



Sistem Pendukung Keputusan Penentuan Zona Risiko Longsor Berbasis Geographic Information System Menggunakan Metode Fuzzy Multi-Criteria Decision Making

Adinda Nurul^{1*}, Firahmi Rizky²

^{1,2}Program Studi Sistem Informasi, Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Medan, Indonesia

Email: ^{1*}nuruladinda822@gmail.com, ²firahmirizky@umsu.ac.id

Abstrak

Kecamatan Berastagi, Kabupaten Karo, memiliki topografi perbukitan hingga pegunungan yang rentan longsor, sedangkan analisis kerawanan sebelumnya umumnya memakai skoring dengan batas kelas tegas dan berhenti pada peta statis. Penelitian ini bertujuan menganalisis sebaran risiko longsor dan membangun Sistem Pendukung Keputusan (SPK) berbasis Geographic Information System (GIS) dengan metode Fuzzy Multi-Criteria Decision Making (Fuzzy-MCDM). Lima kriteria digunakan, yaitu kemiringan lereng, curah hujan, jenis tanah, penggunaan lahan, dan jarak terhadap jalan, dengan bobot awal 0,30; 0,25; 0,20; 0,15; dan 0,10. Nilai tiap kriteria difuzzifikasi menggunakan fungsi keanggotaan linear naik, linear turun, dan nilai kategori, lalu diagregasi menjadi indeks risiko pada 10 titik data Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Karo. Hasil menunjukkan 3 titik (30%) berada pada zona risiko tinggi dan 7 titik (70%) pada zona sedang, tanpa titik pada zona rendah. Indeks tertinggi terdapat di Lereng Doulu (P09) sebesar 0,7198, dengan kemiringan lereng sebagai kontributor terbesar (rata-rata 35% dari indeks). Analisis sensitivitas pada empat skenario bobot alternatif menunjukkan jumlah titik zona tinggi berkisar 1–4 sehingga bobot perlu dikalibrasi dengan pendapat ahli. Sistem WebGIS berbasis PHP, MySQL, dan Leaflet.js yang dibangun lulus 11 skenario pengujian black box. Sistem ini dapat membantu penentuan prioritas mitigasi, dengan keterbatasan jumlah data dan belum adanya validasi statistik formal.

Kata Kunci: tanah longsor, sistem pendukung keputusan, GIS, Fuzzy-MCDM, zonasi risiko.

PENDAHULUAN

Tanah longsor tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal. Kejadiannya dipengaruhi gabungan faktor topografi, geologi, hidrologi, iklim, dan aktivitas manusia yang bekerja bersamaan (Reichenbach dkk., 2018; Rivera dkk., 2025). Karena itu, suatu wilayah tidak dapat dinilai aman atau berisiko hanya dari satu jenis data, misalnya curah hujan.

Kecamatan Berastagi, Kabupaten Karo, merupakan wilayah perbukitan hingga pegunungan yang dimanfaatkan sebagai kawasan permukiman, pertanian, wisata, dan jalur transportasi. Sari dkk. (2021) memetakan kerawanan longsor di kecamatan ini dengan GIS dan memperoleh kelas rendah 33,16%, sedang 24,69%, tinggi 33,76%, dan sangat tinggi 8,38%. Artinya, sekitar 66,83% wilayah berada pada kerawanan sedang hingga sangat tinggi. Konsentrasi kerawanan tertinggi ditemukan di Desa Doulu (17,40%). Pada skala yang lebih luas, Hastuty dkk. (2026) menerapkan AHP–GIS dengan 11 variabel pada koridor jalan Medan–Berastagi. Mereka melaporkan bahwa 55% segmen jalan berada pada kelas bahaya tinggi dan sangat tinggi, dengan kemiringan lereng, tinggi lereng, curah hujan, dan tutupan vegetasi sebagai faktor dominan. Hasil tersebut divalidasi pada 71 titik inventaris longsor dengan akurasi 97,6%. Mahmuda dkk. (2026) memetakan zona risiko longsor di Kabupaten Karo dengan *weighted overlay* lima parameter (hujan, lereng, tanah, geologi, dan tata guna lahan). Mereka menemukan zona risiko sedang seluas 849,2 ha dan tinggi seluas 774 ha. Di luar Sumatera Utara, Hamdani dkk. (2025) memasukkan jarak terhadap jalan sebagai salah satu dari delapan parameter kerawanan di Lembang. Mereka mencatat bahwa titik longsor terbanyak berada pada jarak lebih dari 100 m dari jalan, yang dikaitkan dengan lereng curam di area terpencil, sementara pembangunan jalan tetap dapat memicu longsor melalui perubahan bentuk lereng.

Pendekatan fuzzy banyak dipakai untuk menangani batas kelas yang tidak tegas pada data lingkungan. Abdi dkk. (2021) menggabungkan logika fuzzy dan AHP berbasis GIS dengan 12 parameter dan memperoleh AUC 0,908, lebih tinggi daripada AHP konvensional (0,777). Sur dkk. (2020) menerapkan

fuzzy AHP dan data penginderaan jauh pada koridor jalan Himalaya dengan akurasi 86,52%. Tavakolifar dkk. (2023) membandingkan metode hibrida pada jalan pegunungan di Iran dengan 100 longsor hasil survei. Fuzzy logic–TOPSIS mencapai akurasi prediksi 0,983 dan fuzzy logic–ANP 0,938. Saygin dkk. (2023) menggunakan fuzzy-AHP dan pohon keputusan di Samsun dan menemukan bahwa kelas kerawanan tinggi paling sulit diprediksi (AUC 0,773). Di Indonesia, Damayanti dkk. (2023) melaporkan kesesuaian 89,78% untuk pemetaan fuzzy AHP di Bantul. Borinsky dan Idarwati (2026) menerapkan Fuzzy AHP di Sumatera Barat dan menemukan bahwa lereng dan curah hujan berbobot sama (29,86%), diikuti tutupan lahan (29,76%) dan jenis tanah (10,52%). Metode pembelajaran mesin juga menunjukkan kinerja tinggi, misalnya SVM dengan akurasi 0,89 pada 512 kejadian longsor (Mao dkk., 2024) dan model ensemble dengan AUC di atas 0,96 (Zulfahmi dkk., 2025). Namun, metode tersebut memerlukan inventaris kejadian yang banyak, sedangkan data lokal tidak selalu selengkap itu. Pada kondisi demikian, pendekatan berbasis pengetahuan seperti MCDM tetap relevan.

Tabel 1. Penelitian terdahulu yang relevan

Peneliti	Lokasi dan metode	Temuan utama	Perbedaan dengan penelitian ini
Hastuty dkk. (2026)	Koridor Medan–Berastagi; AHP–GIS, 11 variabel	55% segmen kelas tinggi–sangat tinggi; akurasi validasi 97,6%	Bobot nilai tegas (AHP); belum berbentuk SPK
Sari dkk. (2021)	Kec. Berastagi; GIS, skoring dan overlay	Kelas tinggi 33,76%, sangat tinggi 8,38%; Doulu tertinggi (17,40%)	Overlay tegas; belum berbentuk SPK
Mahmuda dkk. (2026)	Kab. Karo; weighted overlay, 5 parameter	Zona sedang 849,2 ha, tinggi 774 ha; rute evakuasi	Overlay tegas; fokus rute evakuasi
Abdi dkk. (2021)	Constantine, Aljazair; fuzzy logic–AHP	AUC fuzzy 0,908 vs AHP 0,777	Tidak berbentuk SPK web; lokasi berbeda
Sur dkk. (2020)	Koridor jalan Himalaya; fuzzy AHP	Akurasi 86,52%	Belum berbentuk SPK; lokasi berbeda
Tavakolifar dkk. (2023)	Jalan Saqqez–Marivan, Iran; FL–TOPSIS dan FL–ANP	Akurasi 0,983 (FL–TOPSIS) dan 0,938 (FL–ANP)	Metode agregasi berbeda; tidak berbentuk SPK
Damayanti dkk. (2023)	Bantul; SIG, Fuzzy AHP	Kesesuaian 89,78%	Pemetaan, bukan SPK web dengan kriteria dinamis
Borinsky dan Idarwati (2026)	Sumatera Barat; FAHP–GIS, 4 parameter	Lereng dan hujan masing–masing 29,86%	Tanpa jarak terhadap jalan; bukan SPK web
Mao dkk. (2024)	DAS Danau Urmia; SVM, RF, fuzzy logic, TOPSIS, dll.	SVM terbaik (akurasi 0,89) pada 512 kejadian	Berbasis data inventaris besar
Kosasih dan Rizky (2026)	Kota Binjai; ANP dan Ordinary Kriging, WebGIS	Bobot ANP dan peta sebaran; PHP dan Leaflet.js	Domain kualitas udara; bobot nilai tegas
Farhan dan Azis (2026)	Kota Medan; AHP dan GIS, 6 kriteria	Kolam retensi; PHP, MySQL, Leaflet.js	Domain banjir; AHP

Selain kualitas analisis, cara penyajian hasil juga menentukan kegunaannya. Vinueza-Martinez dkk. (2024) menunjukkan bahwa riset WebGIS terkonsentrasi pada pengelolaan GIS untuk pengambilan keputusan dengan arsitektur berbasis web dan sumber terbuka. Wen dan Li (2023) menyebut kurangnya kepercayaan, keahlian teknis, dan sumber daya sebagai hambatan adopsi *spatial decision support system*. Dua penelitian pada jurnal ini menunjukkan bahwa SPK berbasis WebGIS layak dibangun untuk kebutuhan pemerintah daerah di Sumatera Utara. Kosasih dan Rizky (2026) membangun SPK kualitas udara Kota Binjai dengan ANP dan *Ordinary Kriging* menggunakan PHP dan Leaflet.js. Farhan dan Azis (2026) membangun SPK penentuan lokasi kolam retensi di Kota Medan dengan AHP dan GIS menggunakan PHP, MySQL, dan Leaflet.js. Keduanya memakai bobot nilai tegas dan tidak membahas longsor.

