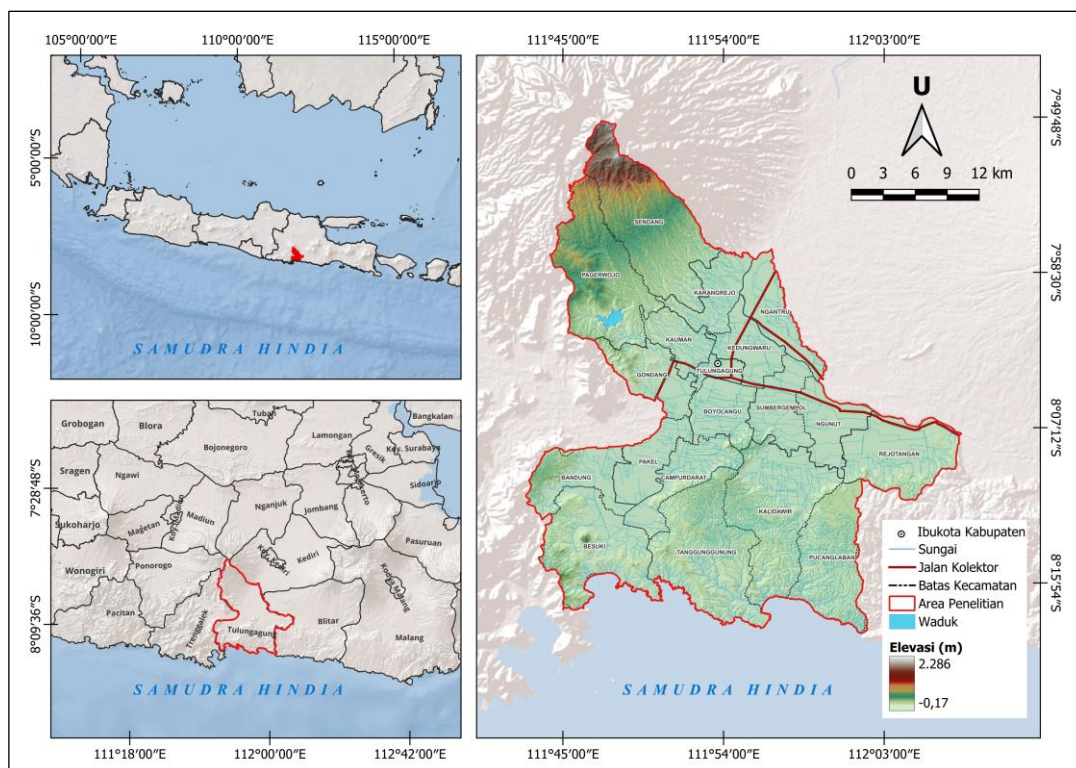
2.1. Deskripsi Wilayah

Kabupaten Tulungagung merupakan wilayah administrasi di Provinsi Jawa Timur yang terletak sekitar 154 km di barat daya Kota Surabaya (Gambar 1). Wilayah ini memiliki luas sekitar 1.132 km² dengan kondisi fisik wilayah dicirikan oleh Pegunungan Wilis-Liman di utara, dataran rendah di bagian tengah, serta rangkaian Pegunungan Selatan di bagian selatan. Sistem hidrografi utama ditandai oleh keberadaan Kali Ngrowo sebagai anak Sungai

Brantas yang melintasi pusat Kota Tulungagung.

Kondisi topografi Tulungagung menunjukkan variasi elevasi yang signifikan dari dataran rendah hingga pegunungan tinggi. Tulungagung berada pada ketinggian sekitar 85 m di atas permukaan laut dengan titik tertinggi berada di Gunung Wilis dengan elevasi mencapai 2.286 m. Variasi elevasi tersebut membentuk kemiringan lereng yang beragam dan berpengaruh terhadap proses hidrologi serta kestabilan lereng. Kondisi ini berinteraksi dengan iklim tropis monsun yang dipengaruhi oleh angin muson barat dan timur, sehingga membentuk pola curah hujan musiman dengan intensitas antara 1.250-1.800 mm per tahun dan jumlah hari hujan sekitar 70-130 hari (Mi'roji dkk., 2023).

Kombinasi kondisi fisiografis, topografi, dan iklim menjadikan Kabupaten Tulungagung memiliki potensi kebencanaan yang beragam. Bencana banjir berkembang di dataran rendah, tanah longsor dominan di wilayah perbukitan, serta kekeringan sering terjadi di kawasan karst pada musim kemarau, dengan potensi gempa bumi dan tsunami di pesisir selatan akibat aktivitas tektonik regional (Pabowo & Eldon, 2018). Kerawanan tersebut semakin meningkat akibat dinamika sosial dan tekanan penggunaan lahan. Pembangunan Jalur Lintas Selatan (JLS) sejak 2015 serta perluasan lahan pertanian jagung melalui program swasembada pangan mendorong alih fungsi hutan menjadi lahan budidaya, yang berpotensi menurunkan fungsi ekologis lereng dan meningkatkan kejadian tanah longsor di wilayah perbukitan (Lestari dkk., 2024; Manvaati dkk., 2025).



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2. Inventarisasi Longsor

Inventarisasi disusun melalui integrasi data sekunder dan data lapangan sebagai dasar pemodelan kerawanan tanah longsor di Kabupaten Tulungagung. Data sekunder diperoleh dari Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tulungagung yang mencatat 122 titik kejadian longsor selama periode 2018-2025. Untuk memperkuat representasi spasial kejadian longsor pada proses pemodelan, ditambahkan 10 titik longsor hasil survei lapangan yang berfungsi sebagai sampel kejadian tambahan dalam *re-running* model. Selain itu, validasi model kerawanan longsor tentatif dilakukan pada 13 titik pengamatan lapangan yang mewakili seluruh kelas kerawanan (Gambar 3). Titik validasi tidak digunakan dalam *re-running* model. Pada kelas kerawanan tinggi dan sedang, titik validasi berasal dari inventarisasi kejadian longsor BPBD yang kemudian dikonfirmasi melalui survei lapangan. Pada kelas kerawanan rendah, dua titik dipilih secara acak pada area yang diklasifikasikan model sebagai kerawanan rendah. Pendekatan penggabungan data historis dan validasi lapangan bertujuan untuk meningkatkan akurasi lokasi serta memperkuat representativitas titik kejadian longsor serta memperkuat validitas spasial hasil pemodelan kerawanan longsor (Ghosh dkk., 2020; Guzzetti dkk., 2012).

2.3. Data untuk Pemodelan Kerawanan Longsor

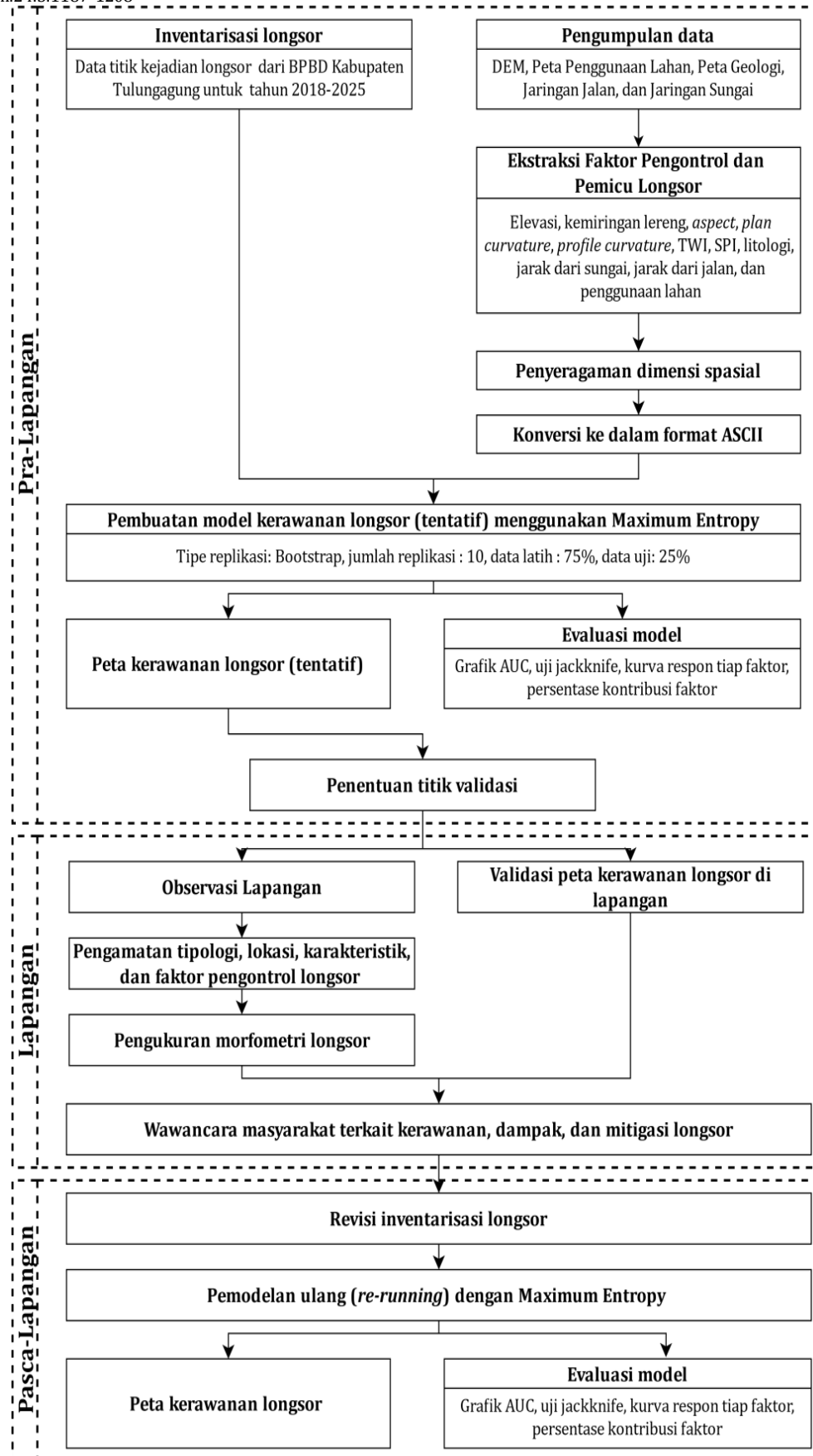
Pengumpulan data dan penyusunan basis data faktor pengontrol merupakan tahapan penting dalam pemodelan kerawanan longsor (Ercanoglu & Gokceoglu, 2002). Penelitian ini menggunakan dua

input utama, yaitu titik kejadian longsor dan faktor pengontrol. Data kejadian longsor tersebut dibagi berdasarkan algoritma partisi acak menjadi 75% sebagai data latih untuk pengembangan model dan 25% sebagai data uji untuk menguji akurasi model. Penelitian ini menggunakan 11 faktor pengontrol longsor dalam pemodelan, yaitu elevasi, kemiringan lereng, arah hadap lereng (*aspect*), *plan curvature*, *profile curvature*, *terrain wetness index* (TWI), *stream power index* (SPI), litologi, jarak dari sungai, jarak dari jalan, dan penggunaan lahan. Pemilihan faktor tersebut mengacu pada kerangka kerja *benchmarking dataset* oleh Samodra dkk (2024) yang dirancang khusus untuk pemodelan kerawanan longsor berbasis pembelajaran mesin. Pendekatan ini memastikan konsistensi metodologis, keterbandingan performa model, serta keterujian hubungan statistik antara variabel geomorfologis dan antropogenik dengan kejadian longsor.

Berdasarkan faktor pengontrol yang telah ditetapkan, pengelolaan basis data spasial dilakukan untuk membangun lingkungan analisis yang terstandar. Data inventarisasi longsor dan seluruh faktor pengontrol diintegrasikan ke dalam satu sistem basis data spasial dengan resolusi seragam sebesar 0,27 detik busur atau sekitar 8,1 meter yang diturunkan dari DEMNAS. Penyeragaman ini diikuti dengan konversi seluruh lapisan data ke dalam format ASCII agar kompatibel dalam analisis. Basis data yang terstruktur tersebut mendukung proses input data secara efisien ke dalam algoritma *Maximum Entropy* untuk menganalisis interaksi spasial yang kompleks. Gambaran umum alur penelitian ditampilkan pada Tabel 1 dan Gambar 2.

