



Evaluasi Pemetaan Risiko Multi Bencana di Kabupaten Karo Berdasarkan Perka BNPB 2012 dan Modul Teknis KRB 2019 Menggunakan *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA)

(Evaluation of Multi-Disaster Risk Mapping in Karo Regency based on the 2012 BNPB Regulation and the 2019 KRB Technical Module Using Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA))

Michael Ariel Brema Pinem, Purnama Budi Santosa, Yulaikhah

Departemen Teknik Geodesi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Penulis Korespondensi: Purnama Budi Santosa | **Email:** purnamabs@mail.ugm.ac.id

Diterima (Received): 02/Feb/2026 Direvisi (Revised): 28/Apr/2026 Diterima untuk Publikasi (Accepted): 06/May/2026

ABSTRAK

Kabupaten Karo terletak pada zona subduksi aktif dan beriklim tropis ekstrem, sehingga rawan terhadap bencana seperti letusan gunung api, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor. Untuk mendukung penanggulangan bencana, penelitian ini memetakan risiko multi bencana berdasarkan dua acuan yaitu Peraturan Kepala (Perka) Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) No. 2 tahun 2012 dan Modul Teknis Penyusunan Kawasan Rawan Bencana (KRB) BNPB tahun 2019. Risiko dihitung dari komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas dengan metode *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA). Perbedaan hasil pemetaan berdasarkan kedua acuan dievaluasi dari luas dan/atau kelas indeks yang diperoleh. Ancaman bencana di Kabupaten Karo bervariasi dari kelas rendah hingga tinggi. Kerentanan dan kapasitas didominasi kelas sedang, sehingga risiko bencana tunggal sebagian besar berada pada kelas rendah hingga sedang. Indeks risiko multi bencana berada pada rentang 0,097 hingga 0,551 untuk metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan 0 hingga 0,466 untuk metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019. Jumlah bencana yang berisiko lebih memengaruhi indeks risiko multi bencana dibandingkan besarnya indeks risiko tunggal. Perbandingan hasil menunjukkan bahwa metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012 menghasilkan cakupan wilayah lebih luas yang serupa dengan area ancaman, sedangkan metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 lebih terbatas karena mempertimbangkan wilayah kerentanan. Perbedaan hasil kedua acuan dipengaruhi oleh jenis data, seleksi daerah kerentanan, serta metode pengolahan data.

Kata Kunci: Multi risiko, letusan gunung api, gempa bumi, banjir, tanah longsor, MCDA

ABSTRACT

Karo Regency is located in an active subduction zone and experiences an extreme tropical climate, making it highly vulnerable to disasters such as volcanic eruptions, earthquakes, floods, and landslides. To support disaster mitigation, this study maps multi-hazard risk based on two references: BNPB Regulation No. 2 of 2012 and the 2019 Technical Module for Disaster Risk Mapping by BNPB. The risk index is calculated using the components of hazard, vulnerability, and capacity through the *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) method. Differences in mapping results based on the two references are evaluated by comparing area coverage and/or index classes. Hazard levels in Karo Regency vary from low to high. Vulnerability and capacity are predominantly in the medium class, resulting in most single-hazard risks being in the low to medium class. The multi-hazard risk index ranges from 0,097 to 0,551 using BNPB Regulation No. 2 of 2012 and from 0 to 0,466 using the 2019 Technical Module for Disaster Risk Mapping. The number of hazards affecting an area influences the multi-hazard risk index more significantly than the magnitude of individual hazard risk. The BNPB Regulation No. 2 of 2012 methods produce broader risk coverage resembling the hazard extent, while the 2019 Technical Module for Disaster Risk Mapping methods provide more limited coverage by considering only areas of vulnerability. The differences in results between the two methods are influenced by the type of data used, the selection of vulnerable areas, and the data processing methods applied.

Keywords: Multi risk, volcano eruption, earthquake, flood, landslide, MCDA

1. Pendahuluan

Kabupaten Karo terletak di bagian utara Pulau Sumatra, dalam zona subduksi aktif Lempeng Sumatra yang dikenal sebagai salah satu zona paling aktif di Indonesia (Prayoga dkk., 2019). Dengan karakteristik geografis berupa dataran tinggi beriklim tropis, wilayah ini kerap mengalami perubahan ekstrem pada curah hujan dan angin sepanjang tahun, sehingga rentan terhadap bencana geologi maupun hidrometeorologi seperti letusan gunung api, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor. Aktivitas Gunung Api Sinabung yang tergolong aktif tipe A sejak erupsi 2010 telah menambah kompleksitas risiko bencana di Kabupaten Karo. Pengamatan deformasi permukaan menunjukkan pergerakan antara 2,46 hingga 4,61 cm per tahun (Hanif dkk., 2024), sementara data BNPB mencatat 16 kejadian gempa dan 32 letusan gunung api sejak tahun 2018 s.d. 2023. Bencana hidrometeorologi juga sering terjadi; sejak tahun 2018, tercatat 39 desa terdampak banjir (BPS Kabupaten Karo) dan peristiwa tanah longsor di Desa Semangat Gunung bahkan menelan 10 korban jiwa (Rahyuni, 2024).

Kondisi tersebut menunjukkan keterkaitan antara berbagai jenis bencana. Aktivitas letusan Sinabung, misalnya, dapat memicu gempa bumi dan tanah longsor (Saputra dkk., 2021), sehingga diperlukan pendekatan risiko multi bencana untuk memahami interaksi tersebut secara komprehensif (Andaru & Santosa, 2017a; Andaru & Santosa, 2017b). Risiko multi bencana lebih dipengaruhi oleh jumlah jenis bencana yang terjadi dibandingkan hanya mempertimbangkan satu jenis ancaman (Gallina dkk., 2016; Gacu dkk., 2025;). Dalam konteks ini, pemetaan risiko tidak hanya menggambarkan potensi kerugian, tetapi juga mendukung upaya pengurangan risiko (Pratiwi & Santosa, 2021) sebagaimana diamanatkan dalam UU No. 24 tahun 2007 dan dijelaskan dalam pedoman teknis seperti Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 (BNPB, 2012).

Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Karo pernah melakukan pemetaan risiko bencana pada tahun 2017, menghasilkan peta KRB 2018 yang berlaku hingga tahun 2022. Namun demikian, dokumen tersebut disusun dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 yang belum mengadopsi metode *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA) dan belum menjabarkan detail seperti zona lontaran dan zona landaan dalam penilaian ancaman letusan gunung api (BNPB, 2019a). Kajian risiko saat itu menunjukkan dominasi kelas sedang dan tinggi pada komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas (Hermon dkk., 2019; Heo dkk., 2024; Qarinur dkk., 2024). Namun demikian, indeks risiko bencana tunggal kelas tinggi tidak selalu menghasilkan indeks risiko multi bencana yang tinggi, karena metode agregasi memengaruhi klasifikasinya.

Sebagian besar penelitian di Indonesia masih berfokus pada pemetaan risiko berdasarkan jenis ancaman tunggal, belum menggambarkan potensi interaksi antar bencana

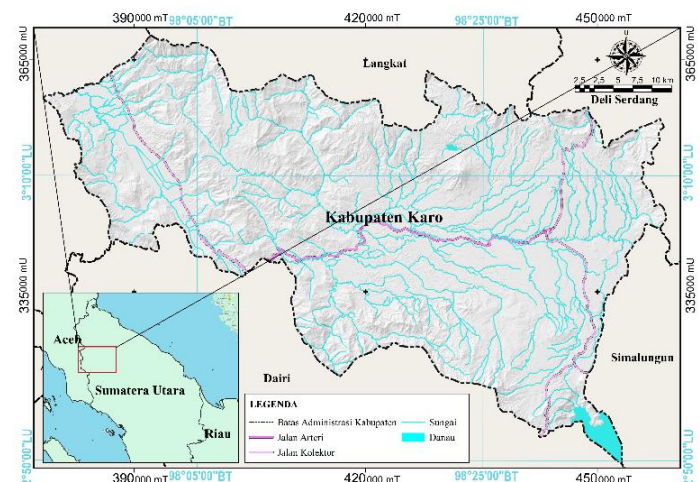
secara menyeluruh (Saputra dkk., 2021; Mustikaningrum dkk., 2023). Dalam pendekatan multi bencana, bobot diberikan secara proporsional dengan total nilai bobot akhir sama dengan satu (Pratiwi dkk., 2016), dan keempat bencana utama menurut BNPB diberi bobot setara (BNPB, 2012).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan risiko multi bencana di Kabupaten Karo dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019, mencakup empat jenis bencana: letusan gunung api, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor. Mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Pinem (2025), penelitian ini menghitung indeks ancaman, kerentanan, kapasitas, serta menyusun peta risiko multi bencana dan mengevaluasi perbedaan hasil masing-masing acuan. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar penyusunan kebijakan penanggulangan bencana dan peningkatan kesiapsiagaan di Kabupaten Karo.