Berdasarkan telaah di atas, celah penelitian terletak pada tiga hal. Pertama, analisis longsor di Berastagi masih didominasi skoring dan overlay dengan batas kelas tegas. Kedua, hasil analisis umumnya berhenti pada peta statis. Ketiga, sepengetahuan penulis, belum ditemukan SPK berbasis GIS yang menggabungkan Fuzzy-MCDM dengan kriteria yang dapat diubah pengguna, transparan hingga rincian kontribusi tiap kriteria, dan dapat dipasang mandiri oleh instansi daerah. Kebaruan artikel ini adalah integrasi ketiga unsur tersebut dalam satu sistem WebGIS untuk Kecamatan Berastagi.

Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana sebaran risiko longsor di Kecamatan Berastagi berdasarkan lima kriteria, kriteria mana yang paling berpengaruh, dan bagaimana SPK berbasis GIS dengan

Fuzzy-MCDM dapat dirancang dan diimplementasikan. Tujuan penelitian ini adalah (1) menganalisis sebaran dan karakteristik risiko longsor, (2) merancang dan mengimplementasikan SPK berbasis GIS yang dapat dipasang mandiri, (3) menentukan kriteria yang paling berpengaruh, dan (4) menghasilkan zonasi dan pemeringkatan risiko longsor sebagai dasar keputusan mitigasi.

METODE

Jenis penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian terapan dan pengembangan sistem dengan pendekatan kuantitatif dan spasial. Lokasi penelitian di Kec. Berastagi, Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara.

Data

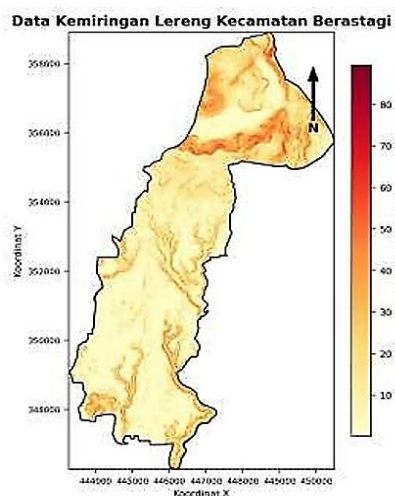
Penelitian memakai dua jenis data yang saling melengkapi. Pertama, data spasial cakupan luas berupa raster DEM dari DEMNAS (untuk kemiringan lereng) dan raster curah hujan CHIRPS rata-rata 2021–2025. Keduanya diolah di QGIS melalui penyamaan sistem koordinat, pemotongan sesuai batas kecamatan, dan penurunan parameter. Kedua, data operasional berupa tabel 10 titik lokasi sampel dari BPBD Kabupaten Karo yang diperoleh melalui surat permohonan resmi. Data ini memuat kemiringan lereng (%), curah hujan (mm/tahun), jenis tanah, penggunaan lahan, dan jarak terhadap jalan (m), dan dipakai sebagai masukan sistem.

Tahapan penelitian

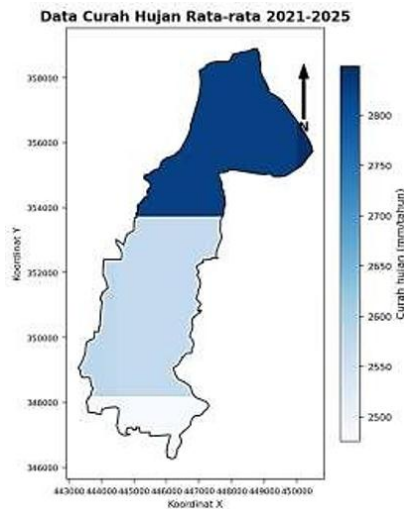
Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, pengumpulan dan pengolahan data, penentuan kriteria, nilai fuzzy dan bobot, integrasi analisis spasial, analisis hasil, serta perancangan dan pengujian sistem (Gambar 1). Konteks spasial kemiringan lereng dan curah hujan ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 1. Tahapan penelitian



Gambar 2. Data kemiringan lereng Kecamatan Berastagi
(sumber: pengolahan DEMNAS dengan QGIS, 2026)



Gambar 3. Data curah hujan rata-rata tahun 2021–2025
 (sumber: CHIRPS, diolah dengan QGIS, 2026)

Fuzzifikasi

Nilai asli setiap kriteria diubah menjadi derajat keanggotaan 0–1 agar kriteria berbeda satuan dapat digabungkan. Kemiringan lereng dan curah hujan memakai fungsi linear naik (Persamaan 1), jarak terhadap jalan memakai fungsi linear turun (Persamaan 2), dan jenis tanah serta penggunaan lahan memakai nilai kategori.

$$\mu(x) = 0, \text{ jika } x \leq a; \mu(x) = (x - a)/(b - a), \text{ jika } a < x < b; \mu(x) = 1, \text{ jika } x \geq b \quad (1)$$

$$\mu(x) = 1, \text{ jika } x \leq a; \mu(x) = (b - x)/(b - a), \text{ jika } a < x < b; \mu(x) = 0, \text{ jika } x \geq b \quad (2)$$

Data BPBD memakai satuan persen, sedangkan peta pada Gambar 2 memakai satuan derajat. Hubungan keduanya tidak linear ($\text{derajat} = \arctan(\text{persen}/100) \times 180/\pi$). Karena itu, batas fuzzifikasi kemiringan lereng ditetapkan dalam persen berdasarkan klasifikasi standar: datar 0–8%, landai 8–15%, agak curam 15–25%, curam 25–40%, dan sangat curam di atas 40%. Batas yang dipakai adalah $a = 0$ dan $b = 40$. Batas curah hujan mengikuti rentang data CHIRPS ($a = 2.476,04$ dan $b = 2.848,68$ mm/tahun). Batas jarak terhadap jalan ditetapkan $a = 50$ m dan $b = 500$ m sebagai nilai awal yang dapat dikalibrasi ulang admin.

Tabel 2. Kriteria, fungsi keanggotaan, batas, dan bobot awal

Kode	Kriteria	Fungsi keanggotaan	Batas	Bobot
C1	Kemiringan lereng	Linear naik	$a = 0; b = 40$ (%)	0,30
C2	Curah hujan	Linear naik	$a = 2.476,04; b = 2.848,68$ (mm/tahun)	0,25
C3	Jenis tanah	Kategori	Tabel 3	0,20
C4	Penggunaan lahan	Kategori	Tabel 3	0,15
C5	Jarak terhadap jalan	Linear turun	$a = 50; b = 500$ (m)	0,10

Tabel 3. Nilai fuzzy kriteria kategori (nilai awal sistem)

Kriteria	Kategori	Nilai fuzzy	Dasar penentuan
C3 Jenis tanah	Regosol	0,75	Material lepas, belum berkembang, mudah tergerus air
	Podsolik	0,60	Tanah tercuci, struktur relatif lemah
	Andosol	0,55	Tanah vulkanik porus, rentan saat jenuh air
	Latosol	0,35	Struktur lebih matang dan relatif stabil
C4 Penggunaan lahan	Pemukiman padat	0,85	Beban bangunan tinggi, permukaan kedap air
	Pemukiman	0,70	Perubahan tutupan lahan akibat aktivitas manusia
	Pertanian hortikultura	0,60	Vegetasi rendah, tanah sering diolah
	Pertanian lahan basah	0,55	Tanah cenderung jenuh air
	Kebun campuran	0,40	Vegetasi campuran, akar mengikat tanah
	Semak belukar	0,35	Vegetasi penutup sedang
	Hutan sekunder	0,20	Tutupan vegetasi baik

Pembobotan dan indeks Risiko

Bobot ditetapkan berdasarkan peran tiap kriteria terhadap kestabilan lereng dan kejenuhan tanah, dengan jumlah sama dengan 1 (Persamaan 3). Indeks risiko tiap lokasi dihitung sebagai jumlah nilai fuzzy terbobot (Persamaan 4).

$$\sum w_j = 1, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$I_i = \sum (w_j \times \mu_{ij}), j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Dengan I_i indeks risiko lokasi ke- i , w_j bobot kriteria ke- j , μ_{ij} nilai fuzzy kriteria ke- j pada lokasi ke- i , dan $n = 5$. Indeks diklasifikasikan menjadi tiga zona (Tabel 4).