Tabel 1. Data untuk Pemetaan Kerawanan Longsor

Tujuan	Sumber Data	Spesifikasi
Inventarisasi longsor		
Pemetaan titik kejadian longsor	BPBD Kabupaten Tulungagung	Data spasial titik kejadian longsor tahun 2018-2025
Faktor pengontrol dan pemicu longsor		
Elevasi	DEMNAS	DEMNAS memiliki resolusi spasial 0,27 detik busur (8,1 m) dan datum vertikal EGM2008. (https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/login?page=/unduh/DEMnas)
Kemiringan Lereng		
<i>Aspect</i>		
<i>Plan Curvature</i>		
<i>Profile Curvature</i>		
<i>Stream Power Index (SPI)</i>		
<i>Terrain Wetness Index (TWI)</i>		
Geologi/Litologi	Badan Geologi	Skala 1:50.000
Jarak dari sungai	Badan Informasi Geospasial	Data jaringan sungai dari peta rupabumi Indonesia Skala 1:25.000
Jarak dari jalan		Data jaringan jalan dari peta rupabumi Indonesia Skala 1:25.000
Penggunaan lahan	Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah (Bappeda) Kabupaten Tulungagung	Skala 1:50.000
Pemetaan kerawanan longsor		
Pengembangan model dan peta kerawanan longsor	- Data kejadian longsor - Parameter pengontrol longsor	Perangkat lunak <i>Maximum Entropy</i>
Validasi Model		
Evaluasi akurasi model	Model kerawanan longsor	Perangkat lunak <i>Maximum Entropy</i>



Gambar 2. Alur Metodologi Penelitian

2.4. Prinsip Kerja *Maximum Entropy*

Maximum Entropy (MaxEnt) merupakan suatu metode *machine learning* yang berbasis model probabilistik eksponensial untuk memprediksi distribusi geografis spesies (Phillips dkk., 2006). Model MaxEnt awalnya kerap digunakan dalam bidang biogeografi, ekologi, dan konservasi biologi (Elith & Leathwick, 2009). Penggunaan model MaxEnt kemudian berkembang dalam ranah geosains untuk pemetaan kerawanan longsor (Park, 2015; Kornejady dkk., 2017; Boussouf dkk., 2023). Dalam konteks pemodelan kerawanan longsor, MaxEnt mengestimasi distribusi probabilitas kejadian dengan menggunakan data lokasi longsor (*presence-only*) sebagai sampel dan variabel lingkungan (seperti kemiringan lereng dan curah hujan) sebagai prediktor lingkungan. Algoritma *machine learning* ini kemudian bekerja dengan mengestimasi distribusi paling seragam (entropi maksimum) yang mengintegrasikan variabel lingkungan dengan data titik kejadian longsor tersebut, sehingga menghasilkan prediksi peluang kejadian longsor berdasarkan hubungan antara faktor-faktor tersebut (Ilinca dkk., 2025).

Pada tahap eksekusi model MaxEnt, perhitungan kontribusi variabel dilakukan berdasarkan variabel lingkungan dengan kurva respon dan uji *Jackknife* untuk menentukan faktor dominan yang mempengaruhi terjadinya longsor (Phillips, 2006). Model ini kemudian menghasilkan peta probabilitas yang kemudian diklasifikasikan ulang sesuai dengan kelas kerawanan longsor. Tingkat kerawanan longsor di Tulungagung diklasifikasikan dalam 5 kelas menggunakan metode *natural breaks*. Metode *natural breaks* atau *Jenks natural break classification* merupakan teknik pengelompokan data yang menentukan susunan nilai paling optimal ke dalam beberapa kelas dengan meminimalkan varians di dalam setiap kelas dan memaksimalkan varians antarkelas (Chen dkk., 2013). Metode ini dipilih karena klasifikasi batas kelas dibentuk berdasarkan pengelompokan alami dari distribusi nilai data, sehingga dapat menggambarkan variasi empiris yang dihasilkan oleh model (Melati dkk., 2024). Selain itu, metode ini cukup umum digunakan pada pemetaan kerawanan longsor (Margarint dkk., 2013; Elia dkk., 2023; Alvioli dkk., 2024).

2.5. Uji Akurasi Model Kerawanan

Salah satu tahapan paling penting dalam pemodelan adalah uji akurasi (Samodra, 2024). Pada penelitian ini, uji akurasi hasil prediksi model kerawanan longsor dilakukan menggunakan kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC). Metode evaluasi berbasis ROC didasarkan pada dua

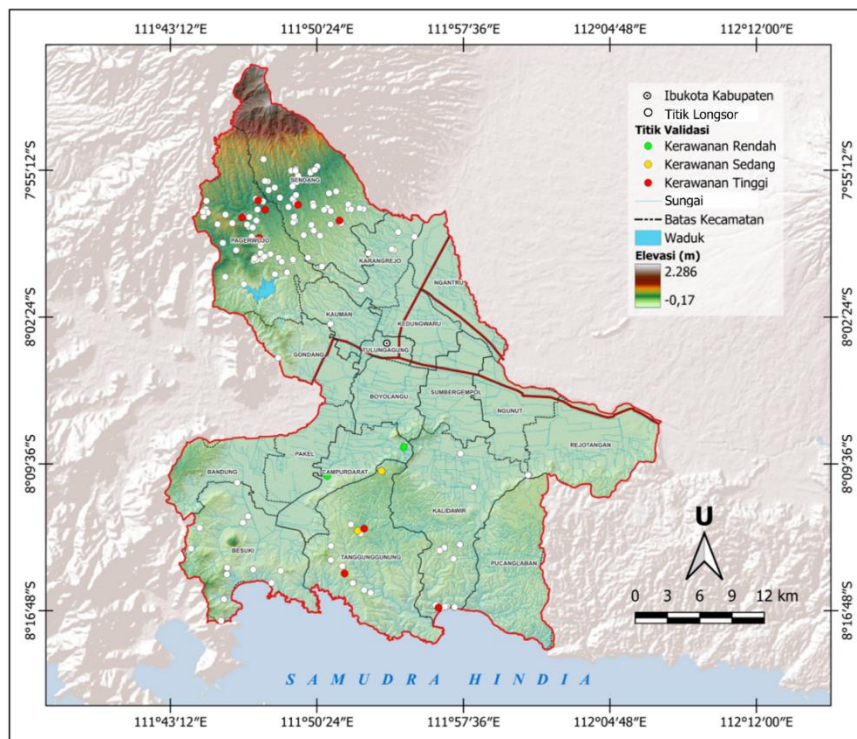
parameter utama, yaitu sensitivitas dan spesifisitas (Baldwin, 2009). Sensitivitas menunjukkan kemampuan model dalam memprediksi keberadaan kejadian longsor. Sementara itu, spesifisitas menggambarkan kemampuan model dalam memprediksi ketidakhadiran kejadian longsor. Kedua parameter tersebut direpresentasikan dalam bentuk grafik *Area Under the Curve* (AUC). Model yang optimal ditunjukkan oleh kurva yang berada pada posisi tertinggi dan mengarah ke sisi kiri grafik (Suhermat dkk., 2024).

AUC merupakan statistik tunggal yang merangkum kinerja model secara keseluruhan. Nilai AUC berada pada rentang 0 hingga 1. Nilai AUC = 1 menunjukkan model yang mampu membedakan secara sempurna antara kasus positif dan negatif. Sebaliknya, nilai AUC = 0,5 menunjukkan bahwa model tidak memiliki kemampuan diskriminatif dan setara dengan tebakan acak (Lee dkk., 2020). Secara umum, nilai AUC > 0,7 menandakan model dengan kemampuan diskriminatif yang baik dan dapat diterima. Tingkat akurasi model prediktif berdasarkan nilai AUC dapat diklasifikasikan menjadi buruk (0,5–0,6), sedang (0,6–0,7), baik (0,7–0,8), dan sangat baik (0,8–0,9) (Tien Bui dkk., 2016).

3. HASIL PENELITIAN

3.1. Distribusi Spasial dan Tipologi Longsor

Sebanyak 132 kejadian longsor tercatat di Kabupaten Tulungagung selama periode 2018–2025 dengan konsentrasi spasial di wilayah utara dan selatan (Gambar 3). Di wilayah utara, lereng curam (>18°) menjadi pengontrol utama yang meningkatkan tegangan geser akibat besarnya gaya gravitasi yang menarik material lereng ke bawah. Dominasi semak serta tanaman musiman seperti jagung, porang, dan rumput gajah turut memperburuk stabilitas lereng karena minimnya penguatan mekanis pada struktur tanah. Hal ini sejalan dengan temuan Miao dkk. (2025) bahwa sistem perakaran dangkal pada tanaman musiman seperti jagung menjadi faktor utama rendahnya stabilitas lereng pada lahan budidaya. Masa tanam yang singkat (3–4 bulan) menghambat pembentukan jaringan akar yang cukup dalam untuk mengikat massa tanah secara efektif. Kondisi ini membatasi kontribusi akar terhadap kohesi tanah yang secara langsung memperlemah kekuatan mekanis lereng dalam menahan beban geser. Selain itu, praktik pengolahan lahan melalui pembajakan merusak struktur alami tanah dan mengurangi kepadatan massa tanah, yang pada akhirnya memicu kegagalan lereng melalui peningkatan porositas dan penghambatan ekspansi akar vertikal.



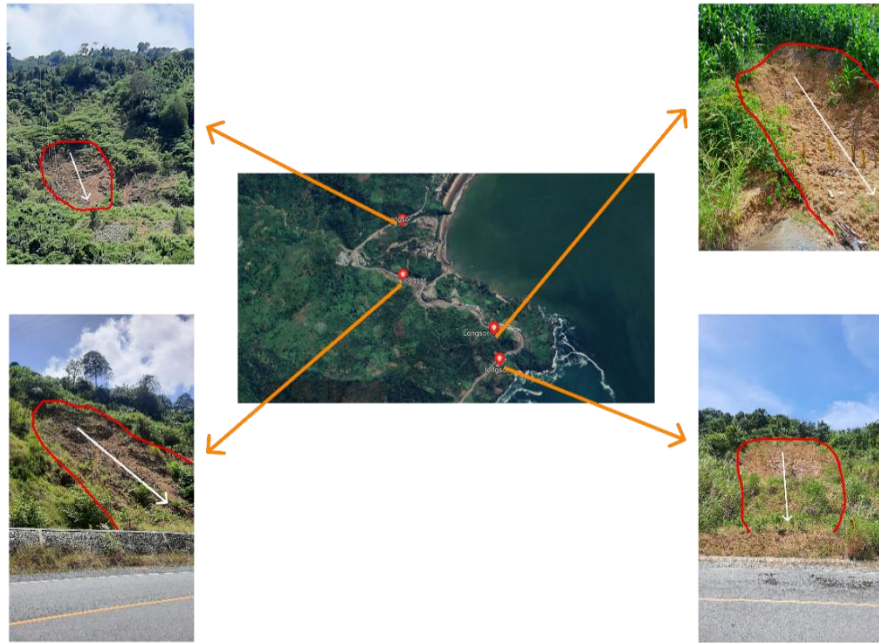
Gambar 3. Distribusi Titik Longsor Kabupaten Tulungagung Tahun 2018-2025

Berbeda dengan wilayah utara, kejadian longsor di wilayah selatan berkorelasi kuat dengan jarak dari jalan. Frekuensi longsor meningkat seiring berkurangnya jarak terhadap jaringan jalan, terutama di sepanjang JLS yang memotong kawasan perbukitan selatan Tulungagung (Gambar 4). Pola ini menunjukkan peran signifikan jaringan jalan dalam memicu longsor. Pembangunan JLS dilakukan melalui metode pemotongan lereng alami yang mengubah relief setempat. Modifikasi bentang alam dan perubahan mikorelief akibat aktivitas pemotongan lereng tersebut menurunkan kestabilan lereng dengan menciptakan lereng buatan yang lebih curam dan mengganggu keseimbangan massa tanah, sehingga mempercepat terjadinya longsor (Khan & Lateh, 2011; Chauhan dkk., 2025).

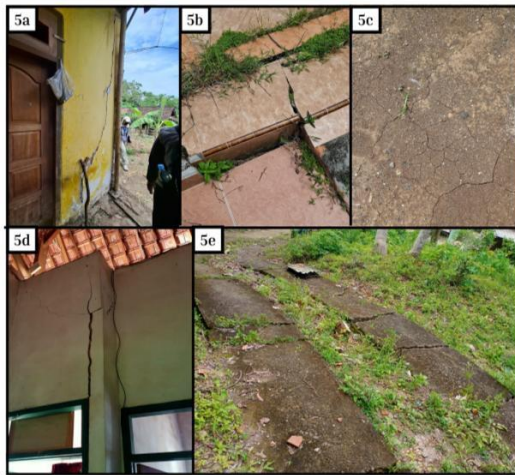
Hasil validasi menunjukkan bahwa seluruh titik validasi sesuai dengan kelas kerawanan hasil pemodelan (Gambar 3). Pada titik validasi kerawanan rendah, tidak ditemukan jejak longsor dan berdasarkan konfirmasi masyarakat setempat menunjukkan nihilnya kejadian longsor dalam satu dekade terakhir. Sementara itu, di titik validasi kerawanan sedang ditemukan fenomena rayapan tanah (*soil creep*) yang teridentifikasi melalui retakan pada badan jalan dan dinding rumah warga (Gambar 5). Rayapan tanah merupakan pergerakan massa tanah ke arah bawah lereng yang berlangsung sangat lambat akibat gravitasi dan tidak dapat dirasakan secara langsung kecuali melalui pengamatan jangka panjang (Sharpe, 1938; Heimsath & Jungers, 2013). Proses ini juga dipengaruhi oleh fluktuasi kelembaban tanah akibat siklus pembasahan dan

pengeringan yang memicu kembang kerut mineral lempung (Carson & Kirkby, 1972). Kondisi tersebut sesuai dengan temuan lapangan yang menunjukkan sifat kembang kerut tanah tinggi dan munculnya retakan pada bangunan setiap musim penghujan.