2. Data dan Metodologi

2.1. Data dan Lokasi

Penelitian ini dilakukan di Kabupaten Karo, Provinsi Sumatera Utara yang terletak pada batas geografis 2° 50' s.d. 3° 19' Lintang Utara dan 97° 55' s.d. 98° 38' Bujur Timur. Kabupaten Karo dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta Batas Administrasi Kabupaten Karo (Badan Informasi Geospasial dan Google Maps)

Data penelitian ini berupa data sekunder dari beberapa instansi nasional maupun daerah. Data tersebut memiliki format vektor dan raster dengan sistem proyeksi *Universal Transverse Mercator* (UTM) zona 47U serta format tabular.

2.2. Metodologi

Tahapan pemetaan risiko multi bencana di Kabupaten Karo mulai dari tahapan persiapan hingga output yang dihasilkan dari kegiatan penelitian yang disajikan pada Gambar 2 dalam bentuk diagram alir. Penjelasan lebih rinci terkait tahapan penelitian disajikan melalui uraian berikut.

2.2.1 Pengumpulan Data

Data diperoleh dari berbagai sumber seperti Inageoportal, BPBD Kabupaten Karo, Dinas Sosial Kabupaten Karo, Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), hingga BNPB. Parameter, pembobotan, dan klasifikasinya merujuk pada Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019.

Ancaman bencana letusan Gunung Api Sinabung, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor berdasarkan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 didapatkan dengan klasifikasi pada peta yang dikeluarkan oleh instansi terkait. Di sisi lain, pemetaan ancaman bencana berdasarkan acuan Modul

Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menggunakan pengolahan dari beberapa data masukan.

Peta yang mendasari ancaman bencana yang sudah dimodifikasi oleh peneliti disajikan dalam Gambar 3. Ancaman bencana banjir mengacu pada indeks ancaman bencana banjir hasil pemetaan InaRisk BNPB, juga disajikan pada Gambar 3.

Berbeda dengan parameter ancaman bencana, parameter kerentanan dan kapasitas menggunakan data tabular yang sama dalam kedua acuan. Daftar data penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 Data penelitian

No	Data	Format	Sumber
1	Data batas administrasi Kabupaten Karo tahun 2023 skala 1: 50.000	shp	Inageoportal (https://tanahair.indonesia.go.id/)
2	<i>Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)</i> resolusi 30 m	tif	United State Geological Survey (USGS) (https://earthexplorer.usgs.gov/)
3	DEM nasional resolusi 10 m	tif	Inageoportal
4	Peta KRB Gunung Sinabung tahun 2015 skala 1: 50.000	jpg	PVMBG
5	Data <i>Peak Ground Acceleration (PGA)</i> di batuan dasar Kabupaten Karo tahun 2017 skala 1:50.000	shp	InaRisk BNPB
6	Data Daerah Aliran Sungai (DAS) tahun 2021 skala 1: 50.000	shp	InaRisk BNPB
7	Data sungai Kabupaten Karo tahun 2022 skala 1: 50.000	shp	Inageoportal
8	Data Zona Kerentanan Gerakan Tanah (ZKGT) Kabupaten Karo tahun 2021 skala 1: 50.000	shp	PVMBG
9	Data sebaran permukiman Kabupaten Karo tahun 2022 skala 1: 50.000	shp	Inageoportal
10	Data tutupan lahan Kabupaten Karo tahun 2022 skala 1: 50.000	shp	Inageoportal
11	Data Penyandang Masalah Kesejahteraan Sosial (PMKS) Kabupaten Karo tahun 2024	csv	Dinas Sosial Kabupaten Karo
12	Buku Kabupaten Karo dalam angka tahun 2025	pdf	Badan Pusat Statistika Kabupaten Karo
13	Data Indeks Ketahanan Daerah (IKD) Kabupaten Karo tahun 2024	csv	BPBD Kabupaten Karo
14	Data Indeks Kesiapsiagaan Masyarakat (IKM) Kabupaten Karo tahun 2024	csv	InaRisk BNPB

2.2.2 Pemetaan ancaman

Pemetaan ancaman dilakukan dengan data dan metode yang berbeda berdasarkan kedua acuan yang digunakan. Klasifikasi ancaman dari peta yang dihasilkan instansi sesuai acuan Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 menghasilkan indeks ancaman bencana yang diskrit. Sebaliknya, pemetaan ancaman bencana berdasarkan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB Tahun 2019 menghasilkan indeks ancaman yang kontinu dalam rentang nilai 0 (nol) hingga 1 (satu), sehingga klasifikasi ancaman dilakukan seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Klasifikasi ancaman bencana (BNPB, 2019a)

Indeks Ancaman (H)	Kelas Ancaman
$H \leq 0,33$	Rendah
$0,33 < H \leq 0,66$	Sedang
$H > 0,66$	Tinggi

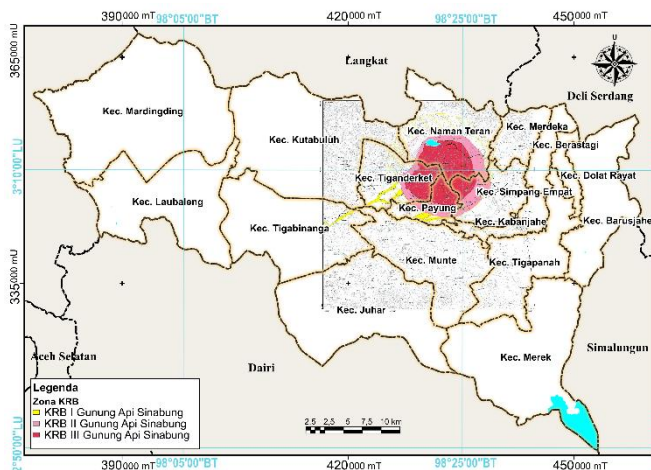
a. Ancaman bencana letusan Gunung Api Sinabung

Pemetaan ancaman bencana letusan gunung api berdasarkan acuan Perka BNPB No. 2 Tahun 2012 dilakukan dengan klasifikasi terhadap zona KRB gunung api seperti pada Tabel 3. Modul Teknis KRB BNPB Tahun 2019 menambahkan parameter zona lontaran, yang didapat dari batas radius zona landaan KRB, dalam perhitungan indeks ancaman. Bobot masing-masing zona landaan dan lontaran diatur seperti pada Tabel 4. Indeks ancaman bencana letusan gunung api dihitung dengan persamaan berikut (BNPB, 2019c).

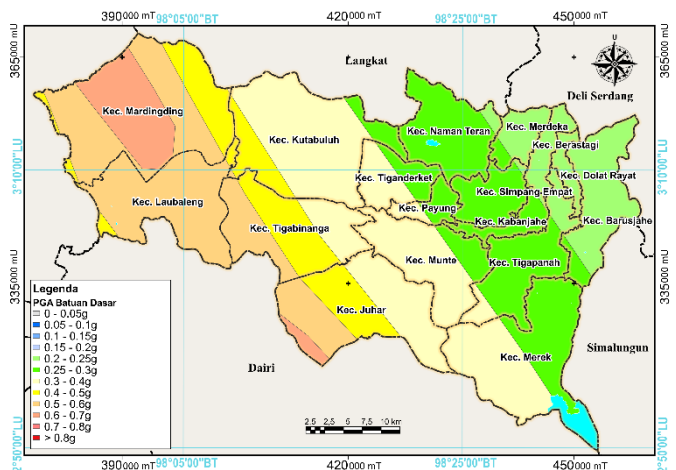
$$H_v = \frac{Z_i + Z_j}{100} \quad (1)$$

Keterangan:

H_v : indeks ancaman bencana letusan gunung api
 Z_i : bobot zona landaan KRB gunung api
 Z_j : bobot zona lontaran KRB gunung api



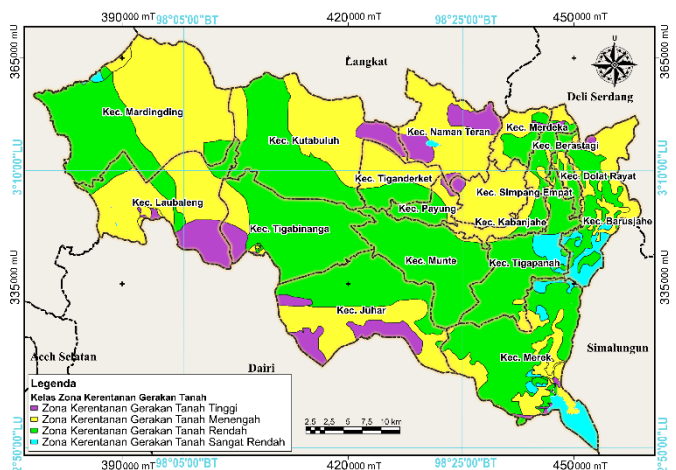
(a) KRB Gunung Sinabung (PVMBG dan hasil pengolahan oleh peneliti)