Tabel 4. Kelas zona indeks risiko

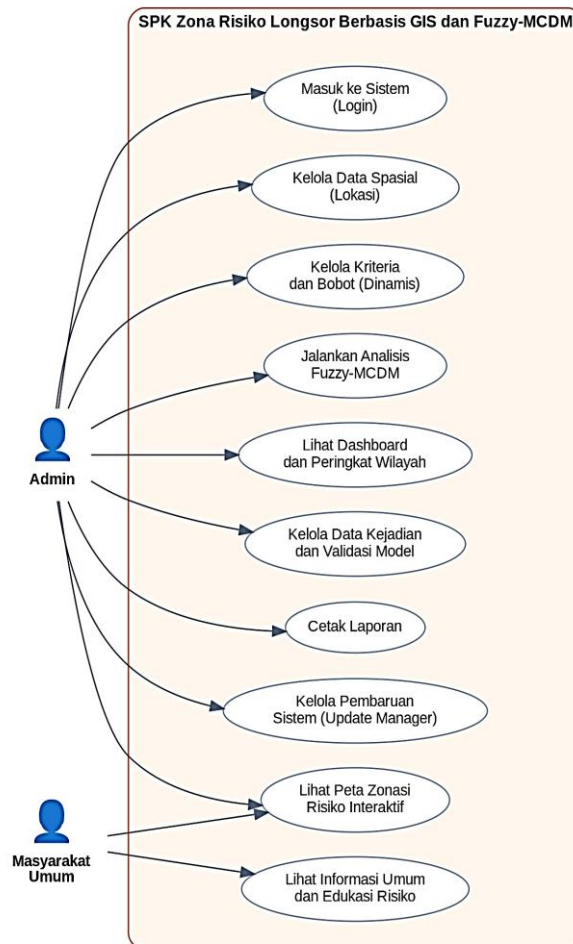
Kelas zona	Rentang indeks
Rendah	0,00 – 0,33
Sedang	> 0,33 – 0,66
Tinggi	> 0,66 – 1,00

Analisis sensitivitas bobot

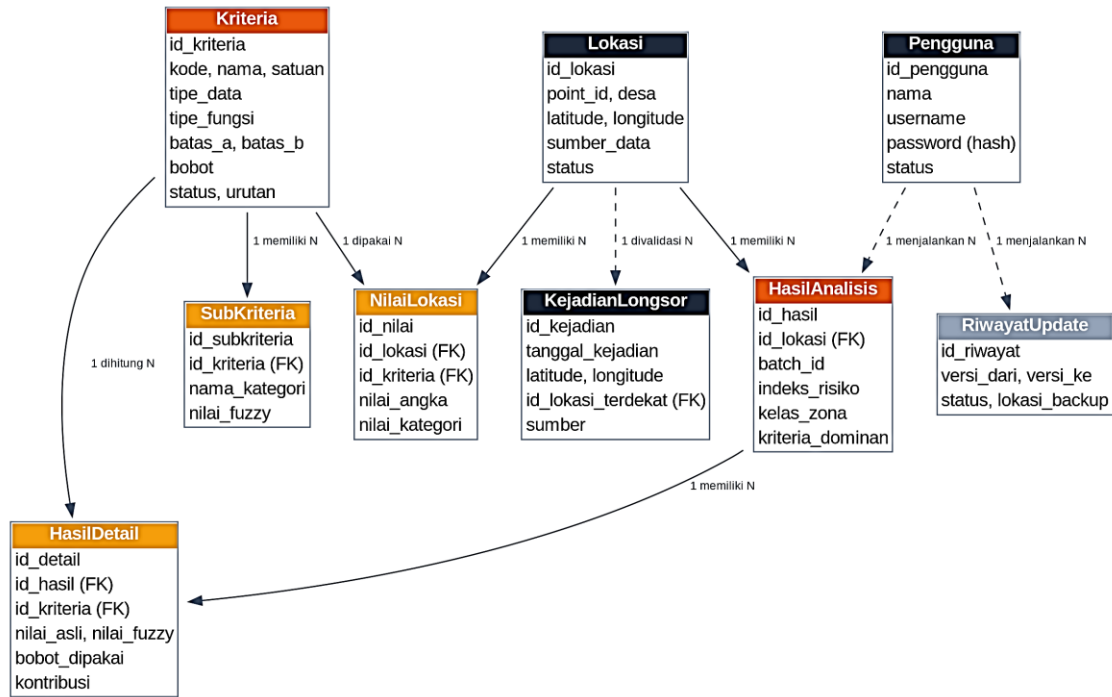
Karena bobot awal ditetapkan peneliti, indeks dihitung ulang pada empat skenario alternatif: (A) bobot sama rata 0,20 untuk semua kriteria; (B) lereng dominan (0,40; 0,20; 0,15; 0,15; 0,10); (C) hujan dominan (0,20; 0,35; 0,20; 0,15; 0,10); dan (D) jarak jalan dominan (0,25; 0,20; 0,15; 0,15; 0,25). Perubahan peringkat diukur dengan korelasi peringkat Spearman terhadap skenario dasar.

Perancangan sistem

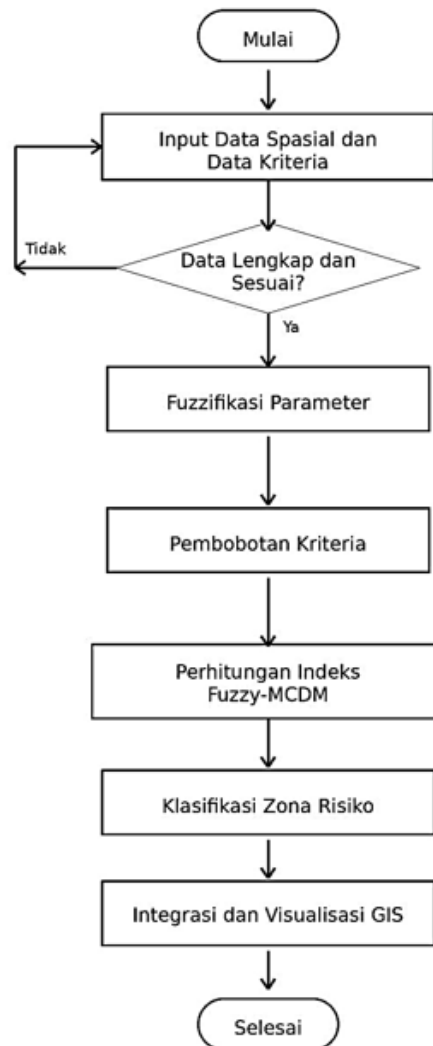
Sistem dimodelkan dengan UML. *Use case diagram* menggambarkan dua aktor, yaitu Admin dan Masyarakat Umum (Gambar 4). Admin mengelola data lokasi, kriteria, subkriteria, dan bobot, menjalankan analisis, mengelola data kejadian untuk validasi, mencetak laporan, dan memperbarui sistem. Masyarakat Umum dapat melihat peta zonasi dan informasi edukasi tanpa login. Struktur data memakai pola *Entity-Attribute-Value* (EAV) (Nadkarni dkk., 1999) agar jumlah dan jenis kriteria dapat diubah tanpa mengubah skema basis data atau kode program (Gambar 5). Alur proses sistem ditunjukkan pada Gambar 6. Rancangan antarmuka ditunjukkan pada Gambar 7, dan teknologi yang dipakai dirangkum pada Tabel 5.



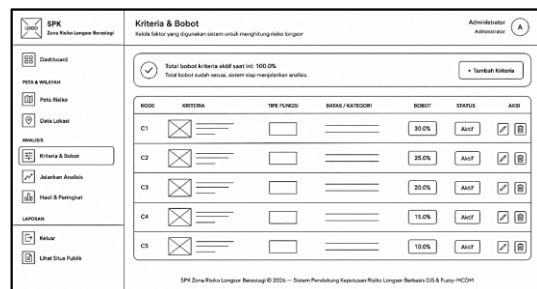
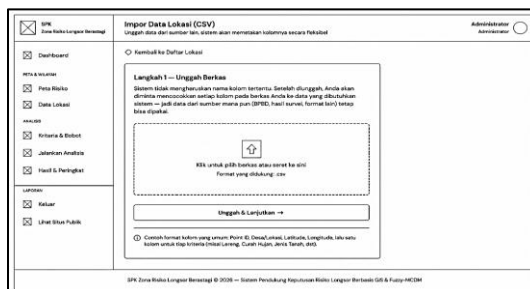
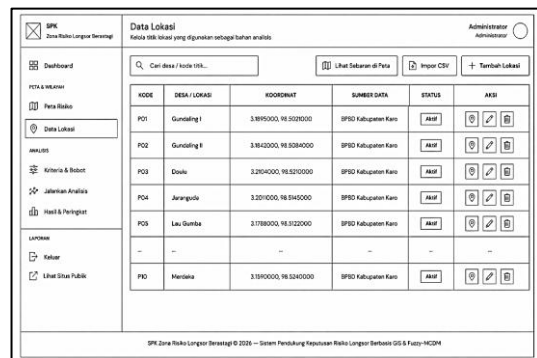
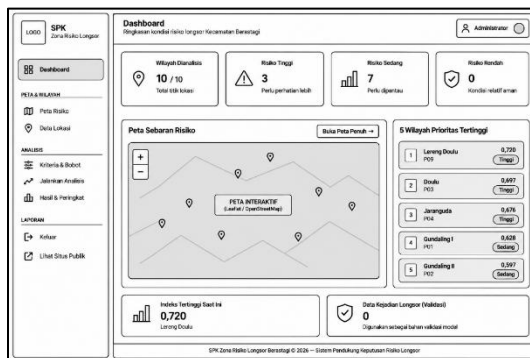
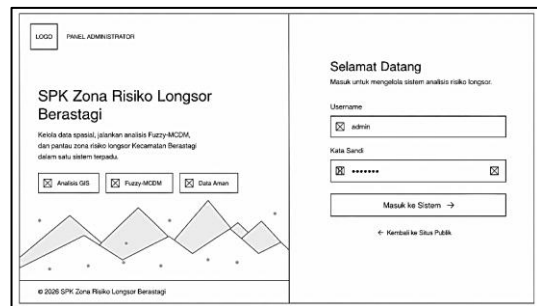
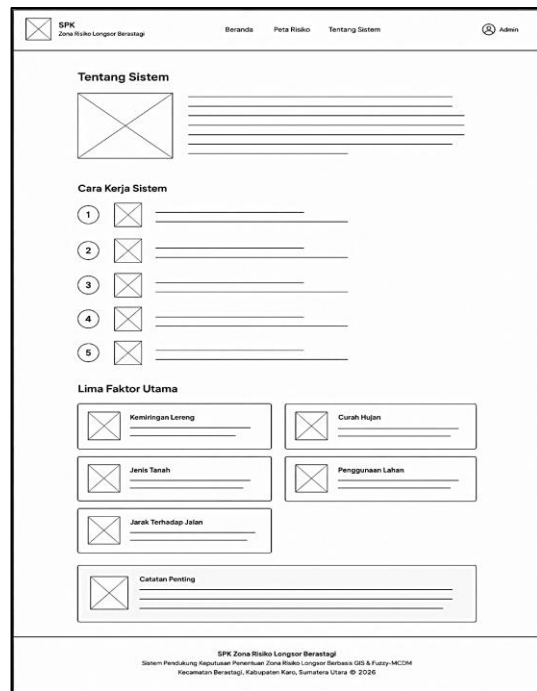
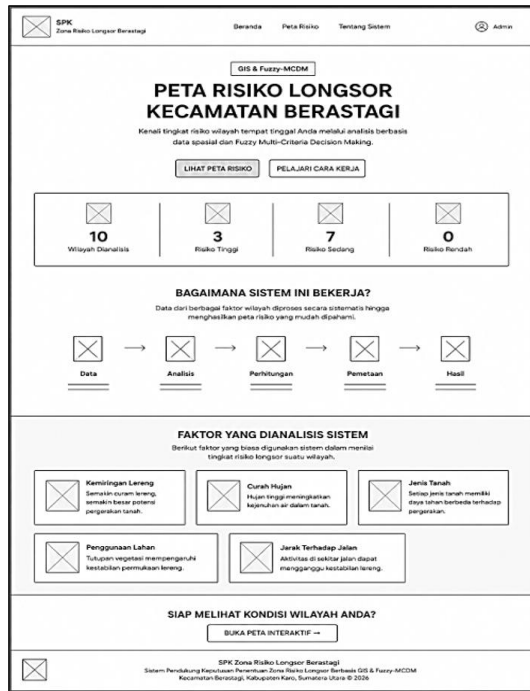
Gambar 4. Use case diagram sistem