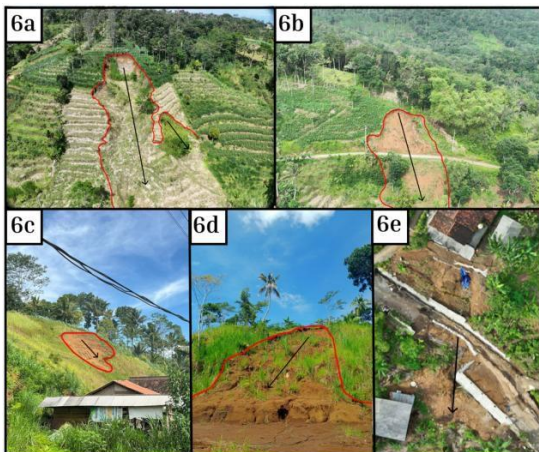
Pada zona kerawanan tinggi, teridentifikasi tipe longsor *earth slide* dan *debris slide* yang mengalami reaktivasi setiap musim penghujan. *Earth slide* adalah pergerakan massa tanah yang didominasi oleh $\geq 80\%$ material halus berukuran < 2 mm (pasir, lanau, atau lempung) yang meluncur di sepanjang bidang lemah antara massa labil dan material stabil. Sementara itu, *debris slide* adalah pergerakan massa tanah yang didominasi oleh 20% - 80% material kasar berukuran > 2 mm (kerikil, fragmen batuan, atau bongkah) yang meluncur di sepanjang bidang gelincir (Cruden & Varnes, 1996). Karakteristik *earth slide* di lokasi pengamatan memiliki morfologi gawir utama melengkung dengan arah pergerakan searah kemiringan lereng 18° - 40° . Longsor tipe ini ditemukan pada berbagai penggunaan lahan, mulai dari lahan pertanian jagung dan rumput gajah dengan sistem terasering (Gambar 6a dan 6b), lereng yang ditumbuhi rerumputan (Gambar 6c dan 6d), hingga area pemukiman (Gambar 6e). Kondisi tersebut menimbulkan ancaman serius karena massa tanah dapat meluncur melampaui kaki bidang gelincir dan menimbun infrastruktur jalan serta bangunan di bawahnya. Salah satunya *earth slide* di Desa Tugu, Kecamatan Sendang dengan panjang 29 m dan lebar 12 m yang menutup badan jalan dan menyebabkan amblesan serta terjadi longsor susulan (Gambar 7).



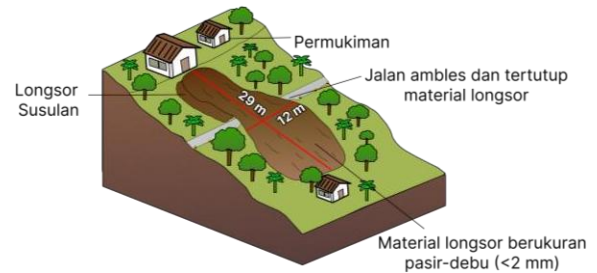
Gambar 4. Longsor di Sepanjang Jalan Lintas Selatan



Gambar 5. a) Dinding rumah retak di Desa Ngepoh, b) Lantai rumah retak di Desa Ngepoh, c) Retakan tanah akibat kembang kerut tinggi, d) Dinding rumah retak di Desa Pakisrejo, e) Jalan retak di Desa Pakisrejo

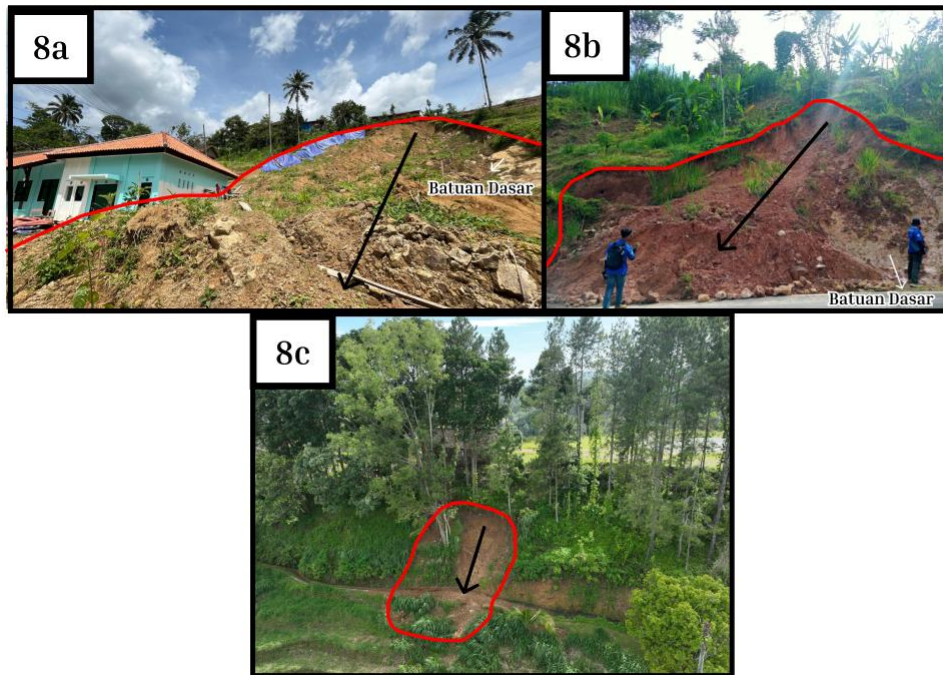


Gambar 6. a) *Earth slide* di lahan rumput gajah, b) *Earth slide* di lahan pertanian jagung, c dan d) *Earth slide* di lereng berumput, e) *Earth slide* di area permukiman



Gambar 7. *Earth Slide* di Desa Tugu, Kecamatan Sendang

Debris slide memiliki badan longsor cekung dengan material luncuran berupa campuran tanah dan bongkah batuan (Gambar 8). Pada sisi kanan badan longsor terdapat batuan dasar yang terekspos (Gambar 8a dan 8b). Batuan dasar yang bersifat masif dan kedap air ini menciptakan zona kontak dengan lapisan tanah yang memicu terjadinya longsor. Hal ini dikarenakan air hujan yang meresap akan tertahan oleh batuan dasar menyebabkan penjenjutan dan penambahan bobot massa tanah pada zona lapukan (Hidayat dkk., 2016). *Debris slide* juga ditemukan berasosiasi dengan jalan di kaki lereng dan berkembang pada lereng dengan vegetasi campuran serta rerumputan berkepadatan sedang (Gambar 8c). Temuan *debris slide* terbesar memiliki panjang 105 m dengan ketebalan material 0,5 – 2 m yang berada di Desa Kradinan, Kecamatan Pagerwojo. Longsor ini menutup total akses Jalan Tulungagung-Trenggalek melalui Pagerwojo dan merusak bangunan sekolah (Gambar 9). Berdasarkan kesaksian masyarakat, area yang dimanfaatkan sebagai lahan pertanian jagung dan porang ini telah mengalami tiga kali reaktivasi longsor sepanjang periode Juni-November 2025.



Gambar 8. a) *Debris Slide* di Lahan Pertanian Jagung, b) *Debris Slide* di Lereng Bersemak, c) *Debris Slide* di Lereng Bervegetasi Campuran



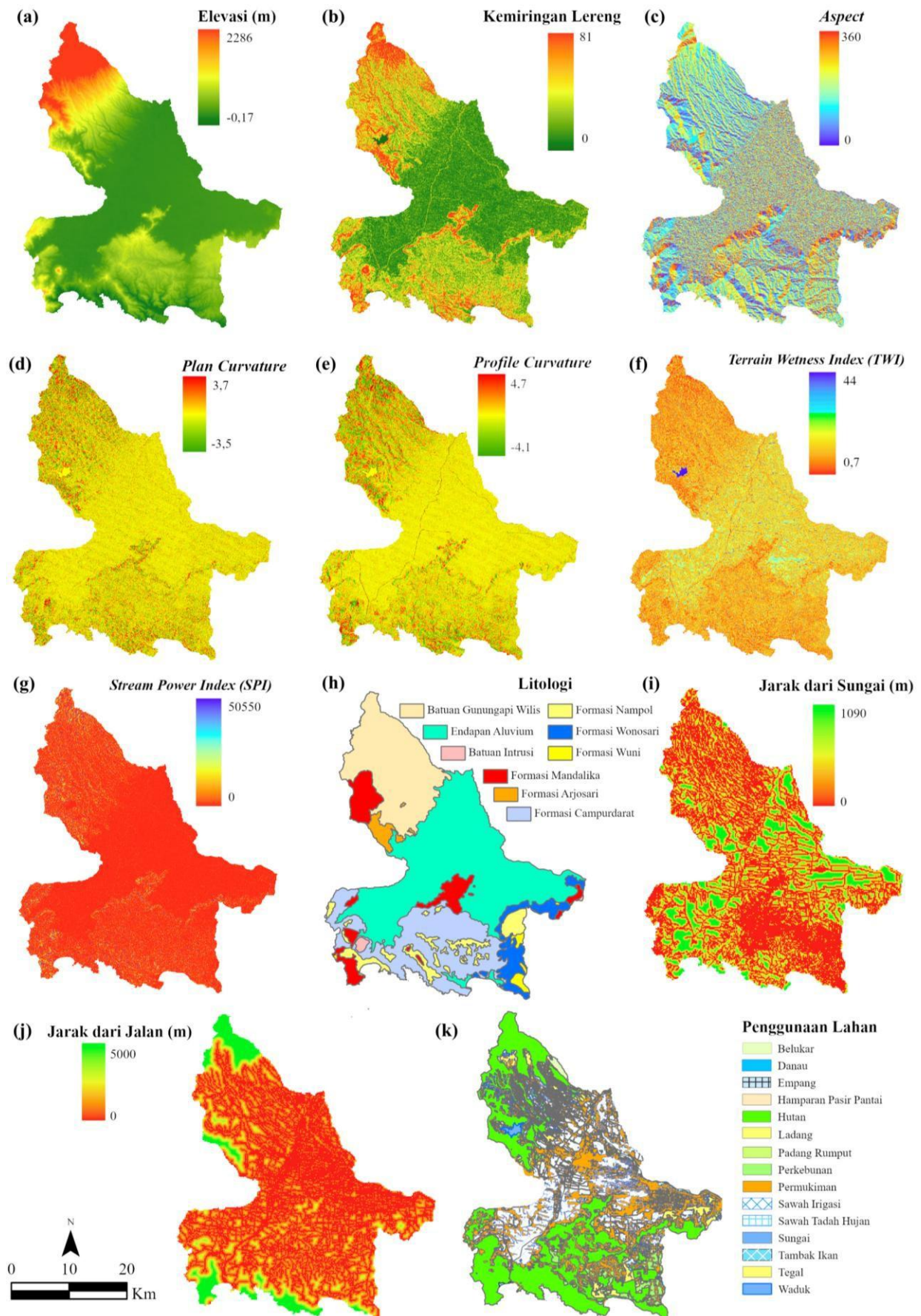
Gambar 9. *Debris Slide* di Desa Kradinan, Kecamatan Pagerwojo

3.2. Pemodelan Spasial Kerawanan Tanah Longsor

3.2.1. Kejadian Longsor Versus Faktor Pengontrol dan Pemicu Longsor

Kejadian tanah longsor di wilayah penelitian dipengaruhi oleh 11 variabel utama yang berperan sebagai faktor pengontrol dan pemicu longsor (Gambar 10). Variabel - variabel tersebut dikelompokkan ke dalam dua kelompok. Kelompok pertama adalah biofisik, yang meliputi elevasi,

kemiringan lereng, arah hadap lereng (*aspect*), *plan curvature*, *profile curvature*, *Terrain Wetness Index* (TWI), *Stream Power Index* (SPI), litologi, dan jarak dari sungai. Sementara itu, kelompok kedua berkaitan dengan aktivitas manusia yang direpresentasikan oleh jarak dari jalan dan penggunaan lahan. Interaksi antara kedua kelompok tersebut secara simultan menentukan tingkat kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung.



Gambar 10. Faktor-Faktor Pengontrol dan Pemicu Longsor: a) Elevasi, b) Kemiringan Lereng, c) Aspect, d) Plan Curvature, e) Profile Curvature, f) Terrain Wetness Index, g) Stream Power Index, h) Litologi, i) Jarak dari Sungai, j) Jarak dari Jalan, dan k) Penggunaan Lahan