(b) PGA di batuan dasar Kabupaten Karo (InaRisk BNPB dan hasil pengolahan oleh peneliti)



(c) Ancaman bencana banjir Kabupaten Karo (InaRisk BNPB dan hasil pengolahan oleh peneliti)



(d) ZKGT Kabupaten Karo (PVMBG dan hasil pengolahan oleh peneliti)

Gambar 3 Peta dasar klasifikasi ancaman bencana dengan acuan Perka BNPB No. 2 Tahun 2012

Tabel 3 Klasifikasi ancaman letusan gunung api (BNPB, 2012)

Kawasan Rawan Bencana	Indeks Ancaman
I	0,33
II	0,66
III	1

Tabel 4 Pembobotan parameter ancaman bencana letusan gunung api (BNPB, 2019c)

Parameter	Kawasan Rawan Bencana	Bobot
Zona landaan	I	20
	II	35
	III	60
Zona lontaran	I	10
	II	25
	III	40

b. Ancaman bencana gempa bumi

Pemetaan ancaman bencana gempa bumi dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dilakukan dengan klasifikasi terhadap nilai PGA di batuan dasar seperti pada Tabel 5. Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menambahkan parameter *Ground Amplification Factor* (GAF), yang dikalikan dengan nilai PGA di batuan dasar untuk mendapatkan PGA di permukaan. Nilai PGA di permukaan diklasifikasikan seperti pada Tabel 5 untuk mendapatkan indeks ancaman bencana gempa bumi. Nilai GAF diperoleh dari konversi nilai *Average Shear-wave Velocity in the upper 30m* (VS30) hasil klasifikasi geomorfologi DEM. Konversi nilai VS30 dan perhitungan nilai PGA di permukaan dilakukan dengan persamaan (2) dan (3) (BNPB, 2019b).

$$\text{Log}(G) = 1,35 - 0,47 \log \text{VS30} \pm 0,18 \quad (2)$$

$$\text{PGA permukaan} = \text{GAF} * \text{PGA batuan dasar} \quad (3)$$

Keterangan :

G : nilai GAF

VS30 : *Average Shear-wave Velocity in the upper 30m*

Tabel 5 Klasifikasi ancaman gempa bumi (BNPB, 2012)

Nilai PGA	Indeks Ancaman
< 0,26	0,33
0,26 s.d. 0,70	0,66
>0,70	1

c. Ancaman bencana banjir

Ancaman bencana banjir berdasarkan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 didapatkan dari indeks ancaman banjir oleh InaRisk BNPB. Hal ini dikarenakan kesulitan dalam perolehan Peta Area Rawan Banjir di Kabupaten Karo. Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menggunakan parameter kedalaman sungai dan beda tinggi dengan aliran sungai terdekat untuk hitungan ketinggian genangan. Kedua parameter didapatkan dengan *plugin Geomorphic Flood Analysis (GFA)* dengan data masukan DEM *pit-filled*, *flow direction*, dan *flow accumulation* hasil *plugin* TauDEM. Ketinggian genangan diklasifikasikan seperti pada Tabel 6 untuk mendapatkan indeks ancaman bencana banjir. Perhitungan ketinggian genangan dilakukan pada area potensi banjir dengan persamaan (4) (BNPB, 2019a).

$$W_d = h_r - \Delta H \quad (4)$$

Keterangan:

W_d : ketinggian genangan

h_r : kedalaman sungai

ΔH : beda tinggi dengan aliran sungai terdekat

Tabel 6 Klasifikasi ancaman banjir (BNPB, 2012)

Ketinggian Genangan (m)	Indeks Ancaman
$W_d \leq 0,75$	0,33
$0,75 \leq W_d \leq 1,5$	0,66
$W_d > 1,5$	1

d. Ancaman bencana tanah longsor

Pemetaan ancaman bencana tanah longsor dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dilakukan dengan klasifikasi terhadap kelas Zona Kerentanan Gerakan Tanah (ZKGT) seperti pada Tabel 7. Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menyeleksi daerah ZKGT dengan kelerengan > 15% untuk mendapatkan zona potensi longsor dan kelerengan > 45% untuk mendapatkan daerah sumber longsor. Daerah sumber longsor digunakan sebagai parameter masukan dalam perhitungan zona potensi *runout* dengan *plugin* TauDEM. Zona *runout*, yang

merupakan jalur yang dilewati material longsor, digunakan untuk mendapatkan indeks ancaman bencana tanah longsor dengan persamaan (5) (BNPB, 2019d).

$$H_l = 0,4 * Z_l - 0,6 * Z_r \quad (5)$$

Keterangan :

H_l : indeks ancaman bencana tanah longsor

Z_l : indeks zona potensi longsor

Z_r : indeks zona potensi *runout*

Tabel 7 Klasifikasi ancaman tanah longsor (BNPB, 2012)

Kelas ZKGT	Indeks Ancaman
Sangat Rendah, Rendah	0,33
Menengah	0,66
Tinggi	1

2.2.3 Pemetaan kerentanan

Kerentanan terdiri atas kerentanan sosial, fisik, ekonomi, dan lingkungan yang memiliki parameter penyusun masing-masing. Klasifikasi dan pembobotan seluruh parameter dilakukan sesuai Tabel 6 (BNPB, 2012). Penelitian ini menggunakan beberapa parameter kerentanan yang berbeda dengan acuan, sehingga dibutuhkan metode klasifikasi yang berbeda. Metode klasifikasi dipilih dengan uji *Goodness of Variance Fit (GVF)* dengan persamaan (6) s.d. (8) (Cauvin dkk., 2010).

$$\text{GVF} = \frac{\text{SDAM} - \text{SCDM}}{\text{SDAM}} \quad (6)$$

$$\text{SDAM} = \sum (X_i - X_{\text{rata-rata}})^2 \quad (7)$$

$$\text{SCDM} = \sum (X_i - X_{\text{rata-rata kelas}})^2 \quad (8)$$

Keterangan:

GVF : *Goodness of Variance Fit*

SDAM : nilai varian antar kelas

SCADM : nilai varian setiap kelas

Pemetaan kerentanan dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 menghitung indeks kerentanan secara diskrit berdasarkan administrasi kecamatan, sedangkan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 memperkenalkan metode pengolahan data raster serta seleksi berdasarkan daerah ancaman sehingga nilai parameter kerentanan berbeda untuk setiap bencana.

Kerentanan bencana dihitung dengan seluruh komponen dengan bobotnya untuk setiap bencana dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012. Komponen kerentanan bencana dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 memiliki klasifikasi berbeda-beda tergantung jenis bencana. Indeks kerentanan dihasilkan dari penjumlahan nilai seluruh komponen hasil keanggotaan *fuzzy*, yang kemudian dinormalisasi dengan fungsi *fuzzy linear* dengan batas bawah 0 dan batas atas 0,4.

Tabel 8 Klasifikasi dan pembobotan parameter kerentanan (BNPB, 2012)

Komponen Kerentanan	Bobot Komponen (%)	Parameter	Bobot Parameter (%)	Kelas Kerentanan		
				Rendah	Sedang	Tinggi
Sosial	40 ^{a,b,c,d}	Kepadatan penduduk	60	< 5 jiwa/ha	5 s.d. 10 jiwa/ha	> 10 jiwa/ha
		Rasio jenis kelamin	10	> 40%	20 s.d. 40%	< 20%
		Rasio penduduk miskin	10	< 20%	20 s.d. 40%	> 40%
		Rasio penduduk cacat	10	< 20%	20 s.d. 40%	> 40%
		Rasio umur rentan	10	< 20%	20 s.d. 40%	> 40%
Fisik	25 ^{a,c,d} , 30 ^b	Jumlah rumah	40	< 7,743	7,743 s.d. 12,886	> 12,886
		Jumlah fasilitas umum	30	< 83	83 s.d. 139	> 139
		Jumlah fasilitas kritis	30	0	1	2
		Kontribusi PDRB	40	< 455 miliar rupiah	455 s.d. 1,506 miliar rupiah	> 1,506 miliar rupiah
Ekonomi	25 ^{a,c,d} , 30 ^b	Luas lahan produktif	60	< 5,649 ha	5,649 s.d. 18,712 ha	> 18,712 ha
		Luas hutan lindung ^{a,c,d}		< 20 ha	20 s.d. 50 ha	> 50 ha
Lingkungan	10 ^{a,c,d}	Luas hutan alam ^{a,c,d}		< 25 ha	25 s.d. 75 ha	> 75 ha
		Luas hutan bakau ^{a,c,d}	100	< 10 ha	10 s.d. 30 ha	> 30 ha
		Luas semak belukar ^{a,c,d}		< 10 ha	10 s.d. 30 ha	> 30 ha
		Luas rawa ^c		< 5 ha	5 s.d. 20 ha	> 20 ha

Keterangan: a) letusan gunung api, b) gempa bumi, c) banjir, d) tanah longsor, PDRB= Produk Domestik Regional Bruto

2.2.4 Pemetaan kapasitas

Pemetaan kapasitas dilakukan dengan acuan Modul Teknis KRB BNPB tahun 2019. Parameter kapasitas terdiri atas *IKD* dan *IKM*. Nilai *IKD* Kabupaten Karo terhadap bencana dikonversi dengan persamaan (9) s.d. (11) (BNBP, 2019a).

$$\text{Jika } IKD \leq 0,4, IKD_T = \frac{1/3}{0,4} \cdot IKD \quad (9)$$

$$\text{Jika } 0,4 < IKD \leq 0,8, IKD_T = \frac{1}{3} + \left(\frac{1/3}{0,4} \cdot (IKD - 0,4)\right) \quad (10)$$

$$\text{Jika } 0,8 < IKD \leq 1, IKD_T = \frac{2}{3} + \left(\frac{1/3}{0,2} \cdot (IKD - 0,8)\right) \quad (11)$$

Nilai *IKM* berupa hasil survei masyarakat di beberapa desa di Kabupaten Karo didapatkan dari InaRisk BNPB. Nilai ini diinterpolasi dalam administrasi desa, kemudian dikalikan dengan *IKD* untuk mendapatkan indeks kapasitas daerah terhadap masing-masing bencana.