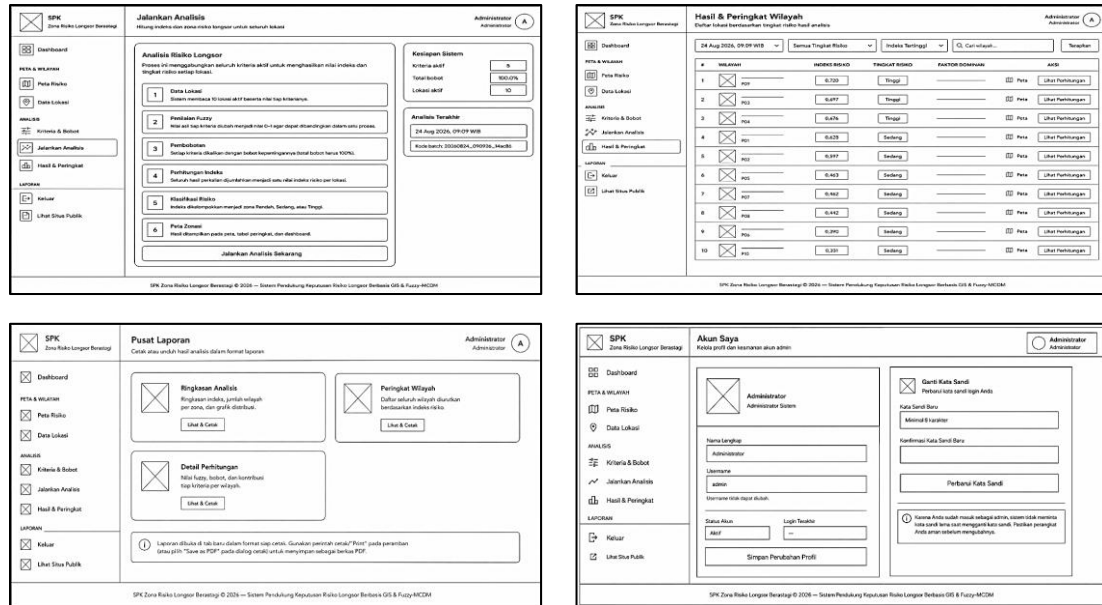


Gambar 5. Class diagram sistem



Gambar 6. Alur proses algoritma Fuzzy-MCDM berbasis GIS





Gambar 7. Rancangan-rancangan Antarmuka Sistem

Tabel 5. Arsitektur Teknologi Sistem

Komponen	Teknologi
Bahasa backend	PHP 8.1 (native, tanpa framework)
Basis data	MySQL, diakses melalui MySQLi dengan prepared statement
Kerangka tampilan	Tailwind CSS
Peta interaktif	Leaflet.js dengan lapisan Peta Jalan (OpenStreetMap), Satelit (Esri World Imagery), dan Topografi (OpenTopoMap)
Ikon dan tipografi	Google Material Symbols Rounded; Google Fonts Plus Jakarta Sans

Pengujian

Sistem diuji dengan *black box testing*, yaitu menilai fungsi berdasarkan masukan dan keluaran tanpa memeriksa struktur kode (Alshamaa dan Saleem, 2025). Pengujian dilakukan pada sistem yang dipasang dari berkas distribusi akhir. Fungsi sisi server diuji dengan permintaan HTTP otomatis, sedangkan komponen berbasis JavaScript (peta dan widget koordinat) diperiksa melalui keberadaannya pada keluaran HTML.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Data operasional dan fuzzifikasi

Tabel 6 menyajikan data 10 titik dari BPBD Kabupaten Karo, dan Tabel 7 menyajikan nilai fuzzy hasil perhitungan.

Tabel 6. Data operasional 10 titik lokasi (BPBD Kabupaten Karo)

Kode	Desa	Lereng (%)	Hujan (mm/th)	Jenis tanah	Penggunaan lahan	Jarak jalan (m)
P01	Gundaling I	35,2	2.650	Andosol	Semak belukar	120
P02	Gundaling II	28,5	2.600	Andosol	Pertanian hortikultura	45
P03	Doulu	42,1	2.750	Regosol	Hutan sekunder	350
P04	Jaranguda	31,0	2.700	Andosol	Pertanian hortikultura	80
P05	Lau Gumba	18,4	2.550	Latosol	Pemukiman	25
P06	Raya	12,0	2.480	Latosol	Pemukiman padat	15
P07	Tambak Lau Mulgap	15,6	2.520	Andosol	Pemukiman	30
P08	Rumah Berastagi	22,8	2.580	Latosol	Kebun campuran	180
P09	Lereng Doulu	48,0	2.800	Regosol	Semak belukar	650
P10	Merdeka	8,5	2.450	Podsolik	Pertanian lahan basah	210

Tabel 7. Nilai fuzzy (μ) tiap kriteria

Kode	μ C1	μ C2	μ C3	μ C4	μ C5
P01	0,8800	0,4668	0,5500	0,3500	0,8444
P02	0,7125	0,3327	0,5500	0,6000	1,0000
P03	1,0000	0,7352	0,7500	0,2000	0,3333
P04	0,7750	0,6010	0,5500	0,6000	0,9333
P05	0,4600	0,1985	0,3500	0,7000	1,0000
P06	0,3000	0,0106	0,3500	0,8500	1,0000
P07	0,3900	0,1180	0,5500	0,7000	1,0000
P08	0,5700	0,2790	0,3500	0,4000	0,7111
P09	1,0000	0,8694	0,7500	0,3500	0,0000
P10	0,2125	0,0000	0,6000	0,5500	0,6444

Sebagai ilustrasi, perhitungan pada titik Lereng Doulu (P09) disajikan pada Tabel 8. Lereng 48% melampaui $b = 40$ sehingga $\mu(C1) = 1,0000$. Curah hujan 2.800 mm/tahun menghasilkan $\mu(C2) = (2.800 - 2.476,04)/(2.848,68 - 2.476,04) = 0,8694$. Jarak 650 m melampaui $b = 500$ sehingga $\mu(C5) = 0,0000$.

Tabel 8. Contoh perhitungan indeks risiko titik P09

Kriteria	Nilai fuzzy	Bobot	Kontribusi
C1 Kemiringan lereng	1,0000	0,30	0,3000
C2 Curah hujan	0,8694	0,25	0,2173
C3 Jenis tanah	0,7500	0,20	0,1500
C4 Penggunaan lahan	0,3500	0,15	0,0525
C5 Jarak jalan	0,0000	0,10	0,0000
Indeks risiko			0,7198 (Tinggi)

Zonasi dan pemeringkatan risiko

Tabel 9. Indeks, kelas zona, peringkat, dan faktor dominan

Peringkat	Kode	Desa	Indeks	Kelas zona	Faktor dominan
1	P09	Lereng Doulu	0,7198	Tinggi	C1 Kemiringan lereng
2	P03	Doulu	0,6971	Tinggi	C1 Kemiringan lereng
3	P04	Jaranguda	0,6761	Tinggi	C1 Kemiringan lereng
4	P01	Gundaling I	0,6277	Sedang	C1 Kemiringan lereng
5	P02	Gundaling II	0,5969	Sedang	C1 Kemiringan lereng
6	P05	Lau Gumba	0,4626	Sedang	C1 Kemiringan lereng
7	P07	Tambak Lau Mulgap	0,4615	Sedang	C1 Kemiringan lereng
8	P08	Rumah Berastagi	0,4419	Sedang	C1 Kemiringan lereng
9	P06	Raya	0,3902	Sedang	C4 Penggunaan lahan
10	P10	Merdeka	0,3307	Sedang	C3 Jenis tanah

Dari 10 titik, 3 titik (30%) masuk zona tinggi, 7 titik (70%) zona sedang, dan tidak ada titik pada zona rendah. Indeks berkisar 0,3307–0,7198 dengan rata-rata 0,5405 dan simpangan baku 0,1392. Titik P10 (0,3307) berada tepat di atas batas zona rendah sehingga tergolong sedang secara marginal.