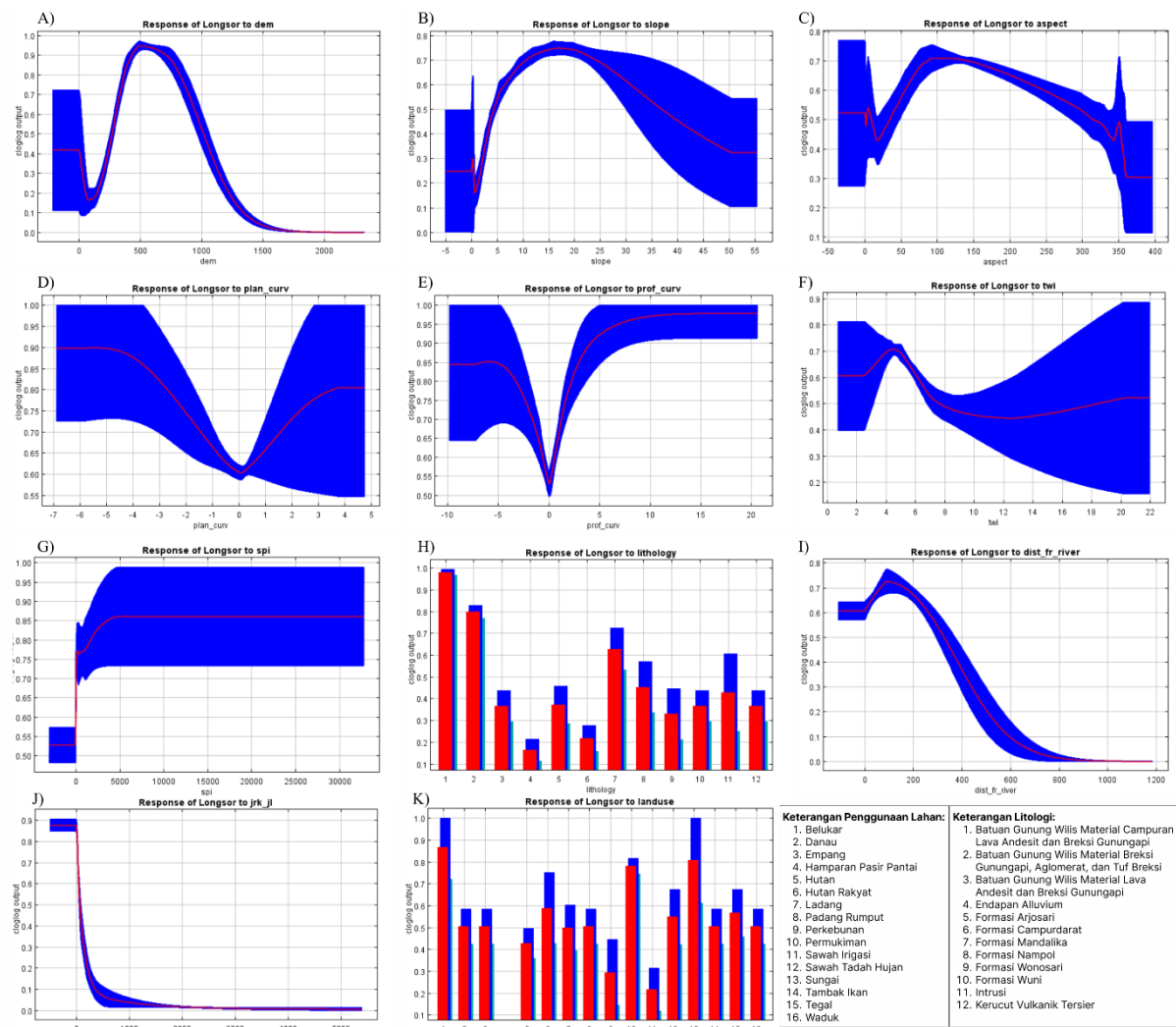
Elevasi dan kemiringan lereng menunjukkan pola yang khas terhadap kejadian longsor. Berdasarkan Gambar 11a, probabilitas longsor meningkat pada elevasi menengah sekitar 500-750 mdpl, kemudian menurun pada elevasi di atas 750 mdpl. Penurunan probabilitas pada elevasi yang lebih tinggi ini mungkin berkaitan dengan litologi yang lebih resisten, sedangkan elevasi menengah umumnya tersusun atas material lepas yang lebih rentan terhadap longsor. Intensitas aktivitas manusia juga lebih tinggi di lereng tengah daripada di lereng atas dan puncak (Susena dkk, 2025). Sejalan dengan itu, kemiringan lereng menunjukkan bahwa kejadian longsor meningkat seiring bertambahnya kecuraman lereng dan mencapai puncak pada kemiringan 15-20° (Gambar 11b). Namun, pada lereng dengan kemiringan lebih dari 25°, frekuensi longsor justru menurun akibat litologi yang lebih resisten, ketebalan pelapukan yang tipis atau bahkan tidak ada, serta minimnya aktivitas manusia (Rahardjo dkk., 1995; Susena dkk, 2025). Selain topografi, arah hadap lereng (*aspect*) juga berpengaruh terhadap distribusi longsor melalui perbedaan tingkat pelapukan dan kelembaban tanah yang berkaitan dengan insolasi matahari (Samodra, 2024). Berdasarkan Gambar 11c, sebagian besar kejadian longsor terkonsentrasi pada lereng yang menghadap timur laut, timur, dan tenggara. Pola ini sejalan dengan temuan Hadmoko dkk. (2017) yang menyatakan bahwa orientasi tersebut menerima intensitas curah hujan, kelembaban, dan radiasi matahari yang lebih tinggi dibandingkan arah lainnya.

Karakteristik kelengkungan lereng turut memperkuat pengaruh topografi terhadap kejadian longsor. Kejadian longsor lebih sering ditemukan pada lereng cekung dibandingkan lereng datar atau cembung (Gambar 11d-e). Lereng cekung cenderung mengakumulasi aliran permukaan dan meningkatkan erosi, terutama pada medan yang curam (Vijith & Dodge-Wan, 2019). Selain itu, lereng cekung memungkinkan infiltrasi air yang lebih besar sehingga meningkatkan tekanan air pori-pori dan menurunkan kestabilan lereng (Hadmoko dkk., 2017). Lalu, kondisi hidrologi lereng tercermin melalui nilai *Terrain Wetness Index* (TWI). TWI menggambarkan kelembaban tanah atau kecenderungan suatu lokasi untuk mengakumulasi air (Beven & Kirkby, 1979). Berdasarkan Gambar 11f, kejadian longsor maksimum berada pada TWI rendah. Nilai TWI yang rendah lebih rawan longsor karena merepresentasikan bagian atas lereng yang curam sebagai zona inisiasi longsor, tempat air cepat mengalir tanpa terakumulasi sehingga ketidakstabilan lebih dikendalikan oleh kelerengan dan tegangan geser daripada kejenuhan tanah (Rózycka dkk., 2016).

Stream Power Index (SPI) mencerminkan kekuatan aliran berdasarkan luas daerah tangkapan air dan kecuraman lereng (Samodra, 2024). Semakin

tinggi nilai SPI, semakin besar potensi terjadinya longsor, terutama hingga mencapai ambang kritis tertentu. Setelah ambang tersebut terlampaui, lereng berada pada kondisi sangat rentan dan peningkatan SPI selanjutnya tidak lagi meningkatkan kerawanan longsor secara signifikan (Gambar 11g). Kemudian, litologi menjadi faktor penting yang memengaruhi sifat mekanik lereng. Kejadian longsor paling banyak terjadi pada satuan batuan Gunungapi Wilis dan Formasi Mandalika (Gambar 11h). Batuan Gunungapi Wilis telah mengalami pelapukan intensif dan membentuk tanah dengan ketebalan lebih dari 20 m, sehingga memiliki tingkat kerawanan longsor yang tinggi (Fitria, 2016). Sementara itu, Formasi mandalika tersusun atas breksi gunung api berumur tersier (Oligosen akhir-Miosen awal) sekitar 33 juta tahun yang lalu. Usia batuan yang tua menyebabkan tingkat pelapukan yang sangat intensif, menghasilkan tanah pelapukan tebal dengan kestabilan lereng yang rendah (Mulyani dkk., 2025). Faktor biofisik terakhir, yaitu jarak dari sungai yang menunjukkan probabilitas longsor sangat tinggi pada jarak yang dekat dengan sungai dan menurun secara konsisten seiring bertambahnya jarak (Gambar 11i). Hal tersebut mengindikasikan bahwa sungai menjadi salah satu faktor pengontrol penting, karena memicu terjadinya erosi lateral menggerus kaki lereng sehingga mengurangi penyangga pada bagian bawah, yang menyebabkan lebih mudah runtuh, terutama ketika terjadi peningkatan debit pada musim hujan (Xingfu & Erdi, 2025).

Faktor aktivitas manusia semakin memicu kejadian longsor. Berdasarkan Gambar 11j, probabilitas longsor menurun seiring bertambahnya jarak dari jalan, yang menunjukkan konsentrasi longsor di sekitar jaringan jalan. Terutama banyaknya kejadian longsor pada JLS yang dibangun dengan memotong lereng. Kegiatan pembangunan jalan tersebut dapat mengakibatkan terjadinya perubahan sudut lereng serta beban yang dipikul oleh lereng di sisi jalan, sehingga berpotensi menyebabkan terjadinya longsor pada lereng tersebut (Sari dkk., 2021). Lalu, berdasarkan penggunaan lahan longsor banyak terjadi pada area belukar, permukiman, dan hutan rakyat (Gambar 11k). Belukar memiliki sistem perakaran dangkal sehingga kurang efektif dalam mengikat tanah. Permukiman menunjukkan probabilitas longsor tinggi akibat pemotongan lereng, beban bangunan, dan perubahan sistem drainase. Sementara itu, hutan rakyat di Tulungagung sebagian besar telah beralih fungsi menjadi ladang jagung (Yohanes, 2025) sehingga kehilangan fungsi ekologisnya sebagai penahan lereng. Hilangnya akar, tajuk, dan pengatur aliran air meningkatkan aliran permukaan dan energi aliran, mempercepat erosi, melemahkan struktur tanah, serta menciptakan kondisi hidrologis dan mekanik yang mendukung terjadinya kegagalan lereng.



Gambar 11. Korelasi Kejadian Longsor dengan setiap Faktor Pengontrol dan Pemicu: a) Elevasi, b) Kemiringan Lereng, c) Aspect, d) Plan Curvature, e) Profile Curvature, f) Terrain Wetness Index, g) Stream Power Index, h) Litologi, i) Jarak dari Sungai, j) Jarak dari Jalan, dan k) Penggunaan Lahan

3.2.2. Peringkat Kontribusi Faktor Pengontrol dan Pemicu Longsor

Kontribusi faktor pengontrol dan pemicu longsor dianalisis menggunakan algoritma MaxEnt melalui uji jackknife (Gambar 12). Uji jackknife digunakan untuk mengevaluasi tingkat kepentingan setiap variabel lingkungan dalam model, baik ketika suatu variabel digunakan secara tunggal (*with only variable*) maupun ketika variabel tersebut dikeluarkan dari model (*without variable*) (Susanto dkk., 2019). Kondisi *with only variable* menunjukkan kemampuan prediktif independen suatu variabel tanpa pengaruh variabel lain, sedangkan *without variable* menggambarkan seberapa besar penurunan kinerja model akibat hilangnya informasi dari variabel tersebut. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *test gain* tertinggi diperoleh saat seluruh variabel digunakan secara bersamaan ($\pm 1,6$), yang menegaskan bahwa kejadian longsor di Kabupaten Tulungagung bersifat multifaktorial dan dikontrol oleh interaksi berbagai faktor lingkungan.

Pada kondisi *with only variable*, elevasi dan litologi menunjukkan nilai *test gain* tertinggi

dibandingkan variabel lainnya, mengindikasikan bahwa kedua variabel ini memiliki daya prediktif independen yang kuat. Elevasi berperan sebagai pengontrol geomorfologi utama yang merefleksikan variasi relief, distribusi curah hujan, serta intensitas pelapukan batuan yang berpengaruh terhadap stabilitas lereng (Reichenbach dkk., 2018). Sementara itu, litologi menentukan karakteristik material penyusun lereng seperti tingkat pelapukan, kohesi, struktur, dan permeabilitas batuan yang menentukan mekanisme kegagalan lereng. Variabel jarak dari jalan juga menunjukkan kontribusi yang cukup signifikan secara individual, yang mengindikasikan pengaruh aktivitas antropogenik seperti pemotongan lereng dan gangguan sistem drainase. Sementara itu, variabel kemiringan lereng, penggunaan lahan, serta *plan* dan *profile curvature* memiliki nilai *test gain* lebih rendah ketika berdiri sendiri, menandakan bahwa perannya menjadi lebih efektif melalui interaksi dengan variabel lain.

Analisis *without variable* menunjukkan bahwa penghilangan variabel *aspect*, jarak dari sungai, TWI, SPI, serta *curvature* menyebabkan penurunan nilai

test gain yang relatif besar. Hal ini menunjukkan bahwa variabel-variabel tersebut menyumbang informasi unik yang tidak sepenuhnya dapat digantikan oleh variabel lain dalam model. Secara keseluruhan, hasil uji jackknife menegaskan bahwa elevasi, litologi, dan jarak dari jalan merupakan variabel dominan, sedangkan variabel hidrologi, morfometri, dan faktor antropogenik lainnya berperan sebagai penguat dan pengontrol lokal dalam menentukan tingkat kerawanan longsor.

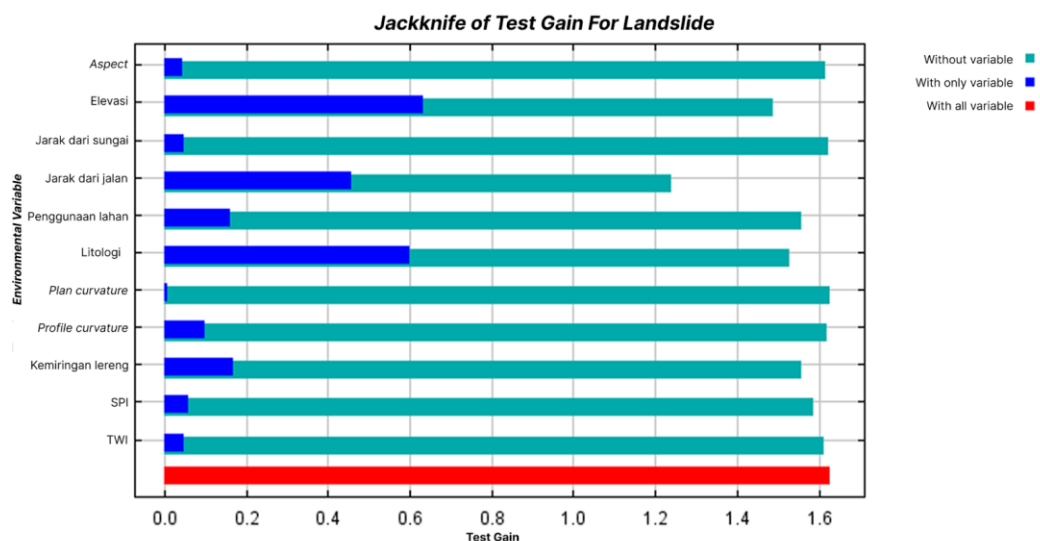
3.2.3. Analisis Peta Kerawanan Longsor

Hasil pemetaan kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung menggunakan MaxEnt diklasifikasikan menjadi lima kelas kerawanan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 13. Kelas tersebut meliputi kerawanan sangat rendah (715 km²), rendah (246 km²), sedang (96 km²), tinggi (48 km²), dan sangat tinggi (27 km²). Kelas kerawanan sangat rendah hingga rendah mendominasi wilayah kajian. Zona ini terkonsentrasi di bagian tengah Kabupaten Tulungagung yang merupakan dataran aluvial. Wilayah ini relatif stabil dan hanya memiliki potensi longsor dangkal (*shallow landslide*) yang umumnya muncul di sepanjang bantaran sungai akibat proses erosi lateral. Akan tetapi, tingkat kerawanan sangat rendah hingga rendah juga terdapat di puncak Gunung Wilis yang memiliki elevasi lebih dari 2.000 mdpl. Kondisi ini diduga berkaitan dengan litologi yang lebih resisten, ketebalan pelapukan tipis, serta aktivitas manusia yang sangat terbatas (Susena dkk., 2025). Temuan ini sejalan dengan respons faktor pengontrol utama, yaitu elevasi dan kemiringan lereng yang menunjukkan penurunan probabilitas longsor pada elevasi di atas 750 mdpl dan kemiringan lereng lebih dari 25°.