2.2.5 Pemetaan risiko bencana

Risiko bencana tersusun dari komponen ancaman, kerentanan, dan kapasitas. Indeks risiko bencana diklasifikasikan seperti pada Tabel 9. Indeks risiko bencana tunggal dihitung dengan persamaan (12) (BNPB, 2012).

$$\text{Risiko} = \sqrt[3]{\text{Ancaman} * \text{Kerentanan} * (1 - \text{Kapasitas})} \quad (12)$$

Tabel 9 Klasifikasi risiko bencana (BNPB, 2012)

Indeks Risiko (R)	Kelas Risiko
$R \leq 0,33$	Rendah
$0,33 < R \leq 0,66$	Sedang
$R > 0,66$	Tinggi

2.2.6 Pemetaan risiko multi bencana

Risiko multi bencana dihitung dengan memberi bobot pada masing-masing bencana setelah mendapatkan indeks risiko bencana letusan Gunung Api Sinabung, gempa bumi, banjir, dan tanah longsor. Bobot masing-masing bencana adalah 0,25, yang berarti setiap bencana memiliki pengaruh yang sama terhadap indeks risiko multi bencana.

2.2.7 Evaluasi perbedaan

Perbedaan hasil pemetaan risiko multi bencana berdasarkan kedua acuan dievaluasi berdasarkan luasan daerah ancaman dan risiko bencana, kelas maksimal kerentanan dan kapasitas daerah, serta luasan tiap kelas risiko multi bencana.

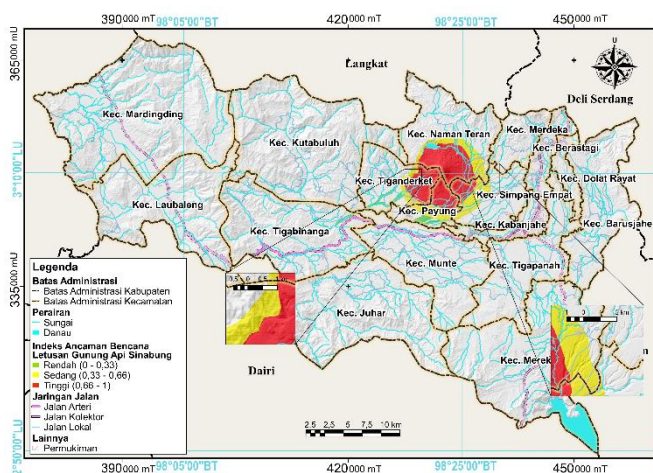
3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Indeks Ancaman, Kerentanan, Kapasitas, dan Risiko

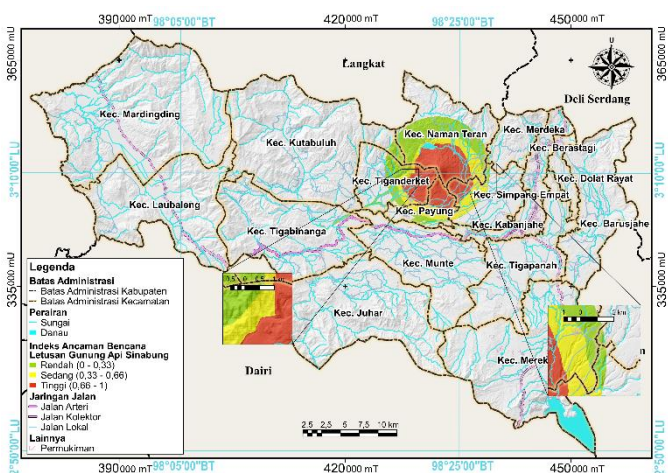
3.1.1 Indeks ancaman

Peta ancaman seluruh bencana dengan kedua acuan disajikan dalam Gambar 4. Pemetaan ancaman dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 memberikan indeks yang diskrit dalam rentang 0,33 s.d. 1, kecuali pada bencana banjir yang bernilai 0,278 s.d. 1. Indeks ancaman bencana dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 lebih bervariasi akibat metode perhitungan yang lebih detail untuk setiap bencana.

Indeks ancaman bencana letusan Gunung Api Sinabung dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 lebih bervariasi dengan rentang nilai dari 0,1 s.d. 1. Kombinasi zona landaan dan lontaran dari KRB yang berbeda menyebabkan indeks yang lebih kontinu pada Gambar 4(b).



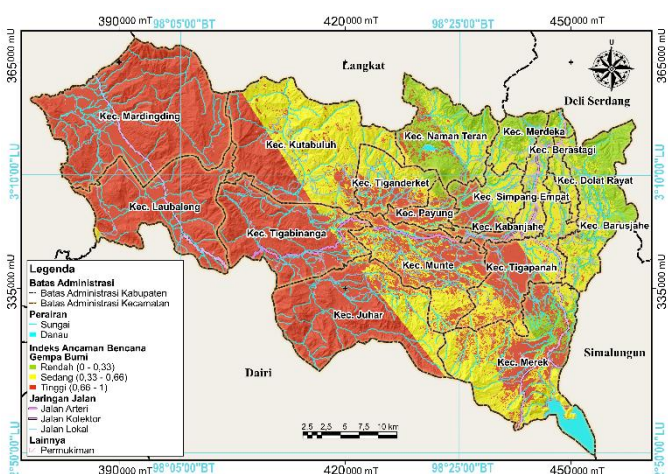
(a) Peta ancaman letusan Gunung Api Sinabung dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



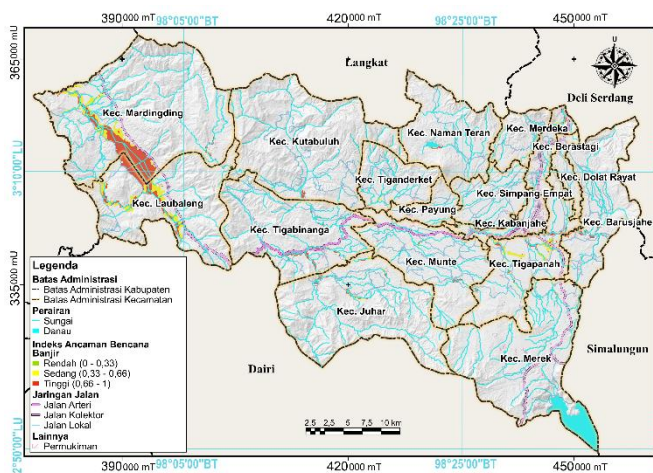
(b) Peta ancaman letusan Gunung Api Sinabung dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019



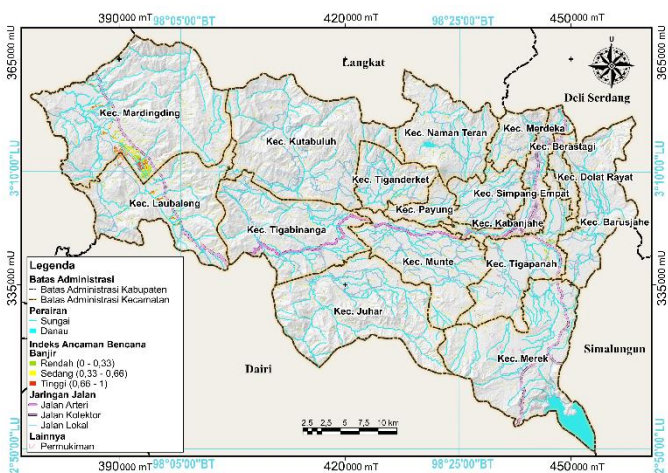
(c) Peta ancaman gempa bumi dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



(d) Peta ancaman gempa bumi dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