Tabel 10. Kontribusi rata-rata tiap kriteria terhadap indeks (10 titik)

Kriteria	Bobot	Kontribusi rata-rata	Persentase dari rata-rata indeks
C1 Kemiringan lereng	0,30	0,1890	35,0%
C2 Curah hujan	0,25	0,0903	16,7%
C3 Jenis tanah	0,20	0,1070	19,8%
C4 Penggunaan lahan	0,15	0,0795	14,7%
C5 Jarak terhadap jalan	0,10	0,0747	13,8%

Kemiringan lereng menjadi faktor dominan pada 8 dari 10 titik dan menyumbang 35,0% dari rata-rata indeks. Pada ketiga titik zona tinggi, kemiringan lereng adalah kontributor terbesar dan curah hujan atau jenis tanah menjadi kontributor berikutnya.

Analisis sensitivitas bobot

Tabel 11. Hasil analisis sensitivitas bobot

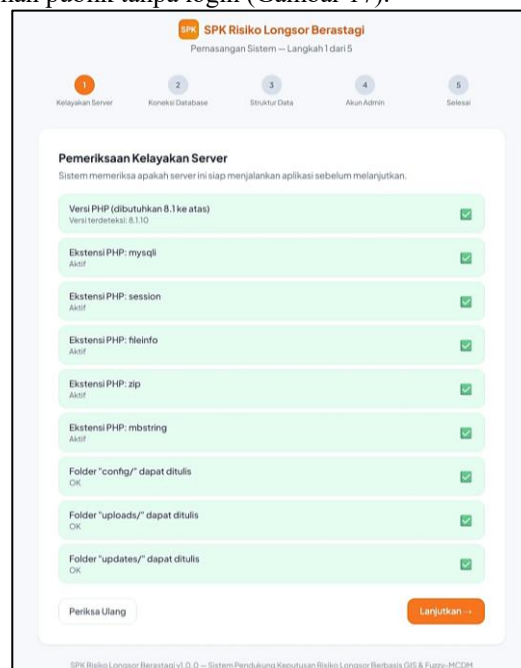
Skenario	Zona tinggi	Zona sedang	Zona rendah	Tiga peringkat teratas	Korelasi Spearman
Dasar (0,30; 0,25; 0,20; 0,15; 0,10)	3 (P03, P04, P09)	7	0	P09, P03, P04	1,000
A. Bobot sama rata	1 (P04)	9	0	P04, P02, P01	0,770
B. Lereng dominan	4 (P01, P03, P04, P09)	5	1 (P10)	P09, P03, P04	0,988
C. Hujan dominan	2 (P03, P09)	7	1 (P10)	P09, P03, P04	1,000
D. Jarak jalan dominan	2 (P02, P04)	8	0	P04, P02, P01	0,782

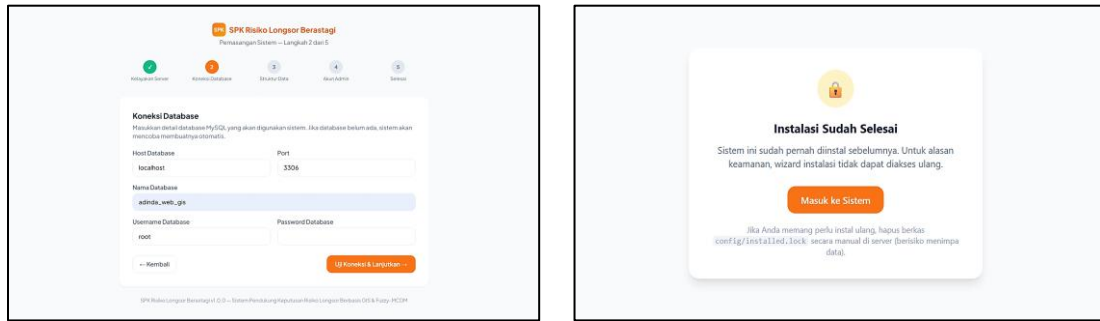
Titik P09, P03, dan P04 selalu berada pada kelompok teratas. Jumlah titik zona tinggi bervariasi dari 1 sampai 4, dan peringkat berubah cukup besar (ρ sekitar 0,77) ketika bobot lereng dan hujan dilemahkan.

Implementasi sistem

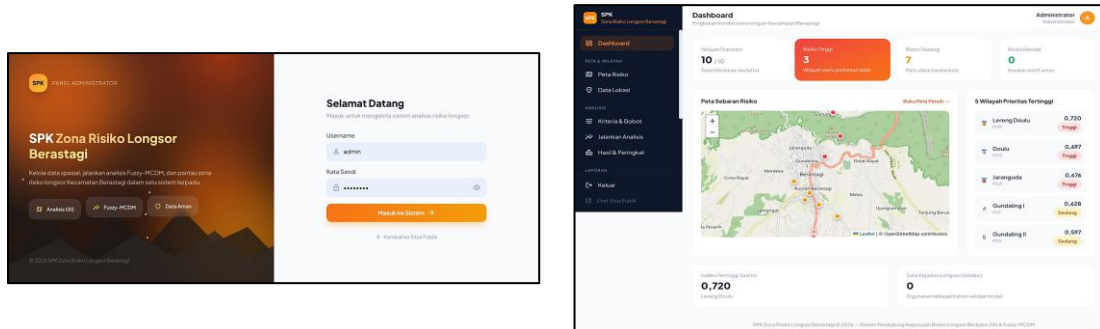
Sistem diimplementasikan sebagai aplikasi WebGIS yang didistribusikan dalam berkas ZIP. Pemasangannya memakai *wizard* instalasi web lima langkah: pemeriksaan kelayakan server, pengujian koneksi basis data, pembuatan struktur data, pembuatan akun admin, dan penguncian folder instalasi (Gambar 8). Kebutuhan minimum perangkat ringkas, yaitu 1 vCPU, RAM 1 GB, penyimpanan 500 MB, PHP 8.1 ke atas dengan ekstensi mysqli, zip, fileinfo, session, mbstring, dan curl, serta MySQL 5.7 atau MariaDB 10.3 ke atas.

Autentikasi admin memakai `password_hash()` dan `password_verify()` (bcrypt) (Gambar 9). Halaman Data Lokasi menyediakan tiga metode pengisian koordinat: manual, menggeser penanda pada peta mini, dan ekstraksi tautan Google Maps. Fitur impor CSV mendukung pemetaan kolom yang fleksibel (Gambar 10). Halaman Kriteria & Bobot memungkinkan admin menambah, mengubah, atau menonaktifkan kriteria, fungsi keanggotaan, batas, bobot, dan subkriteria tanpa mengubah kode program. Total bobot divalidasi secara langsung (Gambar 11). Proses analisis dijalankan dari halaman Jalankan Analisis (Gambar 12). Hasilnya ditampilkan sebagai tabel peringkat dengan rincian nilai fuzzy, bobot, dan kontribusi tiap kriteria (Gambar 13). Peta risiko memakai Leaflet.js dengan tiga lapisan dasar dan detail lokasi pada *popup* (Gambar 14). Sistem juga menyediakan empat jenis laporan siap cetak (Gambar 15), pengelolaan akun, pengaturan umum, dan *Update Manager* dengan cadangan serta pemulihan otomatis (Gambar 16), dan tiga halaman publik tanpa login (Gambar 17).