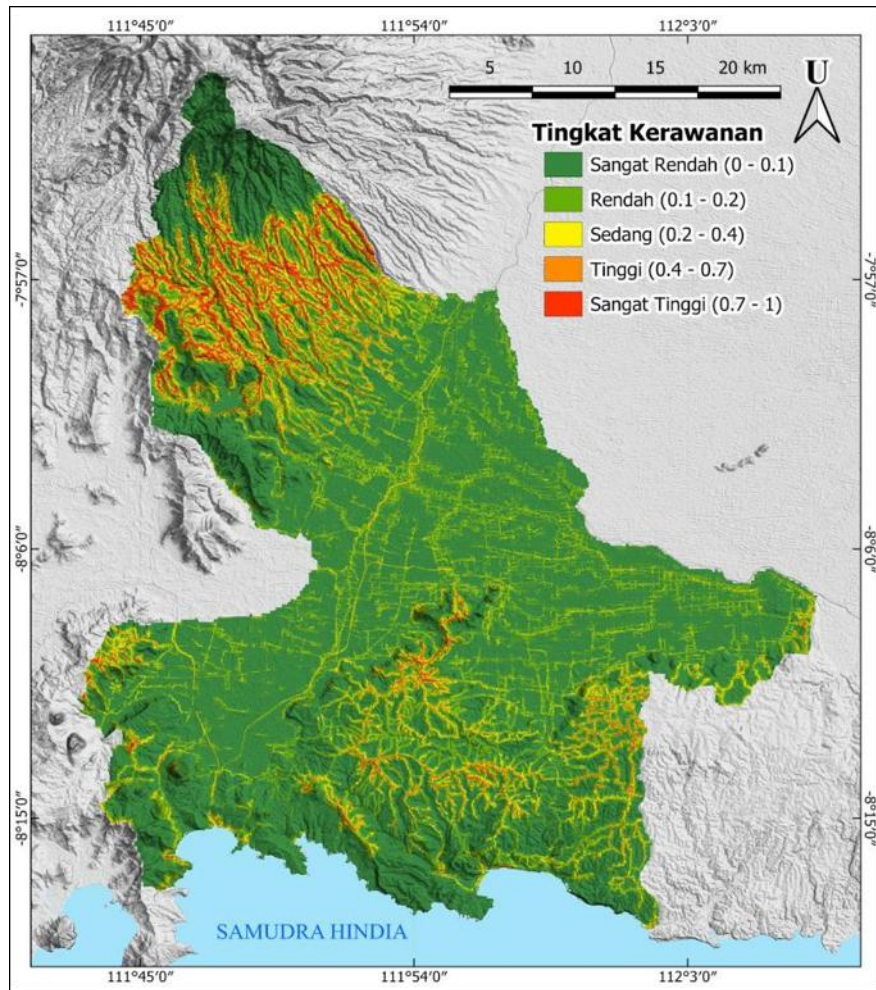
Kelas kerawanan sedang merepresentasikan zona dengan tingkat kerawanan moderat yang memerlukan perhatian dalam upaya mitigasi. Zona ini banyak ditemukan di bagian utara dan selatan Tulungagung. Wilayah tersebut dicirikan oleh kemiringan lereng sedang dan kondisi tutupan lahan yang lebih terdegradasi. Kondisi ini menjadikannya sebagai zona transisi yang membutuhkan pengelolaan lebih hati-hati terhadap potensi longsor (Rakuasa dkk., 2025). Lalu, kelas kerawanan tinggi dan sangat tinggi menempati luasan paling kecil. Namun, kelas ini memiliki tingkat kerawanan paling serius. Zona kerawanan tinggi hingga sangat tinggi terutama terkonsentrasi di bagian utara Kabupaten Tulungagung yang memiliki topografi curam pada lereng Gunung Wilis. Sebagian zona dengan kerawanan tinggi hingga sangat tinggi juga berkembang di wilayah selatan terutama yang berasosiasi dengan JLS.

3.2.4. Uji Kinerja Model Kerawanan Longsor

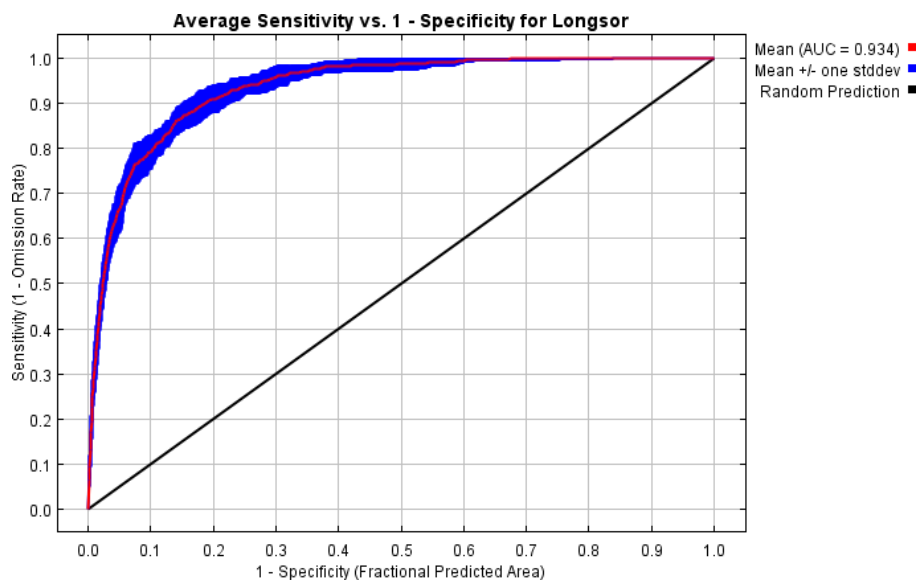
Uji akurasi model kerawanan longsor menggunakan kurva ROC menunjukkan nilai AUC sebesar 0,934 yang menandakan performa model MaxEnt sangat baik dan andal. Nilai AUC yang mendekati 1 menunjukkan kemampuan model yang sangat tinggi dalam membedakan secara spasial antara wilayah rawan longsor dan tidak rawan longsor (Rakuasa & Pertuack, 2025). Capaian ini mengindikasikan tingkat kesalahan omisi yang sangat rendah, sehingga sebagian besar area yang benar-benar rawan longsor berhasil teridentifikasi dan risiko kehilangan informasi penting di wilayah kritis dapat diminimalkan (Norallahi & Kaboli, 2021; Lorente, 2019). Hasil uji akurasi model ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 12. Grafik Uji Jackknife of Test for Landslide



Gambar 13. Peta Kerawanan Longsor Kabupaten Tulungagung



Gambar 14. Uji Akurasi Kerawanan Longsor

Sensitivitas model yang tinggi menunjukkan bahwa model mampu mendeteksi sebagian besar kejadian longsor aktual tanpa kehilangan informasi yang signifikan. Hal ini menandakan bahwa model secara efektif menangkap sinyal lingkungan dan distribusi risiko longsor berdasarkan variabel input yang digunakan, sehingga menghasilkan peta

kerawanan yang realistis dan aplikatif untuk mendukung perencanaan mitigasi bencana (Qasimi dkk., 2024). Peta ini dapat dimanfaatkan sebagai data awal dalam perumusan pengelolaan wilayah, perencanaan pembangunan, dan penentuan prioritas alokasi sumber daya mitigasi (Huang dkk., 2024). Secara teknis, performa tinggi model juga

mencerminkan kualitas data lingkungan dan ketepatan pemilihan variabel, meskipun disarankan dilakukan validasi tambahan menggunakan metrik lain dan pengujian independen untuk memperkuat keandalan model sebelum diterapkan pada skala yang lebih luas (Kalita dkk., 2025).

4. PEMBAHASAN

Penerapan MaxEnt sesuai untuk pemetaan kerawanan longsor di Kabupaten Tulungagung karena karakteristik data dan kondisi wilayah penelitian. Data inventarisasi longsor tersedia dalam bentuk titik kejadian, sehingga selaras dengan prinsip *presence only* pada MaxEnt. Kesesuaian metode ini tercermin dari perolehan nilai AUC sebesar 0.934 yang menunjukkan tingkat akurasi sangat baik menurut kriteria Tien Bui dkk (2016). Hasil tersebut menegaskan bahwa MaxEnt mampu merepresentasikan pola spasial longsor melalui hubungan antara titik kejadian dengan kompleksitas kondisi biofisik dan tekanan antropogenik di Kabupaten Tulungagung.

Berdasarkan hasil uji Jackknife, kejadian longsor di Kabupaten Tulungagung dikontrol oleh tiga faktor utama, yaitu elevasi, litologi, dan jarak dari jalan. Elevasi merupakan faktor yang paling dominan mengontrol terjadinya longsor di Kabupaten Tulungagung. Hal ini relevan secara ilmiah karena elevasi merupakan salah satu faktor morfologi yang menentukan distribusi tegangan pada lereng serta mengontrol parameter lingkungan lain seperti curah hujan dan vegetasi yang dapat memicu terjadinya longsor (Çellek, 2020). Seiring dengan peningkatan elevasi, frekuensi kejadian longsor juga meningkat dan mencapai nilai maksimum pada elevasi 500-750 m. Di atas ketinggian tersebut, frekuensi longsor cenderung menurun. Pola serupa juga terlihat pada variabel kemiringan lereng, di mana frekuensi longsor meningkat pada lereng dengan kemiringan 15–20°. Pola ini selaras dengan temuan di beberapa wilayah lain di Pulau Jawa, seperti Pegunungan Dieng (Susena dkk., 2025), Perbukitan Menoreh (Hadmoko dkk., 2010; 2017), serta Kecamatan Banjarmangu, Kabupaten Banjarnegara (Priyono & Priyono, 2008).

Menariknya, hasil pemodelan MaxEnt menunjukkan bahwa kemiringan lereng tidak termasuk sebagai faktor dominan pengontrol kejadian longsor di Kabupaten Tulungagung. Hal ini berkaitan dengan sensitivitas spasial data DEMNAS beresolusi tinggi (~8,1 m) yang cenderung memperkirakan terlalu tinggi luasan area stabil akibat peningkatan jumlah sel piksel, sehingga berdampak pada penurunan probabilitas deteksi longsor (Pathak dkk., 2025). Selain itu, tingginya variabilitas mikro-topografi pada skala detail menyebabkan nilai kemiringan lereng menjadi fluktuatif. Kondisi ini direspons oleh algoritma MaxEnt yang bekerja dengan prinsip mencari distribusi probabilitas paling mendekati seragam (Boussouf dkk., 2023), sehingga model memberikan bobot kontribusi yang lebih

rendah pada variabel kemiringan lereng dan secara otomatis memprioritaskan variabel dengan variasi spasial yang lebih halus seperti elevasi maupun jarak dari jalan.

Selain faktor topografi, litologi menjadi faktor dominan kedua yang mempengaruhi kejadian longsor di Kabupaten Tulungagung, khususnya di wilayah utara yang didominasi oleh batuan gunungapi berupa breksi, andesit, dan tuf. Pelapukan material tuf menyebabkan perubahan komposisi mineral dengan dominasi smektit, yaitu lempung yang bersifat mudah mengembang saat jenuh air (Busthan dkk., 2015., Yaghmaeiyan dkk., 2022). Tanah dengan kandungan smektit yang tinggi akan memiliki sudut geser rendah, sehingga berpotensi menjadi bidang gelincir longsor (Kenney, 1967., Shibasaki dkk., 2017).

Di samping faktor biofisik, jarak dari jalan menjadi faktor dominan ketiga yang merepresentasikan pengaruh intervensi manusia terhadap kestabilan lereng, terutama di selatan Kabupaten Tulungagung. Pembangunan infrastruktur jalan yang memotong lereng mengakibatkan terjadinya perubahan sudut lereng serta beban yang dipikul oleh lereng di sisi jalan, sehingga berpotensi menyebabkan terjadinya longsor pada lereng tersebut (Sari dkk., 2021). Selain pada wilayah selatan, kejadian longsor di tepi jalan juga beberapa kali dijumpai pada wilayah utara Kabupaten Tulungagung. Namun, dominasi variabel ini juga dipengaruhi oleh inventarisasi BPBD yang terkonsentrasi di area dengan aksesibilitas tinggi atau berdampak langsung pada permukiman dan infrastruktur publik seperti jalan. Longsor di sekitar jalan jauh lebih mudah diamati, didokumentasikan, dan dilaporkan dibandingkan kejadian longsor di wilayah yang sulit diakses (Mirus dkk., 2020). Akibatnya, sebaran titik longsor lebih banyak tercatat di sekitar jaringan jalan, sehingga memicu *road-side bias* (Saha dkk., 2022). Akibatnya, kejadian longsor di wilayah yang jauh dari akses jalan berpotensi tidak dilaporkan. Dengan demikian, tingginya probabilitas kerawanan di sepanjang jaringan jalan tidak sepenuhnya mencerminkan pengaruh fisik pemotongan lereng, tetapi juga pola pelaporan yang dipengaruhi oleh aksesibilitas.

