

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Menurut Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), Indonesia mengalami lebih dari 10.000 kejadian gempa bumi sepanjang tahun 2023, dengan sekitar 219 di antaranya memiliki magnitudo di atas 5,0 Skala Richter. Sementara itu, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melaporkan bahwa selama dua dekade terakhir, bencana geologis seperti gempa bumi dan longsor telah menyebabkan lebih dari 20.000 korban jiwa serta kerugian ekonomi mencapai miliaran dolar AS (Ash-Shidiqqi et al., 2023). Wilayah dengan tingkat risiko tertinggi meliputi Sumatera Barat, Sulawesi Tengah, Nusa Tenggara Timur, dan Jawa Timur, yang seluruhnya berada di zona pertemuan lempeng tektonik aktif (Aprillia & Choiruddin, 2023). Kondisi ini menegaskan bahwa Indonesia merupakan salah satu negara dengan kerentanan seismik tertinggi di dunia, sehingga memerlukan sistem mitigasi bencana yang tidak hanya reaktif, tetapi juga prediktif, analitis, dan berbasis data (Rachman et al., 2025).

Secara global, bencana geologis juga memperlihatkan tren peningkatan. Dalam dua dekade terakhir, lebih dari 750.000 jiwa meninggal akibat gempa bumi di seluruh dunia (Pwavodi et al., 2024), termasuk gempa Turki–Suriah 2023 yang menewaskan lebih dari 56.000 orang. Di Indonesia sendiri, longsor rata-rata menimbulkan sekitar 200 korban jiwa per tahun dengan kerugian ekonomi mencapai lebih dari 300 juta USD, dan sekitar 40 % wilayah Indonesia dikategorikan rawan longsor (Hindarto, Damastuti, et al., 2025). Fenomena ini sejalan dengan tren global meningkatnya frekuensi bencana akibat perubahan iklim, eksploitasi lahan, dan urbanisasi tak terkendali (Astarita et al., 2025). Karena itu, mitigasi bencana tidak cukup mengandalkan upaya tanggap darurat pascakejadian, melainkan harus didukung oleh sistem dalam pengambilan keputusan berbasis data yang cepat, aman, dan akurat.

Kendati berbagai inisiatif telah dilakukan, sistem mitigasi bencana saat ini masih menghadapi sejumlah keterbatasan mendasar. Sistem *Earthquake Early Warning* (EEW) misalnya, masih memiliki tingkat akurasi rendah dan sering menghasilkan false alarm, yang pada akhirnya menurunkan kepercayaan publik terhadap mekanisme peringatan dini (Cremen & Galasso, 2021) Dalam konteks longsor dan gempa, data geospasial sering tidak valid atau sulit diverifikasi, karena bergantung pada sumber terpusat yang rawan manipulasi dan kehilangan integritas (Hindarto, Rachmadi, et al., 2025). Selain itu, pengambilan keputusan pascabencana sering kali tidak adaptif terhadap keterbatasan sumber daya dan kompleksitas wilayah terdampak (Dewa Ramadhan Artagautama et al., 2025). Penelitian (Alemdar, 2025) bahkan menunjukkan bahwa hampir 20 % jaringan jalan di Istanbul memiliki tingkat risiko gempa tinggi, yang menegaskan perlunya sistem evaluasi risiko yang mempertimbangkan faktor multi-dimensi secara komprehensif.

Berbagai penelitian sebelumnya telah mencoba menjawab tantangan ini melalui pendekatan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM). Metode seperti TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) dan ELECTRE (*Elimination and Choice Expressing Reality*) terbukti efektif untuk menentukan prioritas wilayah risiko tinggi berdasarkan kombinasi kriteria seismik, spasial, dan sosial ekonomi (Taherdoost & Madanchian, 2023). Integrasi MCDM dengan *Geographic Information System* (GIS) juga telah diaplikasikan untuk menilai kerentanan infrastruktur transportasi (Alemdar, 2025). Meskipun demikian, model-model ini masih terbatas pada analisis matematis konvensional dan belum menggabungkan mekanisme validasi serta keamanan data yang kuat.