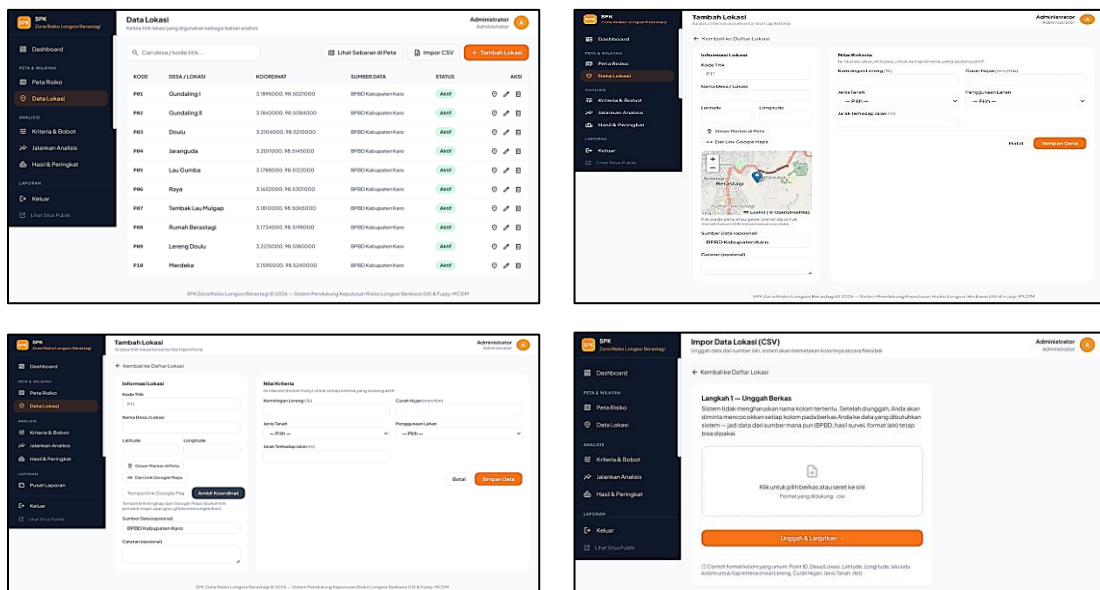




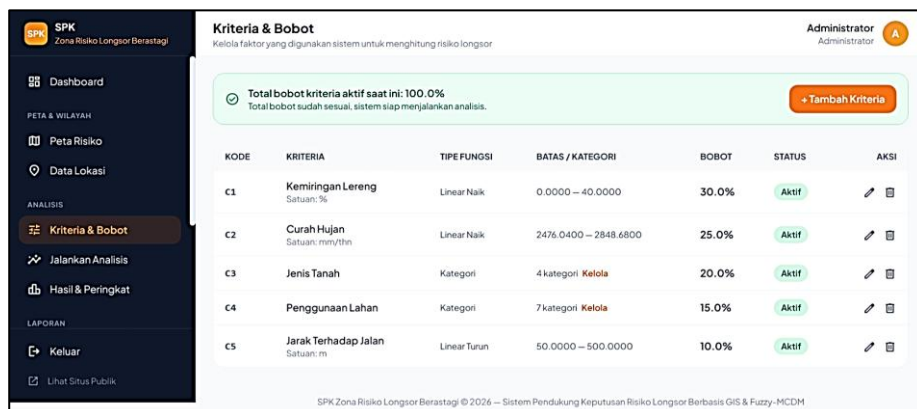
Gambar 8. Halaman instalasi sistem

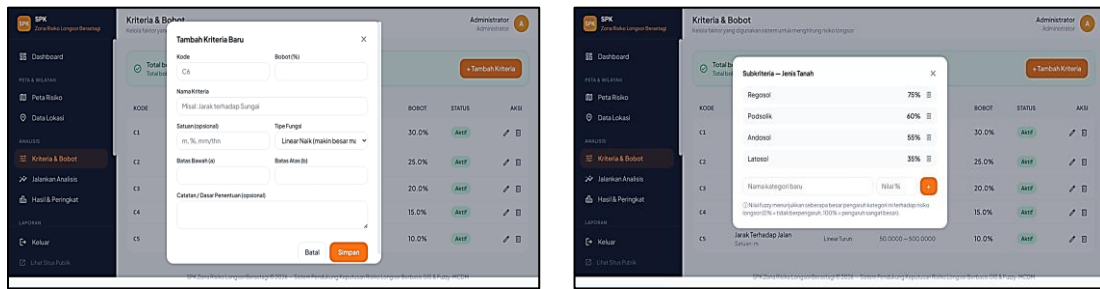


Gambar 9. Halaman login dan dashboard admin

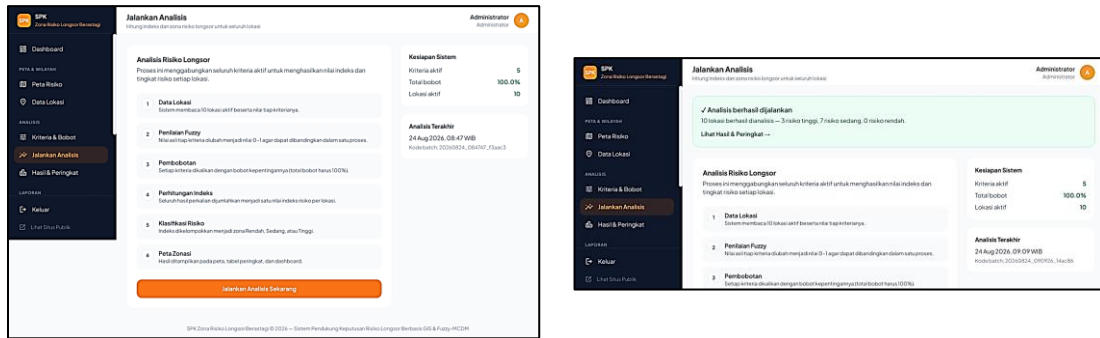


Gambar 10. Halaman data lokasi dan impor data CSV

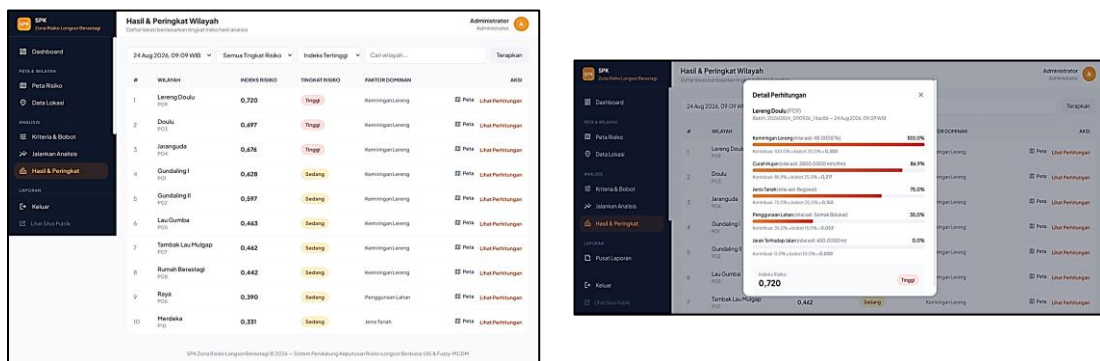




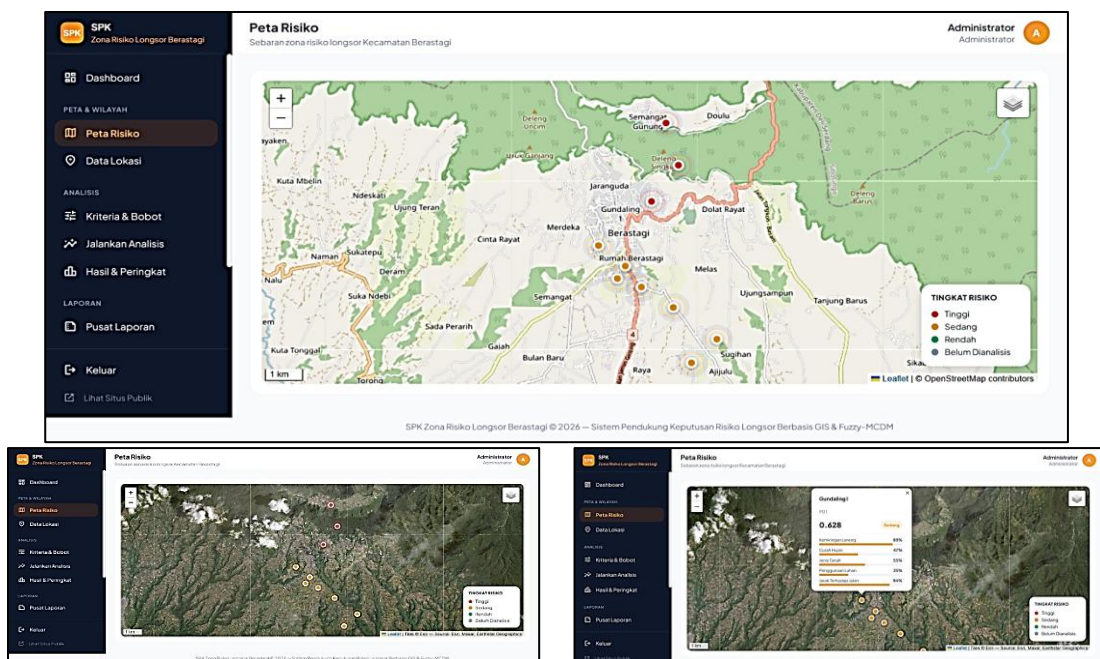
Gambar 11. Halaman kriteria dan bobot



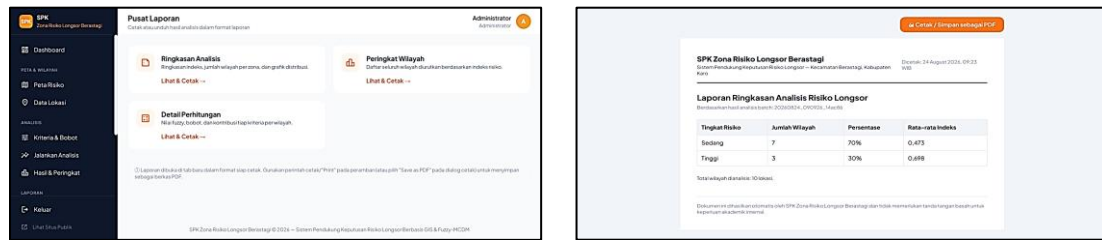
Gambar 12. Halaman jalankan analisis



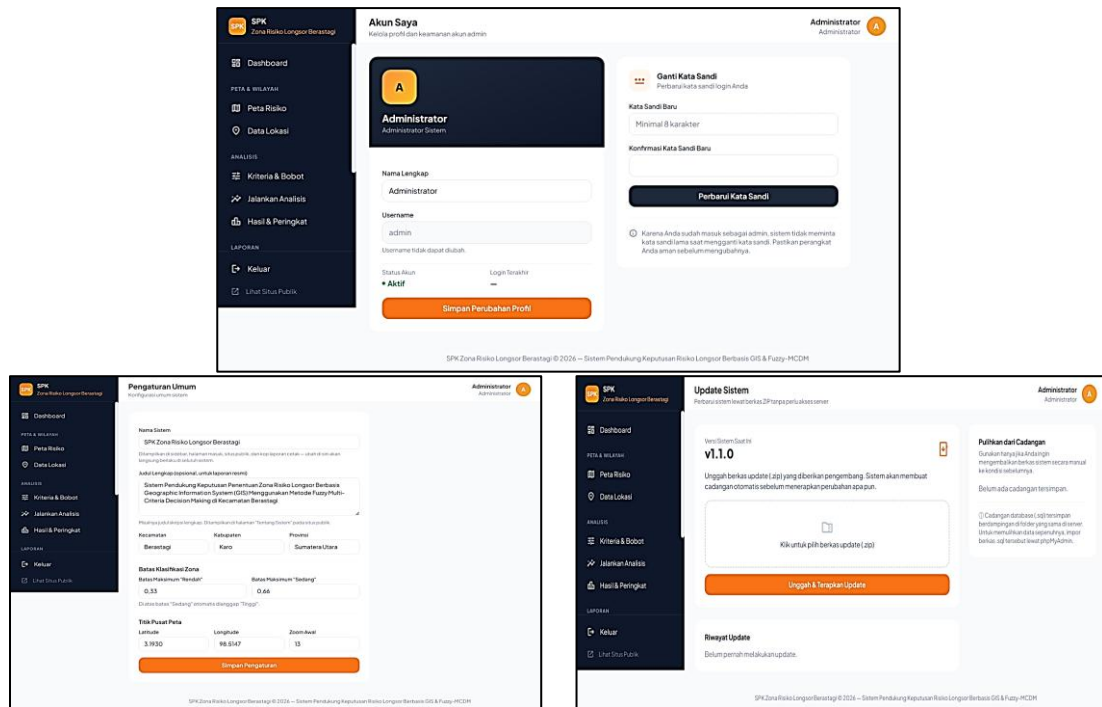
Gambar 13. Halaman hasil dan peringkat



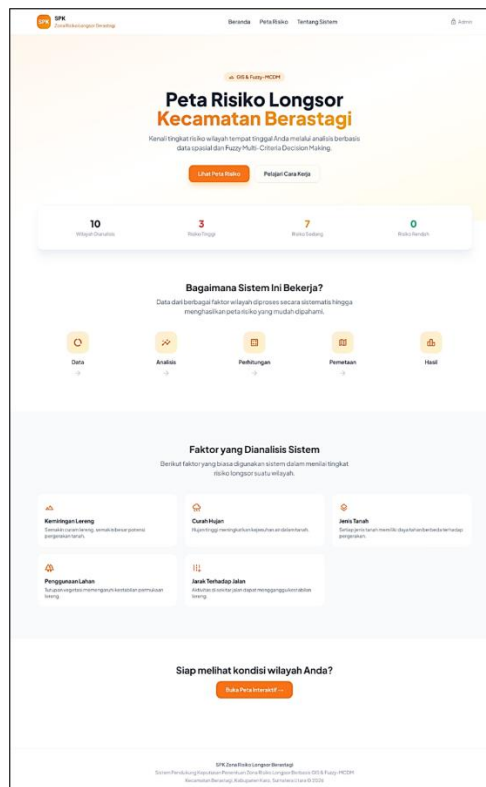
Gambar 14. Halaman peta risiko

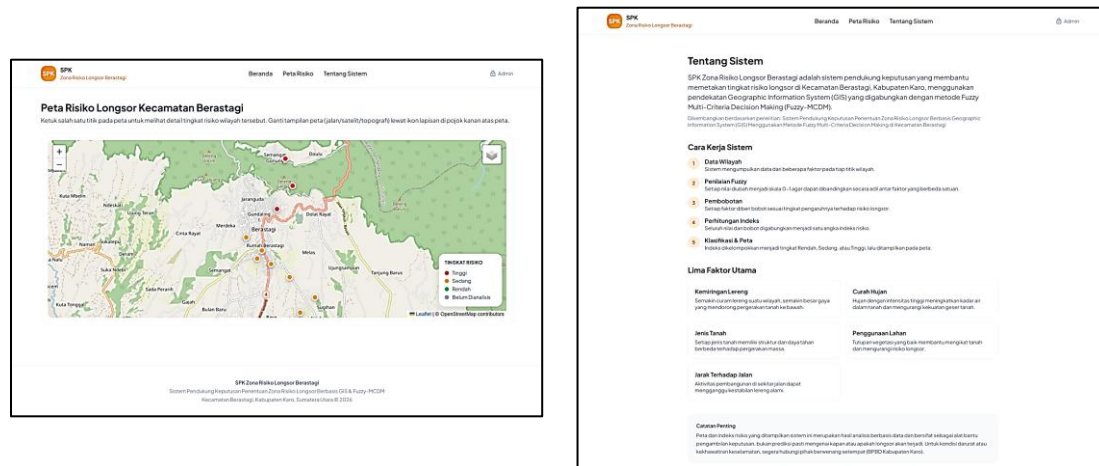


Gambar 15. Halaman pusat laporan



Gambar 16. Halaman akun, pengaturan umum, dan update sistem





Gambar 17. Halaman publik untuk masyarakat umum

Pengujian black box

Tabel 12. Hasil pengujian black box

No.	Fungsi	Hasil yang diharapkan	Hasil aktual
1	Wizard instalasi	11 tabel terbentuk, lanjut ke langkah berikutnya	Berhasil
2	Login admin	Pengalihan ke dashboard (HTTP 302), sesi tersimpan	Berhasil
3	Analisis Fuzzy-MCDM	3 tinggi dan 7 sedang, identik dengan perhitungan manual	Berhasil
4	Validasi total bobot	Tombol analisis nonaktif dan pesan peringatan bila total $\neq 100\%$	Berhasil
5	Peta multi-lapisan	Elemen kontrol lapisan ada pada keluaran halaman	Berhasil
6	Popup detail lokasi	JSON berisi indeks, kelas, dan rincian kontribusi	Berhasil
7	Widget koordinat	Tiga elemen metode ada pada formulir	Berhasil
8	Ganti kata sandi	Kata sandi baru dapat dipakai login (HTTP 302)	Berhasil
9	Keamanan endpoint tautan	URL dari domain di luar Google ditolak	Berhasil
10	Backup basis data	Berkas cadangan berisi 11 tabel terbentuk	Berhasil
11	Akses 15 halaman admin	Seluruh halaman merespons HTTP 200 tanpa galat fatal	Berhasil (15/15)

Seluruh 11 skenario berhasil. Hasil indeks dari sistem identik dengan perhitungan manual pada 10 titik sehingga proses fuzzifikasi, pembobotan, dan klasifikasi dapat ditelusuri secara matematis. Skenario 5 dan 7 diperiksa melalui keberadaan elemen pada keluaran HTML, bukan melalui interaksi penuh di peramban.

Pembahasan

Sebaran Risiko

Tiga titik zona tinggi (P09, P03, dan P04) memiliki kombinasi lereng 31–48%, curah hujan 2.700–2.800 mm/tahun, dan tanah Regosol atau Andosol. Dua titik teratas berada di Desa Doulu dan sekitarnya. Hal ini searah dengan Sari dkk. (2021) yang menemukan konsentrasi kerawanan tertinggi di Desa Doulu (17,40%). Kesesuaian ini bersifat kualitatif dan belum merupakan validasi, karena kedua penelitian memakai data dan skala yang berbeda. Tidak adanya titik zona rendah dalam sampel perlu dibaca hati-hati. Sampel 10 titik berasal dari BPBD dan kemungkinan memang berfokus pada lokasi yang diperhatikan instansi, sehingga proporsi 30% dan 70% tidak dapat digeneralisasi ke seluruh kecamatan.