Kemampuan model menangkap pentingnya variabel jarak dari jalan menekankan bahwa intervensi manusia memiliki peran krusial dalam memicu kejadian longsor di Tulungagung. Seperti di banyak negara berkembang, pembangunan infrastruktur dan ekspansi pemanfaatan lahan telah menggeser tekanan antropogenik ke wilayah perbukitan yang rawan terhadap longsor, sehingga meningkatkan potensi gangguan kestabilan lereng (Turner & Schuster, 1996). Dalam konteks tersebut, pembangunan Jalur Lintas Selatan (JLS) dan dorongan swasembada pangan melalui perluasan pertanian jagung di Kabupaten Tulungagung mencerminkan dua bentuk utama tekanan

antropogenik. Kedua aktivitas ini tidak hanya mengubah geometri dan tutupan lahan, tetapi juga berinteraksi dengan faktor biofisik seperti kemiringan lereng dan curah hujan tinggi khususnya yang mendominasi wilayah selatan Tulungagung. Modifikasi lereng oleh manusia membuat bentang alam menjadi jauh lebih sensitif terhadap pemicu eksternal, sehingga meningkatkan kerawanan longsor dengan cara mengganggu stabilitas alami tanah dan mengubah sistem hidrologi lereng (Heo dkk., 2025).

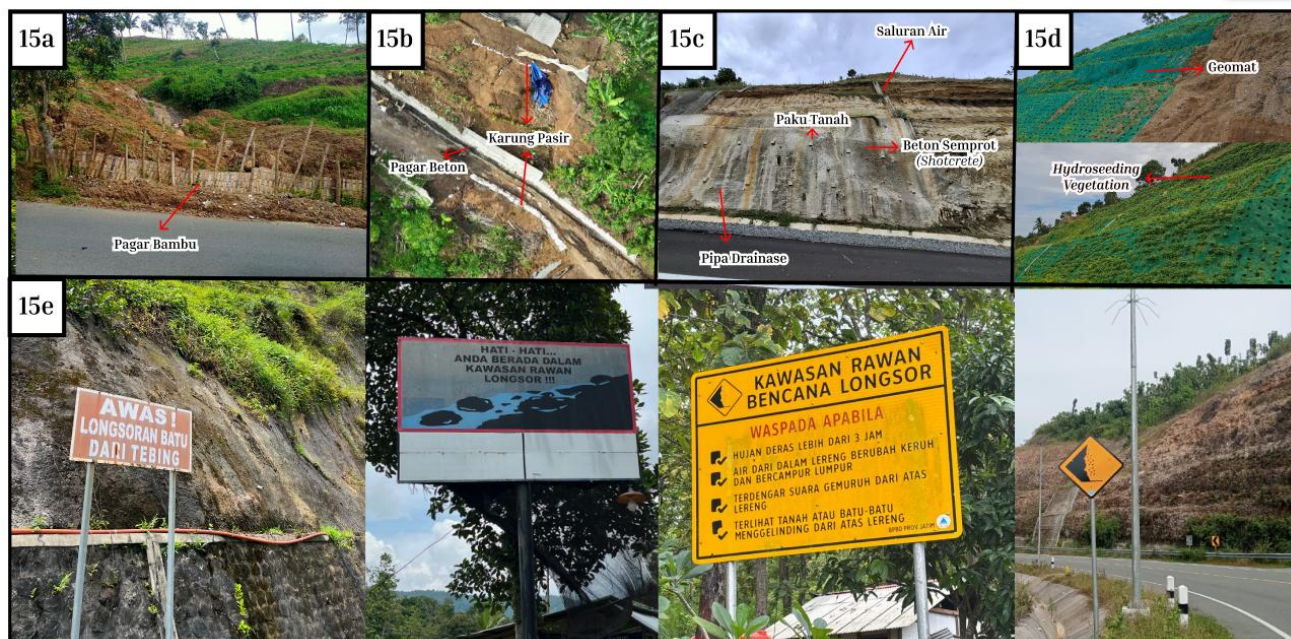
Pembangunan JLS merupakan intervensi infrastruktur berskala besar yang secara langsung memodifikasi kondisi lereng melalui pemotongan dan pembentukan lereng buatan. Meskipun dirancang untuk meningkatkan konektivitas dan daya saing wilayah (Hamid, 2014), pembangunan ini juga memunculkan implikasi fisik yang signifikan terhadap kestabilan lereng, sehingga membutuhkan perhatian khusus dalam perencanaan tata ruang berbasis mitigasi bencana. Pembangunan jalan di lereng berbukit seringkali memerlukan ekskavasi untuk membentuk badan jalan yang dapat menghilangkan penyangga alami pada kaki lereng, sehingga memicu konsentrasi stress pada massa tanah di atasnya dan menciptakan kondisi ketidakstabilan permanen yang meningkatkan probabilitas kegagalan lereng (Sharma dkk., 2025; Liu dkk., 2024). Selain itu, pemotongan lereng juga dapat mengganggu sistem hidrologi dengan mengubah pola limpasan dan sirkulasi air tanah, sehingga meningkatkan infiltrasi dan tekanan air pori secara cepat (Zhu dkk., 2025; Sarkar & Saha, 2026).

Selain pembangunan infrastruktur, ekspansi pertanian jagung sebagai bagian dari upaya peningkatan produksi pangan juga berkontribusi terhadap perubahan kondisi lereng di Tulungagung. Hasil wawancara dengan BPBD Kabupaten Tulungagung yang divalidasi dengan temuan di lapangan menunjukkan adanya peningkatan konversi tutupan lahan pada lereng-lereng di wilayah selatan menjadi pertanian jagung dalam beberapa tahun terakhir. Konservasi vegetasi alami menjadi monokultur jagung dapat mengurangi kontribusi sistem perakaran dalam serta memodifikasi sifat geoteknis dan hidrologis tanah yang secara signifikan dapat meningkatkan kerawanan longsor (Sarkar &

Saha, 2026). Dalam prosesnya, perataan tanah untuk lahan konservasi dapat merusak struktur tanah alami dan mengalihkan sistem drainase permukaan sehingga aliran air terkonsentrasi pada jalur tertentu dan dapat memperbesar peluang terjadinya erosi hingga longsor dangkal.

Interaksi antara kondisi biofisik dan intervensi manusia telah menempatkan Pegunungan Wilis dan Perbukitan Selatan sebagai zona dengan tingkat kerawanan longsor tinggi hingga sangat tinggi. Dampak nyata dari interaksi ini tercermin dari berbagai kejadian longsor yang telah merusak bangunan sekolah dan infrastruktur jalan. Mengingat tingginya risiko tersebut, implementasi mitigasi bahaya longsor menjadi kebutuhan prioritas untuk mengurangi potensi kehilangan jiwa dan kerugian properti (Al-Najjar dkk., 2021). Mitigasi longsor terbagi menjadi pendekatan struktural dan nonstruktural dengan fokus intervensi yang berbeda. Mitigasi struktural menitikberatkan pada penguatan fisik bangunan dan infrastruktur melalui desain rekayasa dan konstruksi penahan longsor (Lacasse & Nadim, 2009). Sedangkan, mitigasi nonstruktural berfokus pada peningkatan kapasitas, teknologi, dan kelembagaan untuk mengurangi risiko (Naryanto & Zahro, 2020).

Penerapan mitigasi struktural di Kabupaten Tulungagung mencakup pemasangan pagar bambu, susunan karung pasir, pagar beton, dinding penahan berdrainase, serta geomat dengan *hydroseeding vegetation* (Gambar 15). Masyarakat menggunakan pagar bambu dan susunan karung pasir pada lereng tidak stabil untuk menahan pergerakan material longsor. Bambu dipilih karena tersedia luas, mudah diperoleh, berbiaya rendah, dan ramah lingkungan, serta memiliki kapasitas mekanik yang memadai untuk menahan beban dan tekanan tanah (Tardio dkk., 2018). Karung berisi tanah atau pasir disusun sebagai tanggul penahan sementara pada lahan miring karena metode ini mudah dipasang dan membutuhkan biaya rendah, sehingga efektif untuk pengendalian awal material longsor. Selain itu, pemerintah daerah juga membangun pagar beton pasca kejadian longsor dengan struktur masif untuk meningkatkan kapasitas penahanan tanah dan mengurangi risiko pergerakan ulang (Gambar 15a dan 15b).



Gambar 15. a) Mitigasi Struktural Menggunakan Pagar Bambu, b) Mitigasi Struktural dengan Tanggul Karung Pasir dan Pagar Beton, c) Mitigasi Struktural Menggunakan Dinding Penahan dengan Pipa Drainase, d) Mitigasi Struktural dengan Geomat dan *Hydroseeding Vegetation*, e) Mitigasi Nonstruktural dengan Rambu Peringatan Rawan Longsor

Mitigasi berbasis rekayasa permanen di JLS mengandalkan dinding penahan yang dilengkapi pipa drainase (Gambar 15c) serta sistem geomat dengan *hydroseeding vegetation* (Gambar 15d) untuk meningkatkan stabilitas lereng. Dinding berdrainase mengalirkan air permukaan dan bawah permukaan sehingga menurunkan limpasan dan tekanan air pori, yang secara langsung menekan kejenuhan tanah sebagai penyebab utama ketidakstabilan lereng. Sistem ini meningkatkan faktor keamanan lereng apabila dirancang dengan tepat, namun efektivitasnya bergantung pada pemeliharaan rutin, khususnya pada jaringan drainase bawah tanah (Chen, 2001). Selanjutnya, geomat sebagai material geosintetik berstruktur tiga dimensi berpori menstabilkan permukaan lereng pada tahap awal dengan menahan partikel tanah, meredam energi tetesan hujan, dan menjaga kelembapan untuk mempercepat perkecambahan tanaman (Olinic dkk., 2024). Integrasi dengan *hydroseeding* menghasilkan tutupan vegetasi berakar kuat yang meningkatkan kohesi tanah, menurunkan tekanan air pori, serta mengurangi limpasan dan erosi (Cao dkk., 2023). Setelah sistem perakaran berkembang, vegetasi menjadi elemen penguat utama, sementara geomat tetap berfungsi sebagai pengikat permukaan. Kombinasi metode ini menunjukkan efektivitas tinggi, efisiensi biaya, dan ketahanan jangka panjang dalam pengendalian erosi dan stabilisasi lereng (Kim dkk., 2019).

Mitigasi nonstruktural di Kabupaten Tulungagung dilakukan melalui pemasangan rambu dan papan informasi rawan longsor pada lokasi rawan (Gambar 15e). Pemerintah melalui BPBD Jawa Timur dan BPBD Tulungagung menempatkan rambu peringatan

di segmen jalan dan lereng rawan untuk meningkatkan kesadaran serta kesiapsiagaan masyarakat. Media informasi ini membantu pengguna ruang mengenali potensi bahaya dan menyesuaikan perilaku saat melintas. Pendekatan ini memperkuat fungsi peringatan dini berbasis informasi lapangan dan mendukung pengurangan risiko pada tingkat pengguna.

Hasil pemetaan kerawanan longsor juga dapat dijadikan salah satu referensi dalam merencanakan mitigasi. Akan tetapi, meskipun peta yang dihasilkan menunjukkan akurasi sangat baik tentu tidak terlepas dari ketidakpastian inheren yang bersumber dari isu multi-skala akibat integrasi data dengan resolusi yang heterogen. Variabel elevasi, kemiringan lereng, *aspect*, *plan curvature*, *profile curvature*, SPI, dan TWI diekstraksi dari DEMNAS dengan resolusi spasial ~8,1 meter yang mampu mendeteksi fitur morfologi secara detail. Di sisi lain, variabel litologi yang bersumber dari peta Badan Geologi dan variabel penggunaan lahan dari Bappeda keduanya memiliki skala 1:50.000. Disparitas ini memicu ketidakpastian batas akibat integrasi presisi tinggi dari data DEMNAS dipadukan dengan generalisasi spasial yang lebih kasar pada unit geologi. Akibatnya, pada zona transisi batuan, model berpotensi mengalami bias klasifikasi karena fitur topografi spesifik mungkin tidak sepenuhnya selaras dengan poligon litologi yang digeneralisasi pada skala 1:50.000.

Data jaringan jalan dan sungai yang bersumber dari Badan Informasi Geospasial (BIG) skala 1:25.000 memiliki resolusi yang lebih detail dibandingkan peta geologi. Keunggulan detail geometris pada data vektor jalan ini mendasari tingginya sensitivitas respons spasial dalam model. Dominasi variabel ini juga

didorong oleh karakteristik MaxEnt yang sangat sensitif terhadap pola pengelompokan data. Konsentrasi titik longsor di pinggir jalan diterjemahkan oleh model sebagai indikator kerawanan yang kuat, sehingga berpotensi menghasilkan bias prediksi yang berlebihan pada area sekitar jalan (Merghadi dkk., 2020; Phillips dkk., 2006). Selain itu, batasan lain muncul dari aspek resolusi temporal pada data penggunaan lahan tahun 2024 skala 1:50.000 yang bersifat statis. Penggunaan data spasial tunggal tahun 2024 untuk menganalisis inventarisasi kejadian longsor periode 2018 hingga 2025 memunculkan potensi inkonsistensi temporal, sebab kondisi tutupan lahan aktual saat kejadian longsor di masa lalu mungkin berbeda dengan kondisi yang terekam pada peta terkini. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data penggunaan lahan historis atau multitemporal untuk merepresentasikan perubahan kondisi tutupan lahan pada periode kejadian secara lebih akurat.