Dalam beberapa tahun terakhir, berbagai teknologi digital mulai dikembangkan untuk meningkatkan transparansi dan keandalan hasil analisis bencana. Sistem pencatatan data berbasis mekanisme *data record* dan otomasi evaluasi mampu menyimpan hasil penilaian risiko secara konsisten dan sulit dimanipulasi, sehingga setiap pemangku kepentingan dapat melakukan verifikasi data secara independen. Penelitian Hindarto et al. (2025) menunjukkan bahwa penerapan sistem mitigasi longsor berbasis metode TOPSIS mampu meningkatkan akurasi pengambilan

keputusan hingga 95%. Selain itu, pendekatan ini juga terbukti memperkuat keamanan pengelolaan data geospasial melalui mekanisme otomasi berbasis kontrak digital (Hindarto et al., 2025b). Sementara itu, *Artificial Intelligence* (AI) berperan penting dalam memperkuat akurasi dan efisiensi sistem. Dengan kemampuannya dalam mendeteksi pola kompleks pada data seismik dan spasial, AI mampu memperkirakan potensi gempa dan dampaknya dengan presisi yang lebih tinggi dibanding metode konvensional (KURNAZ, 2025).

Selain pendekatan berbasis kriteria dan sistem digital, metode *machine learning* juga semakin banyak digunakan untuk meningkatkan ketepatan klasifikasi risiko bencana, khususnya gempa bumi. Salah satu metode yang paling umum digunakan adalah *Logistic Regression*, yang berfungsi untuk mengklasifikasikan tingkat risiko berdasarkan pola historis data seismik seperti magnitudo, kedalaman hiposentrum, serta informasi spasial. Penelitian klasifikasi gempa bumi di Indonesia menunjukkan bahwa *Logistic Regression* mampu mengelompokkan wilayah ke dalam kategori risiko rendah, sedang, dan tinggi dengan tingkat akurasi yang tinggi serta performa evaluasi yang stabil berdasarkan metrik *precision*, *recall*, dan *F1-score* (Salma Mar'atuzzulfa et al., 2025)

Studi internasional juga mengonfirmasi bahwa *Logistic Regression* memiliki kemampuan yang kompetitif dibandingkan metode pembelajaran terawasi lainnya dalam memprediksi kelas gempa fatal, moderat, dan ringan, sekaligus menawarkan keunggulan dalam interpretabilitas model dan efisiensi komputasi (Debnath et al., 2021). Selain itu, penelitian komparatif pada domain kebencanaan menunjukkan bahwa *Logistic Regression* efektif digunakan sebagai model pembanding karena mampu merepresentasikan hubungan probabilistik antara parameter bencana dan tingkat risiko secara objektif, sehingga relevan untuk diintegrasikan atau dibandingkan dengan pendekatan pengambilan keputusan berbasis multi-kriteria (Gusti & Mandala, 2023).

Meskipun berbagai studi telah menunjukkan kemajuan signifikan, kesenjangan penelitian (*research gap*) masih terlihat jelas. Pendekatan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) yang ada umumnya masih bergantung pada basis data terpusat

yang rentan terhadap manipulasi dan keterbatasan transparansi (Mishra et al., 2023). Di sisi lain, pemanfaatan AI dan Internet of Things (IoT) dalam mitigasi bencana sering kali berdiri sendiri dan belum terintegrasi secara langsung dengan sistem pengambilan keputusan kuantitatif, meskipun terbukti mampu meningkatkan akurasi deteksi sinyal seismik (Pwavodi et al., 2024).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengusulkan model evaluasi berbasis **Machine Learning (Logistic Regression) - MCDM** yang menggabungkan kekuatan sistem kecerdasan dalam evaluasi risiko kuantitatif menggunakan metode TOPSIS, SAW, SMART, WP dan ELECTRE. Pendekatan ini dirancang untuk meningkatkan akurasi, konsistensi, dan keterlacakan keputusan dalam analisis risiko gempa bumi. Secara ilmiah, penelitian ini berkontribusi dalam menjembatani kesenjangan antara analisis multi-kriteria dan sistem kecerdasan digital, sedangkan secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi kerangka sistem rekomendasi risiko gempa bumi yang cerdas, aman, dan dapat diverifikasi secara publik, guna mendukung peningkatan ketahanan bencana nasional di era transformasi digital.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana hasil penerapan metode Multi-Criteria Decision Making (MCDM) yaitu TOPSIS, ELECTRE, SAW, SMART, dan Weighted Product (WP) dalam menentukan peringkat risiko gempa bumi berdasarkan parameter seismik dan geospasial?
2. Bagaimana kinerja model Machine Learning menggunakan Logistic Regression dalam mengklasifikasikan tingkat risiko gempa bumi ke dalam kategori Low, Medium, dan High berdasarkan dataset yang telah diproses?
3. Bagaimana perbandingan hasil klasifikasi Logistic Regression dengan hasil perbandingan metode MCDM dalam menentukan prioritas wilayah risiko gempa bumi?