Peran kriteria

Kemiringan lereng menyumbang 35,0% dari rata-rata indeks dan menjadi faktor dominan pada 8 titik. Hasil ini tidak dapat dibaca sebagai bukti empiris bahwa lereng paling berpengaruh, karena bobot 0,30 diberikan sebagai nilai awal dan turut membentuk dominasi tersebut. Pilihan bobot ini konsisten dengan literatur. Zighmi dkk. (2025) memberi bobot AHP tertinggi pada kemiringan lereng (0,23) dan presipitasi (0,18). Rahman dkk. (2025) memperoleh bobot kemiringan 24,2% (tertinggi) dan curah hujan 11,7%. Borinsky dan Idarwati (2026) memperoleh bobot lereng dan curah hujan masing-masing 29,86%. Namun hasil analisis sensitivitas (Tabel 11) menunjukkan bahwa jumlah titik zona tinggi berubah dari 1 sampai 4 menurut bobot. Penelitian lanjutan perlu menurunkan bobot dari pendapat ahli (misalnya AHP atau fuzzy AHP) atau kalibrasi dengan inventaris longsor.

Manfaat pendekatan fuzzy

Pada klasifikasi tegas, lereng 24% (agak curam) dan 26% (curam) jatuh pada kelas berbeda, padahal kondisinya hampir sama. Dengan fuzzifikasi linear, keduanya bernilai 0,60 dan 0,65 sehingga perubahan indeks bersifat bertahap. Temuan Abdi dkk. (2021) dan Tavakolifar dkk. (2023) bahwa pendekatan fuzzy memberi akurasi prediksi yang baik mendukung pilihan ini. Namun Saygin dkk. (2023) mengingatkan bahwa kelas kerawanan tinggi bisa sulit diprediksi, sehingga validasi tetap diperlukan.

Sifat agregasi

Titik P09 menjadi yang tertinggi (0,7198) walaupun kontribusi jarak jalannya nol (650 m dari jalan). Sebaliknya, P06 yang hanya 15 m dari jalan dan berada di permukiman padat hanya mencapai 0,3902 karena lerengnya landai (12%) dan hujannya rendah. Ini menunjukkan model bersifat kompensatif. Kondisi fisik lereng dan hujan dapat mengalahkan faktor antropogenik. Hasil ini sejalan dengan catatan Hamdani dkk. (2025) bahwa kejadian longsor tidak selalu dekat jalan. Indeks pada penelitian ini terutama mengagregasi faktor pengontrol dan pemicu lereng, dengan penggunaan lahan dan jarak jalan sebagai proksi tekanan aktivitas manusia. Kerentanan sosial dan elemen terpapar belum dimodelkan secara eksplisit.

Sistem sebagai SPK

Arsitektur PHP, MySQL, dan Leaflet.js pada penelitian ini sama dengan SPK WebGIS yang dilaporkan Kosasih dan Rizky (2026) dan Farhan dan Azis (2026), sehingga mudah diadopsi di lingkungan serupa. Perbedaannya adalah metode Fuzzy-MCDM, struktur EAV yang membuat kriteria dinamis, transparansi rincian kontribusi tiap kriteria, serta pemasangan dan pembaruan mandiri melalui wizard dan *Update Manager*. Fitur ini menjawab hambatan adopsi SPK spasial berupa keterbatasan kepercayaan, keahlian teknis, dan sumber daya (Wen dan Li, 2023). Pola EAV memberi fleksibilitas skema (Nadkarni dkk., 1999), tetapi kueri pada struktur ini cenderung lebih kompleks sehingga kinerja pada data besar perlu diuji.