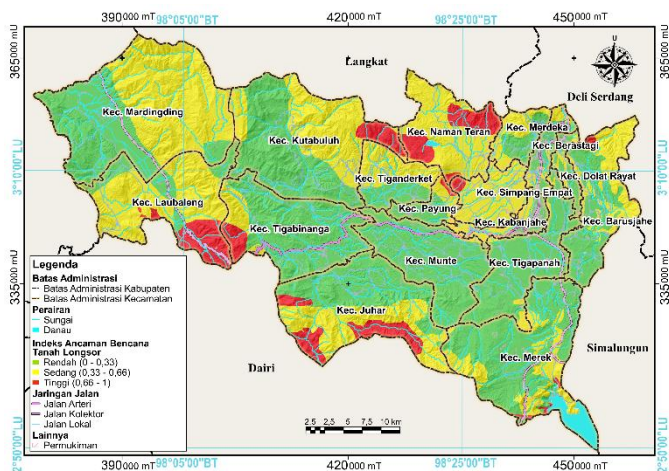


(e) Peta ancaman banjir dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



(f) Peta ancaman banjir dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

Gambar 4 Peta ancaman bencana



(g) Peta ancaman tanah longsor dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



(h) Peta ancaman tanah longsor dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

Gambar 4 (lanjutan) Peta ancaman bencana

Pada bencana gempa bumi, indeks ancaman didominasi oleh kelas tinggi. Perhitungan nilai PGA di permukaan memberikan lebih banyak daerah di bagian barat Kabupaten Karo dengan indeks ancaman tinggi akibat nilai GAF yang relatif tinggi. Indeks ancaman yang diperoleh berada dalam rentang 0,01 s.d. 1 seperti pada Gambar 4(d).

Indeks ancaman bencana banjir dan tanah longsor bervariasi tergantung kondisi topografi suatu daerah. Daerah dengan kelereng curam memiliki indeks risiko bencana tanah longsor, yang bernilai 0,13 s.d. 1, relatif tinggi. Sebaliknya, daerah rendah di sekitar badan air lebih berisiko terhadap bencana banjir. Indeks risiko bencana banjir berada dalam rentang 0 s.d. 0,93.

3.1.2. Indeks kerentanan

Indeks kerentanan dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 berada dalam kelas sedang untuk seluruh bencana. Perbedaan yang sangat kecil disebabkan penggunaan parameter yang sama, kecuali pada komponen kerentanan lingkungan. Sebaliknya, seleksi daerah ancaman, permukiman, dan lingkungan pada acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 memberikan nilai dan distribusi indeks kerentanan yang lebih beragam. Peta kerentanan bencana hasil acuan terbaru pada Gambar 5.

Kerentanan bencana dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 memiliki nilai yang lebih bervariasi dari rendah ke tinggi. Pada bencana letusan Gunung Api Sinabung, indeks kerentanan berada dalam rentang 0 s.d. 0,81, dengan persebaran nilai tinggi pada Kecamatan Naman Teran, yang memiliki indeks kerentanan fisik dan ekonomi tinggi.

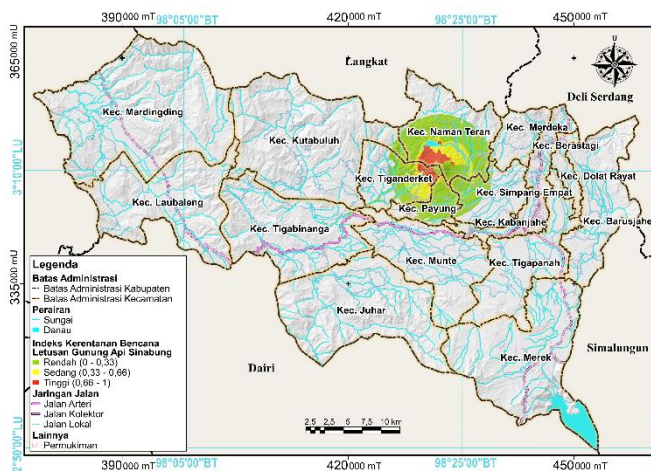
Daerah kerentanan gempa bumi yang paling luas, justru memiliki kerentanan kelas tinggi paling sedikit. Beberapa area kecil di Kecamatan Mardinding dan Laubaleng, yang merupakan area lingkungan, memiliki indeks kerentanan tertinggi dari rentang nilai 0 s.d. 0,74.

Daerah ancaman banjir yang sudah terbatas ditambah seleksi kerentanan mengakibatkan distribusi indeks kerentanan banjir sulit divisualisasikan. Namun demikian, persebaran indeks kerentanan merata di seluruh kecamatan dalam rentang 0,01 s.d. 0,70.

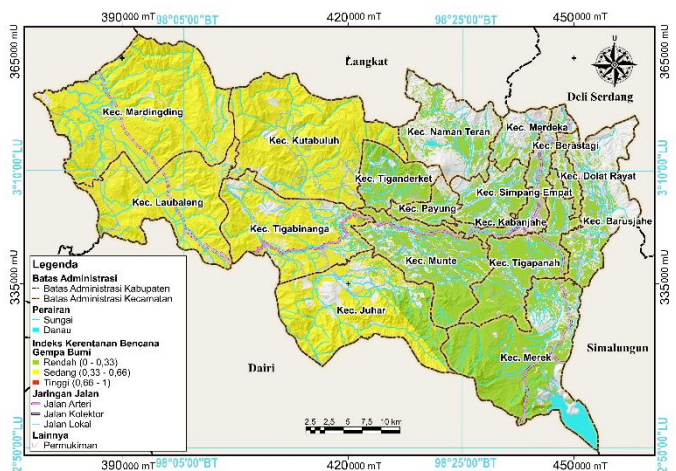
Indeks kerentanan bencana tanah longsor berada dalam rentang 0 s.d. 0,77. Persebaran kelas maksimal berada pada daerah dengan kerentanan ekonomi dan lingkungan yang tinggi, seperti Kecamatan Mardinding dan Juhar. Indeks kerentanan yang lebih tinggi pada metode ini disebabkan normalisasi total nilai kerentanan ke rentang 0 s.d. 0,4.

3.1.3 Indeks Kapasitas

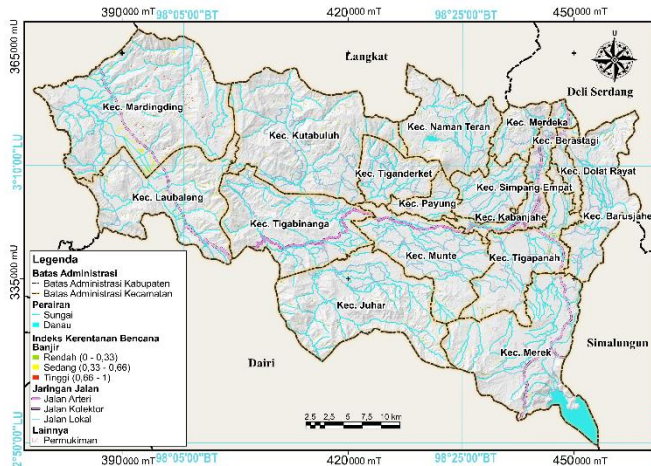
Pemetaan kapasitas dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB Tahun 2019 memberikan nilai diskrit untuk setiap kecamatan. Peta kapasitas daerah terhadap masing-masing bencana disajikan pada Gambar 6. Indeks yang dihasilkan berada dalam rentang 0,44-0,76 untuk bencana letusan Gunung Api Sinabung, 0,49-0,70 untuk bencana gempa bumi, 0,37-0,69 untuk bencana banjir, dan 0,44-0,60 untuk bencana tanah longsor. Persebaran kapasitas dengan kelas tinggi berpusat di daerah pemerintahan dan pariwisata, seperti Kecamatan Kabanjahe, Berastagi, dan Tigapanah. Khusus bencana letusan gunung api, kecamatan di sekitar Gunung Api Sinabung memiliki kapasitas yang lebih tinggi.