4. Metode manakah yang menunjukkan hasil paling stabil dan konsisten berdasarkan evaluasi performa (akurasi, precision, recall, F1-score, ROC-AUC, serta konsistensi peringkat)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dirumuskan untuk menjawab seluruh rumusan masalah di atas, yaitu.

1. Menganalisis dan mengimplementasikan metode TOPSIS, ELECTRE, SAW, SMART, dan Weighted Product (WP) dalam menentukan tingkat prioritas risiko gempa bumi berdasarkan kriteria magnitudo, kedalaman, jarak terhadap sesar aktif, dan frekuensi historis gempa.
2. Mengembangkan dan mengevaluasi model klasifikasi Logistic Regression untuk mengklasifikasikan tingkat risiko gempa bumi ke dalam kategori Low, Medium, dan High menggunakan pendekatan supervised learning.
3. Membandingkan hasil klasifikasi Logistic Regression dengan hasil perankingan metode MCDM untuk mengidentifikasi tingkat kesesuaian, perbedaan pola prioritas, serta konsistensi antar pendekatan.
4. Menentukan metode yang paling stabil, akurat, dan memiliki kemampuan generalisasi terbaik dalam mendukung sistem rekomendasi mitigasi risiko gempa bumi berbasis data.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa ruang lingkup sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada pengembangan sistem rekomendasi risiko gempa bumi dengan mengevaluasikan metode (MCDM) TOPSIS, ELECTRE, SAW, SMART, dan WP dan Machine Learning menggunakan metode Logistic Regression.

2. Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder, yang meliputi data seismik, geospasial, serta parameter risiko gempa bumi yang relevan dan diperoleh dari sumber resmi dan terpercaya.
3. Penerapan Machine Learning dalam penelitian ini dibatasi pada penggunaan metode Logistic Regression sebagai model klasifikasi risiko gempa bumi, tanpa membahas pengembangan atau optimasi algoritme machine learning lainnya.
4. Evaluasi Machine Learning dan MCDM difokuskan pada peningkatan akurasi, konsistensi, dan objektivitas analisis risiko, tanpa mencakup aspek teknis implementasi sistem secara real-time atau infrastruktur komputasi skala besar.
5. Evaluasi sistem rekomendasi risiko gempa bumi dilakukan dalam bentuk studi kasus berbasis simulasi dan pemodelan, serta belum mencakup implementasi operasional penuh di lapangan.

1.5 Kontribusi Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi dalam dua aspek, yaitu:

1. Mengembangkan model analisis risiko gempa bumi berbasis TOPSIS, ELECTRE, SAW, SMART, dan WP dan *Machine Learning* menggunakan metode Logistic Regression sebagai kerangka konseptual baru dalam sistem rekomendasi risiko gempa bumi.
2. Memberikan kontribusi teknis melalui evaluasi Logistic Regression sebagai model klasifikasi risiko gempa bumi yang mampu meningkatkan akurasi, konsistensi, dan objektivitas hasil analisis berbasis parameter seismik dan geospasial.
3. Memberikan kontribusi akademik sebagai referensi awal bagi pengembangan penelitian lanjutan di bidang sistem pendukung keputusan kebencanaan yang mengkomparasikan pendekatan *data-driven* (Machine Learning) dan metode pengambilan keputusan multi-kriteria (MCDM).