Identifikasi limitasi teknis tersebut tidak mengurangi urgensi fungsional peta kerawanan yang dihasilkan, namun justru mempertegas penerapannya sebagai referensi spasial makro. Informasi zonasi ini memberikan landasan saintifik bagi otoritas daerah dalam merumuskan strategi mitigasi berbasis bukti (*evidence-based mitigation*). Meskipun demikian, peta ini harus dimaknai sebagai alat bantu diagnostik awal yang bersifat indikatif. Penggunaannya untuk perencanaan teknis yang lebih spesifik mutlak memerlukan validasi lapangan lanjutan guna menghindari simplifikasi kerawanan yang mungkin timbul dari generalisasi model skala regional.

5. KESIMPULAN

Model MaxEnt yang digunakan dalam penelitian terbukti andal dalam penyusunan peta kerawanan longsor Kabupaten Tulungagung dengan nilai AUC mencapai 0,934. Hal ini menunjukkan kesesuaian MaxEnt dalam merepresentasikan hubungan pola spasial longsor antara data titik kejadian longsor (*presence-only*) dengan kompleksitas kondisi biofisik dan antropogenik di Kabupaten Tulungagung. Zona-zona kerawanan yang dihasilkan juga beririsan dengan wilayah yang telah mendapatkan respon mitigasi, baik oleh masyarakat maupun pemerintah setempat melalui upaya struktural dan non-struktural. Hal ini mengindikasikan adanya keselarasan antara kesiapsiagaan masyarakat dan pemerintah dalam merespons potensi bencana di wilayahnya.

Integrasi hasil pemodelan dengan validasi lapangan memperkuat pemahaman terhadap faktor-faktor pengontrol utama longsor, khususnya elevasi, litologi, dan jarak terhadap jaringan jalan. Karakteristik longsor yang berkembang di wilayah kajian didominasi oleh tipe *creep*, *earth slide*, dan *debris slide*, yang mencerminkan adanya keterkaitan antara kondisi alam dengan tekanan aktivitas manusia. Pemotongan lereng pada pembangunan Jalur Lintas Selatan (JLS) serta alih fungsi lahan menjadi pertanian jagung dan rumput gajah

teridentifikasi sebagai faktor antropogenik yang berkontribusi terhadap penurunan kestabilan lereng. Validasi lapangan juga menunjukkan bahwa area dengan kerawanan tinggi telah direspon melalui berbagai bentuk mitigasi, mulai dari upaya mitigasi struktural berupa aplikasi media sederhana berbasis masyarakat hingga rekayasa teknik pada infrastruktur strategis dan mitigasi non-struktural berupa rambu peringatan rawan longsor pada beberapa lokasi.

Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada kemajuan pemetaan kerawanan longsor, khususnya dalam membuktikan keandalan Model MaxEnt sebagai solusi yang tangguh pada wilayah kompleks dengan keterbatasan data inventarisasi. Melalui penyajian analisis performa statistik, validasi variabel lingkungan, hingga evaluasi mitigasi, penelitian ini memberikan perspektif baru bagi peneliti agar tidak hanya berfokus pada hasil peta kerawanan. Oleh karena itu, peta kerawanan yang dihasilkan dapat direkomendasikan untuk menjadi instrumen penampisan awal dalam perumusan kebijakan tata ruang dan strategi mitigasi yang adaptif terhadap karakteristik wilayah serta dinamika sosial masyarakat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Bapak Dr. Danang Sri Hadmoko, S.Si., M.Sc. selaku dosen pembimbing, atas bimbingan, arahan, serta waktu yang telah diberikan dalam mendampingi penyusunan penelitian ini hingga dapat diselesaikan dengan baik. Penulis juga menyampaikan apresiasi kepada Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Tulungagung atas dukungan berupa data, informasi, serta masukan yang sangat membantu dalam persiapan kegiatan lapangan. Selain itu, penulis turut mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah berkontribusi dan tidak dapat disebutkan satu per satu dalam pelaksanaan kegiatan Kuliah Kerja Lapangan (KKL) III Program Studi Geografi Lingkungan tahun 2026.

DAFTAR PUSTAKA

- Ado, M., Amitab, K., Maji, A. K., Jasińska, E., Gono, R., Leonowicz, Z., & Jasiński, M. (2022). Landslide susceptibility mapping using machine learning: A literature survey. *Remote Sensing*, 14(13), 3029. <https://doi.org/10.3390/rs14133029>
- Ali, A., Teku, D., Sisay, T., & Mihret, B. (2025). A combined analysis of frequency ratio and analytical hierarchy process for landslide susceptibility assessment in Tenta, South Wollo, Ethiopia. *Scientific Reports*, 15(1), 17899. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94611-z>
- Al-Najjar, H. A.H., Pradhan, B., Kalantar, B., Sameen, M. I., Santosh, M., & Alamri, A. (2021). Landslide Susceptibility Modeling: An Integrated Novel Method Based on Machine Learning Feature Transformation. *Remote Sensing*, 13(16), 3281. <https://doi.org/10.3390/rs13163281>
- Alvioli, M., Loche, M., Jacobs, L., Grohmann, C. H., Abraham, M. T., Gupta, K., Satyam, N., Scaringi, G., Bornaetxea, T., Rossi, M., Marchesini, I., Lombardo, L., Moreno, M., Steger, S., Camera, C. A. S., Bajni, G., Samodra, G.,

- Anindya, A., Putro, A. W., Utari, L. N. T., Kumara, L. C., Rifah, F. F., Agasta, V., Risanti, N. N., Pradana, F. S., Astrian, L. A., dan Sahri, R. (2026). Pemetaan Kerawanan Longsor Berbasis *Maximum Entropy* di Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1187-1208. doi:10.14710/jil.24.5.1187-1208
- Wahyudi, E. E., Susyanto, N., ... Rivera-Rivera, J. (2024). A benchmark dataset and workflow for landslide susceptibility zonation. *Earth-Science Reviews*, 258, 104927. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104927>
- Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43-69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Boussouf, S., Fernández, T., & Hart, B. A. (2023). Landslide susceptibility mapping using maximum entropy (MaxEnt) and geographically weighted logistic regression (GWLR) models in the Río Aguas catchment (Almería, SE Spain). *Natural Hazards*, 117, 207-235. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05857-7>
- Cao, T., Zhang, H., Chen, T., Yang, C., Wang, J., Guo, Z., & Sun, X. (2023). Research on the mechanism of plant root protection for soil slope stability. *PloS ONE*, 18(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0293661>
- Carson, M. A., & Kirkby, M. J. (1972). *Hillslope Form and Process*. Cambridge University Press.
- Çellek, S. (2020). Morphological Parameters Causing Landslides: A Case Study of Elevation. *Bulletin of the Mineral Research and Exploration*, 162:197224. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.649758>
- Chauhan, V., Gupta, L., & Dixit, J. (2025). Landslide susceptibility assessment for Uttarakhand, a Himalayan state of India, using multi-criteria decision making, bivariate, and machine learning models. *Geoenviron Disasters*, 12(2). <https://doi.org/10.1186/s40677-024-00307-3>
- Chen, C. S. (2001). Stabilization of a Failed Slope With Reinforced Soil Wall. In *Geotechnical Engineering - Meeting Society Needs - Volume 2*. Balkema.
- Chen, J., Yang, S. T., Li, H. W., Zhang, B., & Lv, J. R. (2013). Research on Geographical Environment Unit Division Based on the Method of Natural Breaks (Jenks). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4/W3,47-50. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-4-W3-47-2013>
- Corominas, J., Westen, C. v., Frattini, P., Cascini, L., Malet, J. P., Fotopoulou, S., Catani, F., Eeckhaut, M. V. D., Mavrouli, O., Agliardi, F., Pitilakis, K., Winter, M. G., Pastor, M., Ferlisi, S., Tofani, V., Hervas, J., & Smith, J. T. (2014). Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(2), 209-263. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0538-8>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). Landslide Types and Processes. In *Landslides Investigation and Mitigation* (pp. 36-71). National Academy Press.
- Elia, L., Castellarò, S., Dahal, A., Lombardo, L., 2023. Assessing multi-hazard susceptibility to cryospheric hazards: lesson learnt from an Alaskan example. *Sci. Total Environ.* 898, 165289 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165289>
- Elith, J. & Leathwick, J.R. (2009). Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics*, 40, 677-697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.1>
- 20159
- Ercanoglu, M., & Gokceoglu, C. (2002). Assessment of Landslide Susceptibility for a Landslide-prone area (North of Yenice, NW Turkey) by Fuzzy Approach. *Environmental Geology*, 41, 720-730. DOI:10.1007/s00254-001-0454-2
- Fidan, S., Tanyaş, H., Lombardo, L., Petley, D. N., & Görüm, T. (2024). Understanding fatal landslides at global scales: a summary of topographic, climatic, and anthropogenic perspectives. *Natural Hazards*, 120(7), 6437-6455. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06487-3>
- Fitria, L. M. (2016). Mitigasi Bencana Longsor Di Lereng Gunung Wilis Kabupaten Nganjuk. *Prosiding Seminar Nasional ReTHI*, 161-166.
- Ghosh, T., Bhowmik, S., Jaiswal, P., Ghosh, S., & Kumar, D. (2020). Generating Substantially Complete Landslide Inventory using Multiple Data Sources: A Case Study in Northwest Himalayas, India. *Journal of the Geological Society of India*, 95(1), 45-58. <https://doi.org/10.1007/s12594-020-1385-4>
- Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santagelo, M., & Chang, K.-T. (2012). Landslide Inventory Maps: New Tools for an Old Problem. *Earth-Science Review*, 112(1-2), 42-66. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>
- Hadmoko, D. S., Lavigne, F., & Samodra, G. (2017). Application of a semiquantitative and GIS-based statistical model to landslide susceptibility zonation in Kayangan Catchment, Java, Indonesia. *Natural Hazards*, 87, 437-468. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2772-z>
- Hadmoko, D. S., Lavigne, F., Sartohadi, J., Hadi, P., & Winaryo. (2010). Landslide hazard and risk assessment and their application in risk management and landuse planning in eastern flank of Menoreh Mountains, Yogyakarta Province, Indonesia. *Natural Hazards*, 54, 623-642. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9490-0>
- Hamid, A. (2014). Potensi Investasi Jalur Lintas Selatan di Provinsi Jawa Timur. *Jurnal Bina Praja*, 6(3), 197-204. <https://doi.org/10.21787/jbp.06.2014.197-203>
- Heimsath, A. M., & Jungers, M. C. (2013). Processes, Transport, Deposition, and Landforms: Quantifying Creep. In *Treatise on Geomorphology* (Vol. 7, pp. 138-151). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00158-5>
- Heo, S., Park, S., & Lee, D. K. (2025). Evaluating thresholds: the impact of terrain modifications on landslide susceptibility in a mountainous city. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 16(1), 2493211. <https://doi.org/10.1080/19475705.2025.2493211>
- Hidayat, R., Sutanto, S. J., & Munir, M. D. (2016). Kondisi Geologi dan Pola Hujan sebagai Pemicu Longsor di Jawa Tengah Bagian Selatan pada Juni 2016. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 7(2), 147-162.
- Höhn, P., Heidler, K., Behling, R., & Zhu, X. X. (2025). A Spatio-Temporal Dataset for Satellite-Based Landslide Detection. *Scientific Data*, 12(1), 1772. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-06167-2>
- Huang, F., Zhu, D., Zhang, Y., Zhang, J., Wang, N., & Dong, Z. (2024). Urban Flooding Disaster Risk Assessment Utilizing the MaxEnt Model and Game Theory: A Case Study of Changchun, China. *Sustainability*,