Keterbatasan

Pertama, data hanya 10 titik sehingga sistem baru diuji sebagai prototipe. Kedua, nilai fuzzy jenis tanah dan penggunaan lahan serta seluruh bobot merupakan nilai awal yang belum divalidasi ahli. Ketiga, sistem menyediakan modul perbandingan dengan data kejadian longsor, tetapi akurasi statistik formal seperti AUC/ROC belum dihitung pada penelitian ini, berbeda dengan Hastuty dkk. (2026) yang memvalidasi pada 71 titik inventaris. Keempat, pengujian *black box* dilakukan otomatis dan belum mencakup interaksi pengguna pada peramban sungguhan. Kelima, sistem masih bergantung pada CDN eksternal, hanya memiliki satu peran pengguna, mencetak laporan melalui fungsi cetak peramban, dan fitur ganti kata sandi belum meminta kata sandi lama.

KESIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan SPK berbasis GIS dengan Fuzzy-MCDM untuk menentukan zona risiko longsor di Kecamatan Berastagi. Dari 10 titik data BPBD Kabupaten Karo, 3 titik (30%) berada pada zona tinggi, yaitu Lereng Doulu (0,7198), Doulu (0,6971), dan Jaranguda (0,6761), serta 7 titik (70%) pada zona sedang. Kemiringan lereng menjadi kontributor terbesar (35,0% dari rata-rata indeks), diikuti jenis tanah (19,8%) dan curah hujan (16,7%). Dominasi ini dipengaruhi bobot awal yang ditetapkan, dan analisis sensitivitas menunjukkan jumlah titik zona tinggi berkisar 1–4 pada skenario bobot alternatif. Sistem WebGIS yang dibangun dengan PHP 8.1, MySQL, dan Leaflet.js berfungsi sesuai rancangan pada 11 skenario *black box* dan menyajikan peta zonasi, pemeringkatan, rincian kontribusi kriteria, serta laporan yang dapat dipasang dan diperbarui mandiri.

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah (1) memperluas data ke seluruh kecamatan melalui pengolahan raster DEM dan CHIRPS; (2) menurunkan bobot dan nilai fuzzy kategori dari pendapat ahli geologi atau geoteknik; (3) menghitung metrik validasi seperti AUC/ROC dengan inventaris longsor historis yang lebih banyak; (4) menambahkan faktor kerentanan dan keterpaparan; serta (5) menambahkan peran pengguna berjenjang, pembuatan PDF di sisi server, aset lokal tanpa CDN, dan verifikasi kata sandi lama pada pergantian kata sandi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Karo atas data yang diberikan dan kepada Fakultas Ilmu Komputer dan Teknologi Informasi, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, atas dukungan selama penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdi, A., Bouamrane, A., Karech, T., Dahri, N., & Kaouachi, A. (2021). Landslide susceptibility mapping using GIS-based fuzzy logic and the analytical hierarchical processes approach: A case study in Constantine (North-East Algeria). *Geotechnical and Geological Engineering*, 39, 5675–5691. <https://doi.org/10.1007/s10706-021-01855-3>
- Alshamaa, Z. M., & Saleem, N. N. (2025). Black box software testing techniques: A literature review. *Passer Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(2), 1001–1011. <https://doi.org/10.24271/psr.2025.508216.1963>
- Borinsky, A. D., & Idarwati. (2026). Analisis zona rawan bencana tanah longsor metode Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP). Studi kasus: Daerah Bukit Bual dan sekitarnya, Kabupaten Sijunjung dan Kota Sawahlunto, Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(4), 2487–2491. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v6i4.1411>
- Damayanti, F., Sabri, L. M., & Wahyuddin, Y. (2023). Implementasi sistem informasi geografis untuk identifikasi daerah rawan tanah longsor (Studi kasus: Kapanewon Dlingo dan Kapanewon Imogiri, Kabupaten Bantul). *Jurnal Geodesi Undip*, 12(2), 101–110. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2023.38044>
- Farhan, M., & Azis, Z. (2026). Sistem pendukung keputusan penentuan lokasi kolam retensi berbasis AHP dan GIS di Kota Medan. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Scientific Studies*, 4(6), 373–379. <https://doi.org/10.33151/ijomss.v4i6.1123>
- Hamdani, A. J., Rahmawati, Z. Y., Priyana, P. E., Zen, R. F., Suhartono, M. A. T. S. P., Mandiri, A. P., Puspita, S. M., Fitriawan, M. B., Ahsan, N. F., Setiawan, F. H., & Hanif, M. H. A. (2025). Analisis kerawanan longsor dengan metode Analytical Hierarchy Process dan Information Value di Kecamatan Lembang–Kabupaten Bandung Barat. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 23(5), 1253–1268. <https://doi.org/10.14710/jil.23.5.1253-1268>
- Hastuty, I. P., Mulia, A. P., Roesyanto, & Ahmad, F. (2026). Geospatial modeling-based assessment of landslide hazards along the Medan–Berastagi Route, North Sumatra. *Journal of Asian Scientific Research*, 16(1), 57–78. <https://doi.org/10.55493/5003.v16i1.5864>
- Kosasih, A. O., & Rizky, F. (2026). Sistem pendukung keputusan evaluasi kualitas udara Kota Binjai menggunakan Analytic Network Process dan Geostatistical Analysis. *Indonesian Journal of Multidisciplinary Scientific Studies*, 4(5), 249–265. <https://doi.org/10.33151/ijomss.v4i5.1109>
- Mahmuda, R., Matondang, M. F. G., & Restu. (2026). Mapping landslide-risk zones and evacuation routes using network analysis in Karo Regency. *Jurnal Spatial: Wahana Komunikasi dan Informasi Geografi*, 26(1), 20–32. <https://doi.org/10.21009/spatial.261.003>
- Mao, Y., Li, Y., Teng, F., Sabonchi, A. K. S., Azarafza, M., & Zhang, M. (2024). Utilizing hybrid machine learning and soft computing techniques for landslide susceptibility mapping in a drainage basin. *Water*, 16(3), 380. <https://doi.org/10.3390/w16030380>
- Nadkarni, P. M., Marenco, L., Chen, R., Skoufos, E., Shepherd, G., & Miller, P. (1999). Organization of heterogeneous scientific data using the EAV/CR representation. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 6(6), 478–493. <https://doi.org/10.1136/jamia.1999.0060478>
- Rahman, M. M., Joy, M. F. R., Ahmed, A., Tabassum, A., Sarker, M. S., dkk. (2025). Comparative multi-criteria decision-making approaches for landslide susceptibility mapping in Khagrachhari district of southeastern Bangladesh. *Discover Geoscience*, 3, Article 237. <https://doi.org/10.1007/s44288-025-00346-9>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.03.001>
- Rivera, C. A., Valqui-Reina, S. V., García-Naranjo, L. F., Ocaña-Zúñiga, C. L., Auquiñivin-Silva, E. A., Chapa-Gonzalez, S. R., Cieza-Tarrillo, D., Vergara, C. G., & Vergara, A. J. (2025). Geospatial

- landslide risk mapping using AHP and GIS: A case study of the Utcubamba River Basin, Peru. *Applied Sciences*, 15(17), 9423. <https://doi.org/10.3390/app15179423>
- Sari, D. P., Simanungkalit, N. M., & Novira, N. (2021). Landslide susceptibility mapping in Berastagi District Karo Regency based on Geographic Information Systems. *Tunas Geografi*, 10(1), 9–20. <https://doi.org/10.24114/tgeo.v10i1.27902>
- Saygin, F., Şişman, Y., Dengiz, O., & Şişman, A. (2023). Spatial assessment of landslide susceptibility mapping generated by fuzzy-AHP and decision tree approaches. *Advances in Space Research*, 71(12), 5218–5235. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.01.057>
- Sur, U., Singh, P., & Meena, S. R. (2020). Landslide susceptibility assessment in a lesser Himalayan road corridor (India) applying fuzzy AHP technique and earth-observation data. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1), 2176–2209. <https://doi.org/10.1080/19475705.2020.1836038>
- Tavakolifar, R., Shahabi, H., Alizadeh, M., Bateni, S. M., Hashim, M., Shirzadi, A., Ariffin, E. H., Wolf, I. D., & Chaeikar, S. S. (2023). Spatial prediction of landslides using hybrid multi-criteria decision-making methods: A case study of the Saqqez–Marivan mountain road in Iran. *Land*, 12(6), 1151. <https://doi.org/10.3390/land12061151>
- Vinueza-Martinez, J., Correa-Peralta, M., Ramirez-Anormaliza, R., Franco Arias, O., & Vera Paredes, D. (2024). Geographic Information Systems (GISs) based on WebGIS architecture: Bibliometric analysis of the current status and research trends. *Sustainability*, 16(15), 6439. <https://doi.org/10.3390/su16156439>
- Wen, R., & Li, S. (2023). Spatial decision support systems with automated machine learning: A review. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(1), 12. <https://doi.org/10.3390/ijgi12010012>
- Zighmi, K., Zahri, F., Faqeih, K., Al Amri, A., Riheb, H., Alamri, S. M., & Alamery, E. (2025). AHP multi criteria analysis for landslide susceptibility mapping in the Tellian Atlas chain. *Scientific Reports*, 15, Article 25747. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-10819-z>
- Zulfahmi, Z., Putra, M. H. Z., Sarah, D., Tohari, A., Madiutomo, N., Hartanto, P., & Damayanti, R. (2025). GIS-based landslide susceptibility mapping with a blended ensemble model and key influencing factors in Sentani, Papua, Indonesia. *Geosciences*, 15(10), 390. <https://doi.org/10.3390/geosciences15100390>