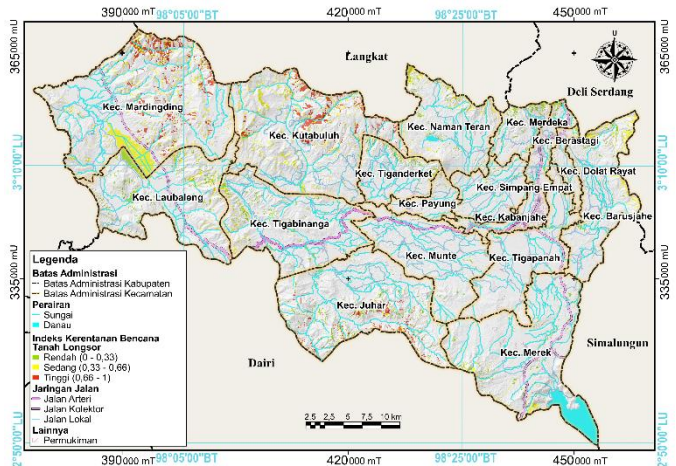
(a) Peta kerentanan letusan Gunung Api Sinabung



(b) Peta kerentanan gempa bumi



(c) Peta kerentanan banjir

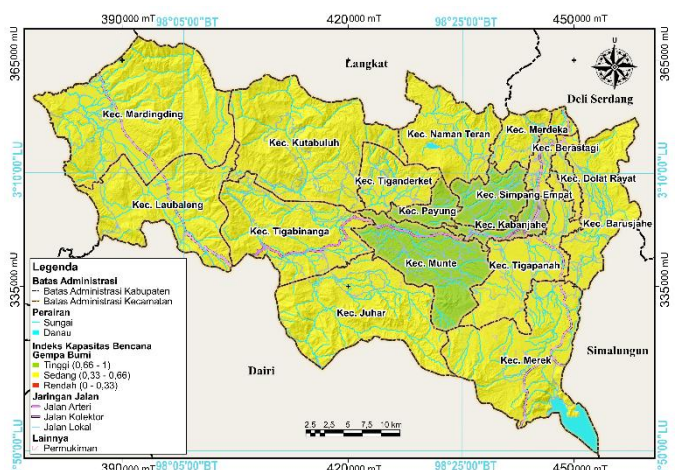


(d) Peta kerentanan tanah longsor

Gambar 5 Peta kerentanan bencana dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

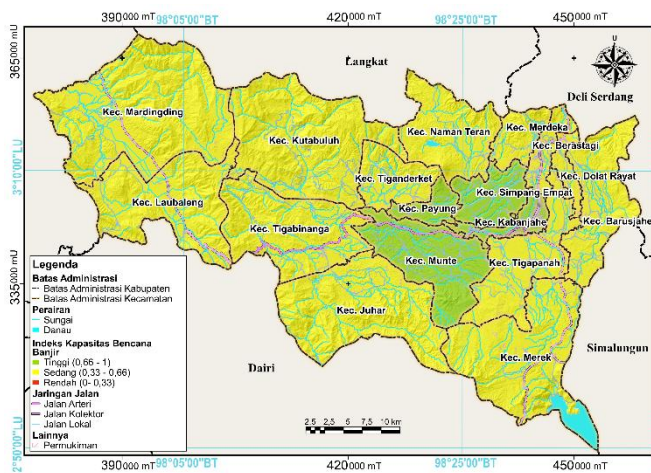


(a) Peta kapasitas letusan Gunung Api Sinabung

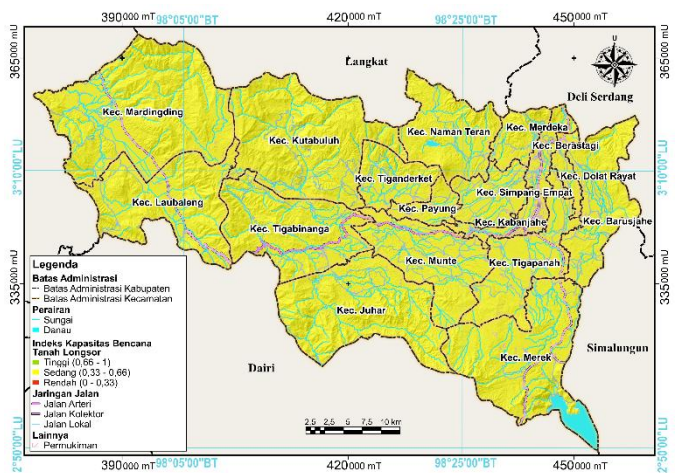


(b) Peta kapasitas gempa bumi

Gambar 6 Peta kapasitas daerah dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019



(c) Peta kapasitas banjir



(d) Peta kapasitas tanah longsor

Gambar 6 (Lanjutan) Peta kapasitas daerah dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

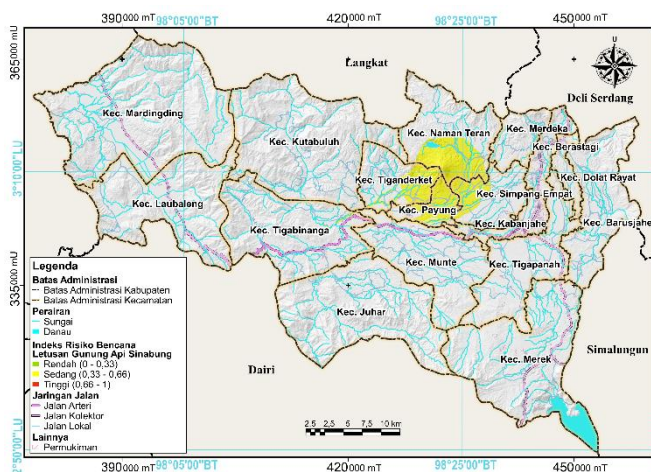
3.1.4 Indeks risiko

Indeks risiko dari komponen ancaman, kerentanan dan kapasitas disajikan pada Gambar 7. Indeks risiko didominasi oleh kelas sedang untuk seluruh bencana. Hal ini dipengaruhi nilai kerentanan dan kapasitas yang berada pada kelas sedang di sebagian besar wilayah Kabupaten Karo.

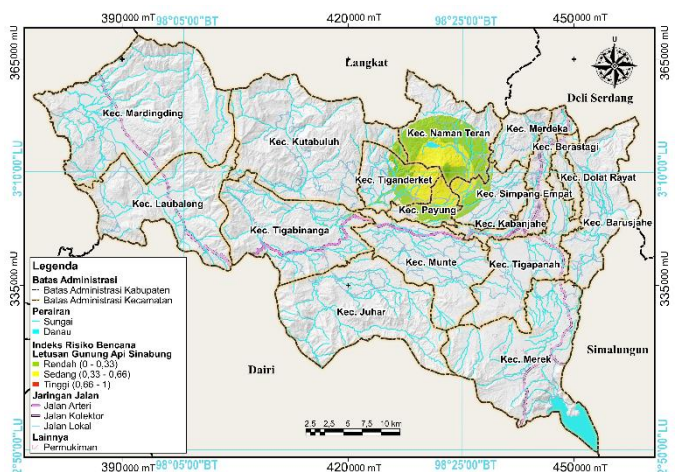
Bencana letusan Gunung Api Sinabung memiliki indeks ancaman dalam rentang 0,32 s.d. 0,52 dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan 0 s.d. 0,63 berdasarkan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019. Bencana gempa bumi memiliki rentang nilai yang mirip dengan bencana letusan Gunung Api Sinabung, dengan nilai 0,36 s.d.

0,61 dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan 0,05 s.d. 0,67 dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019.

Indeks risiko bencana banjir dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 berada dalam rentang 0,40 s.d. 0,71, sedangkan dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 berada dalam rentang 0,01 s.d. 0,61. Di sisi lain, bencana tanah longsor memiliki daerah risiko kelas tinggi terluas di antara seluruh bencana, dengan rentang nilai 0,37 s.d. 0,68 berdasarkan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 dan 0,02 s.d. 0,75 dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2012.

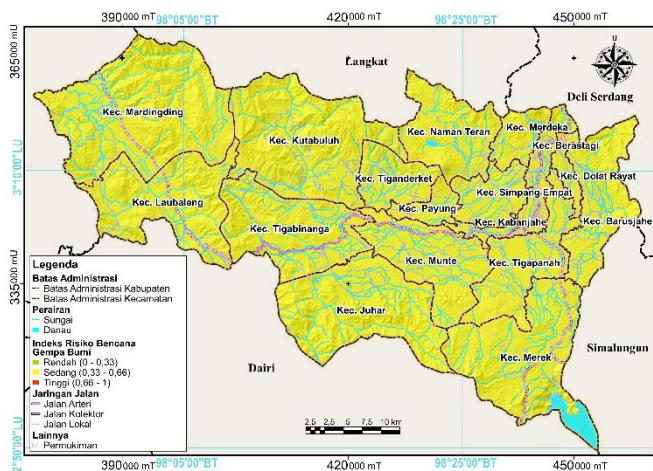


(a) Peta risiko letusan Gunung Api Sinabung dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012

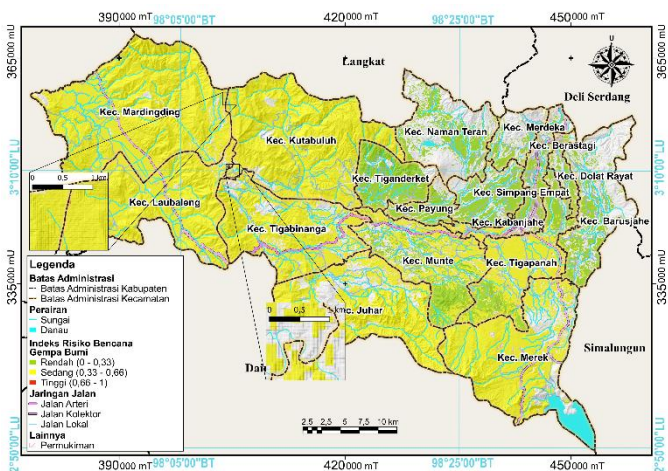


(b) Peta risiko letusan Gunung Api Sinabung dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