- 16(19), 8696.
<https://doi.org/10.3390/su16198696>
- Huang, J., Wu, X., Ling, S., Li, X., Wu, Y., Peng, L., & He, Z. (2022). A bibliometric and content analysis of research trends on GIS-based landslide susceptibility from 2001 to 2020. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 86954–86993. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23732-z>
- Ilinca, V., Sandric, I., & Gheuca, I. (2025). Landslide Susceptibility Analysis Using Machine Learning: Insights from the Bend Subcarpathians-Carpathians, Romania. *Geomorphology*, 486: 1-18 <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109872>
- Kalita, N., Bora, A. K., Sarmah, R., Sahariah, D., & Nath, M. J. (2025). Comparative Flood Hazard Assessment in Assam's Belsiri River Basin Using AHP and MaxEnt Models. *Revue Internationale de Geomatique*, 34(1), 37-51. <https://doi.org/10.32604/rig.2024.058265>
- Kenney, T. C. (1967), The Influence of Mineral Composition on the Residual Strength of Natural Soils, in *Proceedings of the Geotechnical Conference on Shear Strength Properties of Natural Soils and Rocks*, vol. 1, pp. 123–129, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo, Norway.
- Khan, Y. A., & Lateh, H. (2011). Failure Mechanism of a Shallow Landslide at Tun-Sardon Road Cut Section of Penang Island, Malaysia. *Geotech Geol Eng*, 29, 1063-1072. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9437-6>
- Kim, Y. J., Kotwal, A. R., Cho, B. Y., Wilde, J., & You, B. H. (2019). Geosynthetic Reinforced Steep Slopes: Current Technology in the United States. *Appl. Sci*,9(10). <https://doi.org/10.3390/app9102008>
- Kornejady, A., Ownegh, M., Bahremand, A. (2017). Landslide susceptibility assessment using maximum entropy model with two different data sampling methods. *CATENA*,152:144–162. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.01.010>
- Lacasse, S., & Nadim, F. (2009). Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy. In *Landslides: Disaster Risk Reduction* (pp. 31-61). Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, D. H., Kim, Y. T., & Lee, S. R. (2020). Shallow Landslide Susceptibility Models Based on Artificial Neural Networks Considering the Factor Selection Method and Various Non-Linear Activation Functions. *Remote Sensing*, 12(7), 1194. <https://doi.org/10.3390/rs12071194>
- Lestari, M. D., Solikah, U., & Sajali, C. U. (2024). Analisis Minat Generasi Muda Dalam Berwirausaha Bidang Pertanian Jagung di Desa Jajar Kecamatan Gandusari Kabupaten Tulungagung. *Jurnal AGRIBIS*, 10(2),39-49 <https://doi.org/10.36563/agribis.v10i2.1228>
- Liu, X., Shao, S., & Shao, S. (2024). Landslide susceptibility zonation using the analytical hierarchy process (AHP) in the Great Xi'an Region, China. *Scientific Reports*,14(2941). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53630-y>
- Lorente, P. (2019). A spatial analytical approach for evaluating flood risk and property damages: Methodological improvements to modelling. *Journal of Flood Risk Management*, 12(4). <https://doi.org/10.1111/jfr.12483>
- Manan, W. A. A., Rashid, A. S. A., Abdul Rahman, M. Z. A., & Khanan, M. F. A. (2022). Assessment on recent landslide susceptibility mapping methods: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 971(1), 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/971/1/012032>
- Manvaati, A. K., Farizal, B., Sriwahyuni, W., & Tugiman. (2025). Analisis Stabilitas Lereng Pasca Lingsor di Jalan Lintas Curup-Lebong Desa Talang Ratu Kecamatan Rimbo Pengadang Kabupaten Lebong. *STATIKA: Jurnal Teknik Sipil*, 11(2), 25-31. <https://doi.org/10.53494/jts.v11i2.1210>
- Mejia-Manrique, S. A., Ramos-Scharrón, C. E., Hughes, K. S., Gonzalez-Cruz, J. E., & Khanbilvardi, R. M. (2025). Dynamic landslide susceptibility for extreme rainfall events using an optimized convolutional neural network approach. *Natural Hazards*, 121, 15383-15411. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07396-9>
- Melati, D. N., Umbara, R. P., Astisiasari, Wisyanto, Trisnafiah, S., Trinugroho, Prawiradisastra, F., Arifianti, Y., Ramdhani, T. I., Arifin, S., & Anggreainy, M. S. (2024). A comparative evaluation of landslide susceptibility mapping using machine learning-based methods in Bogor area of Indonesia. *Environmental Earth Sciences*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3534644/v1>
- Margarint, M., Grozavu, A., Patriche, C., 2013. Assessing the spatial variability of coefficients of landslide predictors in different regions of Romania using logistic regression. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 13, 3339–3355. <https://doi.org/10.5194/>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., Whiteley, J., ThaiPham, B., Tien Bui, D., Avtar, R., & Abderrahmane, B. (2020). Machine learning methods for landslide susceptibility studies: A comparative overview of algorithm performance. *Earth-Science Reviews*, 207,103225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>
- Miao, Z., Xiong, Y., Cheng, Z., Wu, B., Wang, W., & Peng, Z. (2025). Quantifying Root Cohesion Spatial Heterogeneity Using Remote Sensing for Improved Landslide Susceptibility Modeling: A Case Study of Caijiachuan Landslides. *Sensors*, 25(13), 4221. <https://doi.org/10.3390/s25134221>
- Mi'roji, F., Bintardjo, B., & Santoso, J. (2023). Menciptakan Sarana Pelayanan Publik dengan Konsep Neo Vernakular di IAIN Tulungagung. *Jurnal Arsitektur Kolaborasi*, 3(2), 82-94. <https://doi.org/10.54325/kolaborasi.v3i2.45>
- Mirus, B.B., Jones, E.S., Baum, R.L. et al. Landslides across the USA: occurrence, susceptibility, and data limitations. *Landslides* 17, 2271–2285 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01424-4>
- Mulyani, K. D., Manurung, J. M., Rini, U. R. S., Manek, E. G., & Suparno, F. A. D. (2025). Inventarisasi longsoran dan hubungan dengan kondisi geologi (studi kasus: Kabupaten Trenggalek Jawa Timur). *Jurnal Himasapta*, 10(2), 59-64.
- Naryanto, H. S., & Zahro, Q. (2020). Penilaian Risiko Bencana Longsor di Wilayah Kabupaten Serang. *Majalah Geografi Indonesia*, 34(1), 1-10. <https://doi.org/10.22146/mgi.38674>
- Norallahi, M., & Kaboli, H. S. (2021). Urban flood hazard mapping using machine learning models: GARP, RF, MaxEnt and NB. *Natural Hazards*, 106(1), 119-137. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04453-3>
- Olinic, T., Olinic, E.-D., & Butcaru, A.-C. (2024). Integrating Geosynthetics and Vegetation for Sustainable Erosion Control Applications. *Sustainability*, 16, 10621. <https://doi.org/10.3390/su162310621>
- Pabowo, R. G. M., & Eldon, M. (2018). Kajian Pengetahuan

- Anindya, A., Putro, A. W., Utari, L. N. T., Kumara, L. C., Rifah, F. F., Agasta, V., Risanti, N. N., Pradana, F. S., Astrian, L. A., dan Sahri, R. (2026). Pemetaan Kerawanan Longsor Berbasis *Maximum Entropy* di Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(5), 1187-1208. doi:10.14710/jil.24.5.1187-1208
- dalam Manajemen Bencana di Kabupaten Tulungagung. *BENEFIT*, 5(1), 60-77.
- Park, N.W., (2015). Using maximum entropy modeling for landslide susceptibility mapping with multiple geoenvironmental data sets. *Environ. Earth Sci.*, 73: 937-949. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3442-z>
- Persichillo, M. G., Bordoni, M., Meisina, C., Bartelletti, C., Barsanti, M., Giannecchini, R., Avanzi, G. D., Galanti, Y., Cevasco, A., Brandolini, P., & Galve, J. P. (2017). Shallow landslides susceptibility assessment in different environments. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 748-771. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1265011>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190, 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel>
- Priyono, K. D., & Priyono, P. (2008). Morphometric and morphostructural analysis of landslide-prone slopes in Banjarnegara District. Banjarnegara Regency. *Forum Geografi*, 22(1), 72-84.
- Qasimi, A. B., Isazade, V., & Berndtsson, R. (2024). Flood susceptibility prediction using MaxEnt and frequency ratio modeling for Kokcha River in Afghanistan. *Natural Hazards*, 120(2), 1367-1394. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06232-2>
- Rahardjo, W., Rumidi, S., & Rosidi, H. M. (1995). Peta Geologi Lembar Yogyakarta, Jawa. *Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi*, Bandung.
- Rakuasa, H., & Pertuack, S. (2025). Flood and Landslide Hazard Mapping in Teluk Ambon Baguala District, Ambon City, Indonesia. *Journal of Scientific Insights*, 2(5), 595-607. <https://doi.org/10.69930/jsi.v2i5.581>
- Reichenbach, P., Rossi, M., Malamud, B. D., Mihir, M., & Guzzetti, F. (2018). A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-science reviews*, 180, 60-91.
- Remondo, J., Díaz, M. S., & Cuesta-Albertos, J. A. (2025). An Increasing Trend of Landslides as a Consequence of the Global Change. *Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00685-0>
- Różycka, M., Migoń, P., & Michniewicz, A. (2016). Topographic Wetness Index and Terrain Ruggedness Index in geomorphic characterisation of landslide terrains, on examples from the Sudetes, SW Poland. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 61(2), 61-80. DOI: 10.1127/zfg_suppl/2016/0328
- Saha, S., Majumdar, P., & Bera, B. (2023). Deep learning and benchmark machine learning based landslide susceptibility investigation, Garhwal Himalaya (India). *Quaternary Science Advances*, 10, 100075. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100075>
- Samodra, G. (2024). Alur kerja pembelajaran mesin pada pemodelan spasial kerawanan longsor. *Majalah Geografi Indonesia*, 38(2), 169-180. <https://doi.org/10.22146/mgi.95857>
- Samodra, G., Malawani, M. N., Suhendro, I., & Mardiatno, D. (2024). Spatial datasets for benchmarking machine learning-based landslide susceptibility models. *Data in Brief*, 57, 111155. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2024.111155>
- Sari, M., Toyfur, M. F., & Hadinata, F. (2021). Indeks dan Tingkat Risiko Bahaya Longsor pada Ruas Jalan Nasional di Kabupaten Kerinci dan Kota Sungai Penuh, Provinsi Jambi. *Cantilever: Jurnal penelitian dan Kajian Bidang Teknik Sipil*, 10 (01), 53- 61. <https://doi.org/10.35139/cantilever.v10i1.97>
- Sarkar, S., & Saha, K. (2026). Evaluating the influence of anthropogenic hillslope modulation in relation to shallow landslides in the Rishikhola region, Darjeeling-Sikkim Himalaya, India. *Scientific Reports*, 16(413). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-30543-y>
- Sharma, K. K., Bhandary, N. P., Subedi, M., & Rajan, K. C. (2025). Integration of Landslide Susceptibility and Road Infrastructure Vulnerability for Risk Assessment and Mountain Road Resilience Enhancement. *Indian Geotechnical Journal*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s40098-025-01222-6>
- Sharpe, C. F. S. (1938). *Landslides and related phenomena : a study of mass-movements of soil and rock* (New York ed.). Columbia University Press.
- Shibasaki, T., Matsuura, S., & Hasegawa, Y. 2017. Temperature-Dependent Residual Shear Strength Characteristics of Smectite-Bearing Landslide Soils. *Journal of geophysical Research: Solid Earth*, 122: 1449-1469. <https://doi.org/10.1002/2016JB013241>
- Suhermat, M., Sugianti, K., Yunarto, Kumoro, Y., Nur, W. H., Sukristiyanti, & Lestiana, H. (2024). Effectiveness of Landslide Susceptibility Mapping Using the Maximum Entropy Model and Weights of Evidence Modelling in the Kuningan Regency, West Java, Indonesia. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, 39(3), 27-42. <https://doi.org/10.17794/rgn.2024.3.3>
- Susanto, D., Tafrichan, M., Wardatutthoyyibah, Jati, A. S., Subrata, S. A., Marhaento, H., & Imron, M. A. (2019). *Pemodelan Distribusi Spesies Menggunakan QGIS, R, dan MaxEnt*. Wildlife Conservation Centre.
- Susena, Y., Hadmoko, D. S., & Wibowo, S. B. (2025). Machine learning techniques on spatio-temporal data for landslide susceptibility assessment at Dieng Mountainous Region, Banjarnegara district, Central Java, Indonesia. *Natural Hazards*, 121(8), 9925-9962. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07136-z>
- Tardio, G., Mickovski, S. B., Rauch, H. P., Fernandes, J. P., & Archaya, M. S. (2018). The Use of Bamboo for Erosion Control and Slope Stabilization: Soil Bioengineering Works. In *Bamboo: Current and Future Prospects* (pp. 105-132). IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.75626>
- Tekin, S., Román, A. Q., & Çan, T. (2023). Landslide susceptibility assessment of the Asi watershed, southern Türkiye. *Turkish Journal of Earth Sciences* 33 (2): 208-223. <https://doi.org/10.55730/1300-0985.1907>
- Tien Bui, D., Tuan, T. A., Klempe, H., Pradhan, B., & Revhaug, I. (2016). Spatial prediction models for shallow landslide hazards: a comparative assessment of the efficacy of support vector machines, artificial neural networks, kernel logistic regression, and logistic model tree. *Landslides*, 13, 361-378. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0557-6>
- Turner, A. K., & Schuster, R. L. (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation* (A. K. Turner & R. L. Schuster, Eds.). National Academy Press.
- Umbara, R. P., Melati, D. N., Astisiasari, Wisyanto, Trisnafiah, S., Trinugroho, Arifianto, Y., Prawiradisastra, F., Ramdhani, T. I., Arifin, S., & Anggreainy, M. S. (2024). Utilization of frequency

- ratio and logistic regression model for landslide susceptibility mapping in Bogor area. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 14(2). <https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.2.19062>
- Vijith, H., & Dodge-Wan, D. (2019). Modelling terrain erosion susceptibility of logged and regenerated forested region in northern Borneo through the Analytical Hierarchy Process (AHP) and GIS techniques. *Geoenvironmental Disasters*, 6(1). <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0124-x>
- Xingfu, Z., & Erdi, A.B.I. (2025). Research on Rainfall-Induced Landslide Susceptibility Prediction Considering Spatial Heterogeneity. *Earthquake Research Advances*, 10000. <https://doi.org/10.1016/j.eqrea.2025.100400>
- Yaghmaeiyan, N., Mirzaei, M., & Delghavi, R. (2022). Montmorillonite clay: Introduction and evaluation of its applications in different organic syntheses as catalyst: A review. *Results in Chemistry*, 4, 100549. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2022.100549>
- Yohanes, D. (2025, Januari 21). Hasil Pertemuan Pemkab Tulungagung dan Lintas Instansi Soal Hutan Kawasan Selatan Jadi Ladang Jagung. *Tribun Jatim*. <https://jatim.tribunnews.com/2025/01/21/hasil-pertemuan-pemkab-tulungagung-dan-lintas-instansi-soal-hutan-kawasan-selatan-jadi-ladang-jagung>
- Zhang, K., Wu, X., Niu, R., Yang, K., & Zhao, L. (2017). The assessment of landslide susceptibility mapping using random forest and decision tree methods in the Three Gorges Reservoir area, China. *Environmental Earth Sciences*, 76(11), 405. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6731-5>
- Zhu, Y., Yin, K., Yang, H., Zhou, C., Wang, Z., & Liao, Y. (2025). Temporal validity of landslide inventories in hazard mapping: insights from Hubei Prov-ince, China. *Landslides*, 1-6. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02651-3>