Gambar 7 Peta risiko bencana



(c) Peta risiko gempa bumi dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



(d) Peta risiko gempa bumi dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019



(e) Peta risiko banjir dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



(f) Peta risiko banjir dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019



(g) Peta risiko tanah longsor dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012



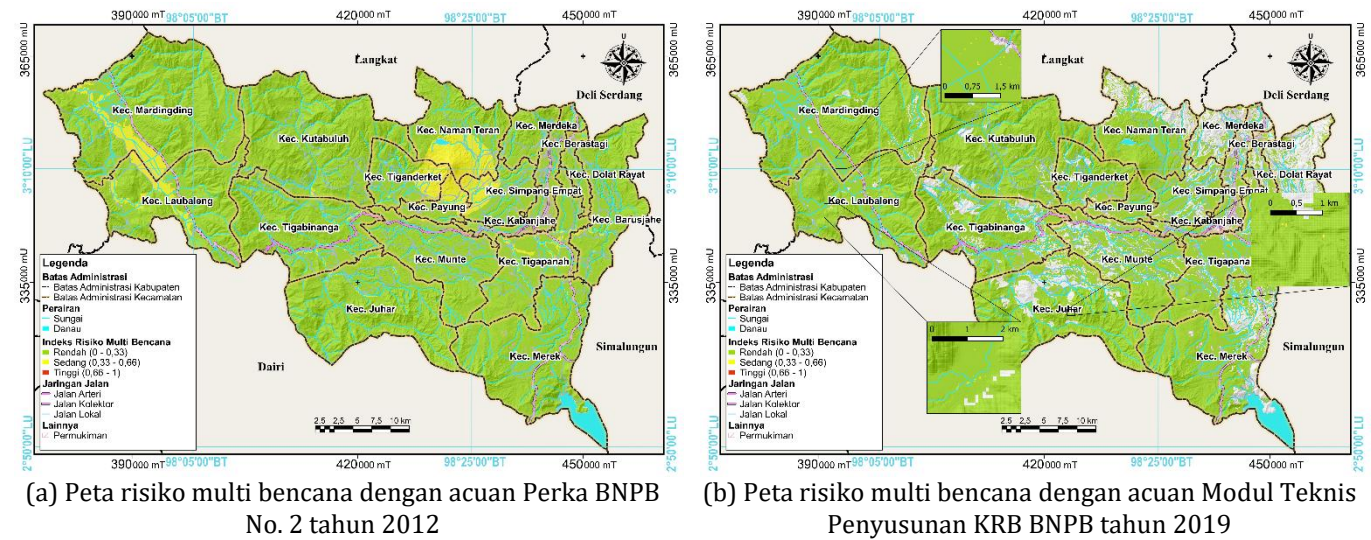
(h) Peta risiko tanah longsor dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019

Gambar 7 (lanjutan) Peta risiko bencana

3.2. Peta Risiko Multi Bencana

Persebaran indeks risiko multi bencana di Kabupaten Karo disajikan pada Gambar 8. Pemetaan berdasarkan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012 memberikan risiko multi bencana di seluruh wilayah Kabupaten Karo. Selain itu, terdapat risiko multi bencana dengan tingkat/kelas sedang hampir di seluruh kecamatan, kecuali Kecamatan

Dolat Rayat dan Merdeka. Sebaliknya, hasil pemetaan risiko multi bencana dengan acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menghasilkan peta risiko multi bencana dengan sebaran kelas risiko yang lebih dominan di kelas rendah.



Gambar 8 Peta risiko multi bencana

3.3 Evaluasi Perbedaan

3.3.1 Perbedaan pemetaan ancaman

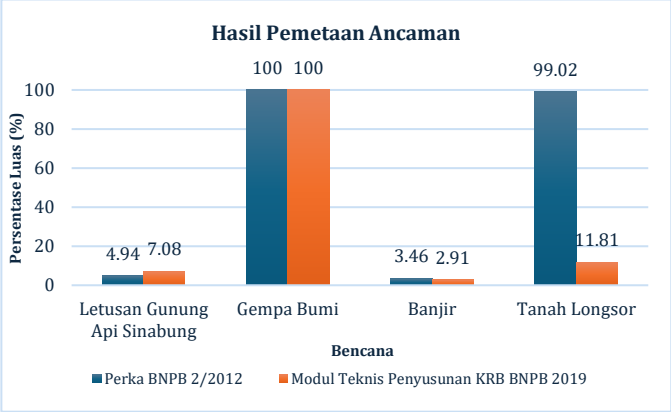
Pemetaan ancaman dievaluasi dengan persentase luasan daerah ancaman bencana di Kabupaten Karo. Grafik perbandingan luasan daerah dengan kedua acuan disajikan pada Gambar 9. Selain bencana letusan Gunung Api Sinabung, luasan ancaman bencana hasil acuan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 relatif lebih kecil. Hal ini dipengaruhi oleh metode pengolahan data dalam perhitungan indeks ancaman bencana. Parameter zona lontaran menambah luasan daerah ancaman letusan Gunung Api Sinabung metode ini, sedangkan seleksi dalam pemetaan ancaman bencana lain memberikan hasil yang lebih terbatas.

3.3.2 Perbedaan pemetaan kerentanan

Pemetaan kerentanan dievaluasi dengan kelas maksimal dari seluruh kecamatan di Kabupaten Karo. Perbandingan kelas maksimal kerentanan disajikan pada Tabel 8. Kelas kerentanan maksimal menunjukkan kemiripan dari kedua acuan yang digunakan. Hal ini dipengaruhi penggunaan data yang sama.

Tabel 8 Perbandingan kelas kerentanan

Bencana	Kelas Kerentanan	
	Perka 2012	Modul 2019
Letusan Gunung Api Sinabung	Sedang	Rendah
Gempa Bumi	Sedang	Sedang
Banjir	Sedang	Sedang
Tanah Longsor	Sedang	Sedang



Gambar 9 Grafik perbandingan ancaman antara Perka BNPB 2/2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB 2019.

3.3.3 Perbedaan pemetaan kapasitas

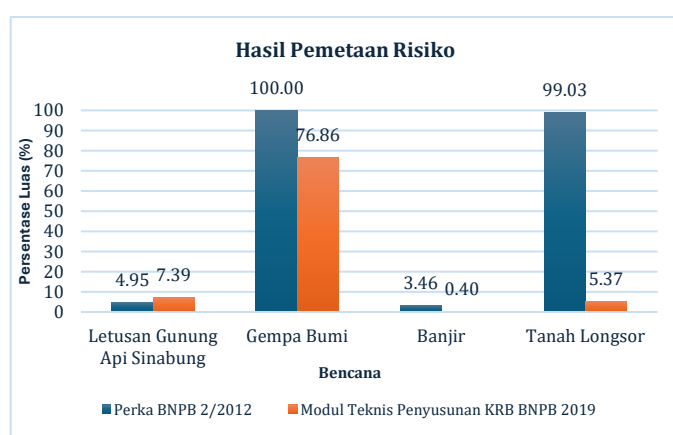
Pemetaan kapasitas menggunakan satu acuan dievaluasi dengan kelas kapasitas hasil pemetaan BPBD Kabupaten Karo pada tahun 2017. Perbedaan kelas kapasitas dapat disebabkan oleh perbedaan metode dan/ atau perbedaan kondisi masyarakat dan pemerintah. Perbandingan kelas kapasitas disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Perbandingan kelas kapasitas

Bencana	Kelas Kapasitas	
	BPBD Karo 2017	Modul 2019
Letusan Gunung Api Sinabung	Rendah	Sedang
Gempa Bumi	Rendah	Sedang
Banjir	Rendah	Sedang
Tanah Longsor	Sedang	Sedang

3.3.4 Perbedaan pemetaan risiko

Pemetaan risiko dievaluasi berdasarkan luasan daerah risiko. Komponen kerentanan dan kapasitas yang mencakup seluruh wilayah Kabupaten Karo memberikan luasan risiko yang hampir sama dengan luasan ancaman pada metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012. Grafik perbandingan luasan daerah risiko disajikan pada Gambar 10.

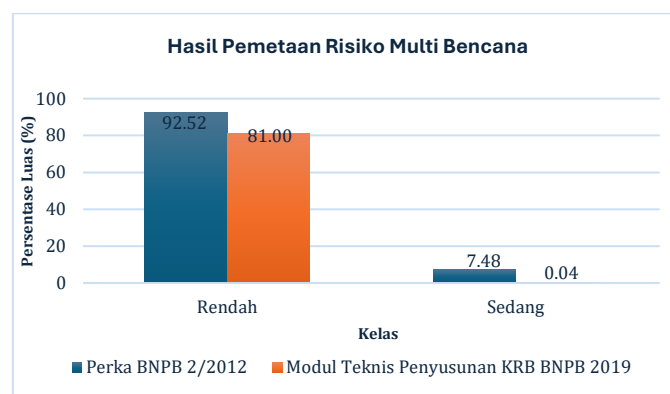


Gambar 10 Grafik perbandingan risiko antara Perka BNPB 2/2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB 2019 Grafik.

3.3.4 Perbedaan pemetaan risiko multi bencana

Pemetaan risiko multi bencana dievaluasi dengan persentase luas tiap kelas risiko multi bencana. Grafik perbandingan luasan daerah disajikan pada Gambar 11. Risiko bencana gempa bumi dan tanah longsor yang mencakup seluruh wilayah Kabupaten Karo memberikan indeks risiko multi bencana dengan total luasan 100% dengan acuan Perka BNPB No. 2 tahun 2012. Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 dengan indeks risiko bencana tunggal yang lebih terbatas menghasilkan indeks risiko multi bencana pada 81,04% wilayah.

Persebaran daerah dengan kelas sedang juga semakin terbatas dalam metode terbaru. Gambar 11 dapat dilihat terjadi penurunan luasan daerah risiko multi bencana dengan kelas sedang dari 76,86% ke 0,40%. Penurunan yang signifikan ini disebabkan oleh sedikitnya daerah yang memiliki tiga hingga empat risiko bencana tunggal dengan metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019.



Gambar 11 Grafik perbandingan risiko multi bencana antara Perka BNPB 2/2012 dan Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB 2019.

4. Kesimpulan

Hasil pemetaan risiko multi bencana di Kabupaten Karo menunjukkan variasi indeks ancaman, kerentanan, dan kapasitas pada setiap jenis bencana, di mana kerentanan dan kapasitas lebih dominan berada pada kelas sedang, sedangkan ancaman bervariasi dari kelas rendah hingga tinggi. Ketiga komponen ini mempengaruhi indeks risiko bencana yang didominasi oleh kelas sedang.

Peta risiko multi bencana memberikan persebaran indeks yang didominasi oleh kelas rendah. Persebaran daerah dengan risiko multi bencana kelas sedang mengalami penurunan yang signifikan pada metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 karena daerah risiko bencana yang sangat terbatas. Pada metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012, indeks risiko multi bencana dengan kelas sedang terdapat hampir di seluruh kecamatan di Kabupaten Karo.

Hasil perbandingan antara kedua metode menunjukkan bahwa metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012 menghasilkan cakupan wilayah berisiko yang lebih luas dengan nilai indeks bersifat diskrit, sedangkan metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 menghasilkan cakupan yang lebih terbatas dengan nilai indeks yang lebih kontinu. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan jenis data serta pendekatan pengolahan data, yang berimplikasi pada kesesuaian penggunaan masing-masing metode. Selanjutnya, hasil membuktikan bahwa metode Perka BNPB No. 2 tahun 2012 lebih sesuai untuk analisis dengan cakupan wilayah yang lebih luas, sedangkan metode Modul Teknis Penyusunan KRB BNPB tahun 2019 lebih sesuai digunakan untuk kajian yang lebih detail pada area yang lebih sempit.

5. Pernyataan Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam artikel ini.

6. Referensi

Andaru, R and Santosa, P. B. (2017). Analisis Spasial

- Bencana Longsor Menggunakan Data Foto Udara UAV. *Jurnal Dialog dan Penanggulangan Bencana*, 8(2), 142-150.
<https://jdpb.bnpb.go.id/index.php/jurnal/article/view/124/124>
- Andaru, R., & Santosa, P. B. (2017). Analisis Spasial Bencana Longsor Bukit Telogolele Kabupaten Banjarnegara Menggunakan Data Foto Udara UAV. *Jurnal Nasional Teknologi Terapan (JNTT)*, 1(1), 77. <https://doi.org/10.22146/jntt.34089>
- BNPB. (2019a). *Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Banjir*. Direktorat Pengurangan Risiko Bencana BNPB.
- BNPB. (2019b). *Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Gempa Bumi*. Direktorat Pengurangan Risiko Bencana BNPB.
- BNPB. (2019c). *Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Letusan Gunung Api*. Direktorat Pengurangan Risiko Bencana BNPB.
- BNPB. (2019d). *Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Tanah Longsor*. Direktorat Pengurangan Risiko Bencana BNPB.
- Brema, M. A. (2025). *Pemetaan Risiko Multi Bencana di Kabupaten Karo*. Universitas Gadjah Mada.
- Cauvin, C., Escobar, F., & Serradj, A. (2010). From the Description to the Generalization of an Attribute Variable Z. dalam *Cartography and the Impact of the Quantitative Revolution*, 7-75.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781118558126.ch1>
- Gacu, J., Kantoush, S., Candelario, R., Falculan, J., Moaje, K. V., Famaran, M. J., Nepomuceno, M., Ebon, J. A., Parungao, R., Ignacio, R., Merida, M., Pastrana, P. M., & Quinton, E. (2025). Integrated Multi-Hazard Risk Assessment under Compound Disasters using Analytical Hierarchy Process (AHP). *Heliyon*, 11(11).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43173>
- Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Sperotto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2016). A Review of Multi-risk Methodologies for Natural Hazards: Consequences and Challenges for a Climate Change Impact Assessment. *Journal of Environmental Management*, 168, 123-132.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>
- Hanif, M., Apichontrakul, S., & Razi, P. (2024). Surface Deformation Monitoring and Forecasting of Sinabung Volcano using Interferometry Synthetic Aperture Radar and Forest-based Algorithm. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101288.<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rase.2024.101288>
- Heo, S., Sohn, W., Park, S., & Lee, D. K. (2024). Multi-hazard Assessment for Flood and Landslide Risk in Kalimantan and Sumatra: Implications for Nusantara, Indonesia's New Capital. *Heliyon*, 10(18).
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37789>
- Hermon, D., Erianjoni, Ganefri, Dewata, I., Iskarni, P., & Syam, A. (2019). A Policy Model of Adaptation Mitigation and Social Risks the Volcano Eruption Disaster of Sinabung in Karo Regency - Indonesia. *GEOMATE Journal*, 17(60), 190-196.
<https://geomatejournal.com/geomate/article/view/371>
- Mustikaningrum, M., Widhatama, A. F., Widantara, K. W., Ibrohim, M., Hibatullah, M. F., Larasati, R. A. P., Utami, S., & Hadmoko, D. S. (2023). Multi-hazard Analysis in Gunungkidul Regency using Spatial Multi-criteria Evaluation. *Forum Geografi*, 37(1).
<https://doi.org/10.23917/forgeo.v37i1.19041>
- Paripurno, E. T., Putra, W., & Triadi, W. S. (2023). Disaster Risk Assessment Magetan Regency, East Java. *AIP Conference Proceedings*, 2598.
<https://doi.org/10.1063/5.0135163>
- Peraturan Kepala BNPB No. 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana. (2012).
- Pinem, M. A. B. (2025). *Pemetaan Risiko Multi Bencana di Kabupaten Karo*. Universitas Gadjah Mada
- Pratiwi, R. D., Nugraha, A. L., & Hani'ah. (2016). Pemetaan Multi Bencana Kota Semarang. *Jurnal GeodesiUNDIP*, 5(4), 122-131.
- Pratiwi, A. N. & Santosa, P. B. (2021). Pemodelan Banjir dan Visualisasi Genangan Banjir untuk Mitigasi Bencana di Kali Kasin Kelurahan Bareng Kota Malang. *Journal of Geospatial Information Science and Engineering*, Vol. 4 No. 1 (2021).
<https://doi.org/10.22146/jgise.56525>
- Prayoga, A., Wita, L. M., & Vernon, P. (2019). Risk Analysis of Sinabung Volcano Eruption in Karo, North Sumatera, Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1363(1), 12017.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1363/1/012017>
- Qarinur, M., Silitonga, E., & Sibuea, D. (2024). Assessing Soil Engineering Properties for Landslide Susceptibility in Karo Regency, Indonesia. *Proceedings of the 5th International Conference on Innovation in Education, Science, and Culture, ICIESC*.
<https://doi.org/10.4108/eai.24-10-2023.2342119>
- Rahyuni, F. (2024, November 24). 10 Korban Longsor di Karo Sudah Ditemukan, Pencarian Berakhir. *Detik Sumut*. <https://www.detik.com/sumut/berita/d-7656734/10-korban-longsor-di-karo-sudah-ditemukan-pencarian-berakhir>
- Saputra, A., Gomez, C., Delikostidis, I., Zawar-Reza, P., Hadmoko, D. S., & Sartohadi, J. (2021). Preliminary Identification of Earthquake Triggered Multi-hazard and Risk in Pleret Sub-District (Yogyakarta, Indonesia). *Geo-spatial Information Science*, 24(2), 256-278.
<https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1801335>