

Pemanfaatan Artificial Neural Network Dalam Pemetaan Kerentanan Sosial-Ekonomi Terhadap Bahaya Longsor di Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulonprogo, DIY

Esti Suryaningsih¹, Yohana Noradika^{1*}, Purbudi Wahyuni¹

¹Prodi Magister Manajemen Bencana UPN "Veteran" Yogyakarta
Ruang Sudirman 1-4 Kampus UPN "Veteran" Unit 2, Jl. Babarsari, Janti, Caturtunggal, Depok, Yogyakarta City,
Special Region of Yogyakarta 55281

<p>Received 16 June 2025 Revised 11 July 2025 Accepted 19 July 2025</p>	<p>Abstrak Bencana tanah longsor di Kapanewon Kokap, Kulonprogo, DIY, makin sering terjadi akibat faktor geologis, hidrologis, iklim, dan aktivitas manusia. Penelitian ini bertujuan memetakan dan menganalisis kerentanan sosial-ekonomi masyarakat terhadap longsor dengan teknologi Artificial Neural Network berbasis Self Organizing Map (SOM) dan Sistem Informasi Geografis (SIG). Data primer diperoleh melalui observasi lapangan, sementara data sekunder berasal dari BPS dan BPBD. SOM digunakan untuk mengelompokkan wilayah berdasarkan kesamaan sosial-ekonomi, sedangkan SIG menghasilkan peta kerentanan spasial yang dioverlay dengan data curah hujan dan zona gerakan tanah. Hasil menunjukkan perubahan faktor dominan penyebab kerentanan selama 2021–2023: dari ketergantungan pada toko/warung (2021), sektor informal dan rasio gender (2022), hingga usia produktif dan lansia (2023). Hargorejo dan Hargomulyo masuk klaster kerentanan tinggi, sementara Kalirejo dan Hargowilis lebih rendah dengan potensi ekonomi formal lebih kuat. Tren spasial menunjukkan wilayah utara dan barat tetap rentan akibat topografi curam dan curah hujan tinggi. Penelitian merekomendasikan mitigasi berbasis data, seperti pembangunan pasar tahan bencana, pelatihan evakuasi inklusif, serta penguatan ekonomi formal melalui koperasi dan regulasi wisata yang responsif terhadap risiko longsor.</p> <p>Kata kunci: kerentanan sosial-ekonomi, Self Organizing Map, Sistem Informasi Geografis (SIG), mitigasi bencana</p>
<p>*Correspondence Yohana Noradika Email: yohanaNM@upnyk.ac.id</p>	<p>Abstract <i>Landslides in Kapanewon Kokap, Kulonprogo, Yogyakarta Special Region (DIY), have become increasingly frequent in recent years due to geological, hydrological, climatic factors, and human activities. This study aims to map and analyze the socio-economic vulnerability of communities to landslide hazards using Artificial Neural Network technology based on Self-Organizing Map (SOM) and Geographic Information Systems (GIS). Primary data were obtained through field observations, while secondary data were sourced from government institutions such as BPS and BPBD. SOM was used to cluster regions based on socio-economic similarities, while GIS produced spatial vulnerability maps overlaid with rainfall data and landslide-prone zones. The results reveal a shift in dominant vulnerability factors over the 2021–2023 period: from dependence on basic infrastructure such as small shops (2021), informal sectors and gender ratios (2022), to demographic variables such as productive age groups and elderly populations (2023). Areas such as Hargorejo and Hargomulyo were categorized in the high vulnerability cluster, while Kalirejo and Hargowilis showed lower vulnerability with stronger formal economic potential. Spatial trends indicate that the northern and western areas remain highly vulnerable due to steep topography and high rainfall intensity. The study recommends data-driven mitigation strategies, including the development of disaster-resilient local markets, inclusive evacuation training for the elderly and people with disabilities, and strengthening of the formal economy through cooperatives and disaster-responsive tourism regulations.</i></p> <p>Keywords: socio-economic vulnerability, Self-Organizing Map, Geographic Information Systems (GIS), disaster mitigation</p>

PENDAHULUAN

Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulonprogo, Daerah Istimewa Yogyakarta, merupakan wilayah rawan bencana tanah longsor karena lokasinya di kawasan perbukitan dengan lereng curam. Data BPBD Kulonprogo menunjukkan peningkatan jumlah kejadian longsor selama 2022–2024, mencapai 348 kejadian di lima kelurahan. Bencana ini merupakan hasil interaksi kompleks antara kondisi geologis, hidrologis, iklim, dan aktivitas manusia. Indonesia yang beriklim tropis dan memiliki curah hujan tinggi sangat rentan terhadap longsor, diperparah oleh lapisan tanah kedap air dan sifat tanah yang mudah jenuh (Susanti et al., 2017; Haribulan et al., 2019).

Sejak disetujuinya *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*, pengelolaan bencana bergeser dari pendekatan reaktif ke pengurangan risiko bencana (*Disaster Risk Reduction*). Empat prioritas aksi—pemahaman risiko, penguatan tata kelola, investasi pengurangan risiko, serta peningkatan kesiapsiagaan—menjadi dasar penting bagi formulasi kebijakan mitigasi (Ahsanti & Husen, 2022; Hakim & Endangsih, 2023). Oleh karena itu, analisis risiko yang komprehensif menjadi kunci dalam merancang strategi penanggulangan bencana yang efektif.

Dalam konteks tersebut, pemetaan kerentanan sosial-ekonomi menjadi langkah penting untuk memahami kemampuan masyarakat dalam menghadapi dan pulih dari bencana (Hidayat et al., 2024). Menurut Rahmaningtyas dan Setyono (2015), kerentanan sosial merujuk pada kondisi rapuh masyarakat, sedangkan Josiana dan Hizbaron (2019) menyebutkan bahwa kerentanan ekonomi berkaitan dengan kemampuan individu atau komunitas dalam mengatasi dampak bencana (Sadewo, 2018). Dengan meningkatnya kompleksitas data di era big data, metode konvensional mulai tidak memadai.

Namun, dalam era big data dan transformasi digital, metode konvensional mulai tidak memadai untuk mengolah kompleksitas dan volume data yang semakin besar. Salah satu pendekatan teknologi yang dinilai sangat potensial dalam hal ini adalah *Artificial Neural Network* (ANN), khususnya algoritma *Self Organizing Map* (SOM). SOM sebagai metode *unsupervised learning* yang memiliki kemampuan mengelompokkan dan memvisualisasikan pola data multivariat tanpa asumsi distribusi tertentu (Vesanto & Alhoniemi, 2020), sehingga sangat tepat digunakan dalam analisis kerentanan sosial-ekonomi yang

melibatkan banyak variabel (Nemes & Butcher, 2021; Cutter et al., 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan metode *Self Organizing Map* (SOM) dalam menganalisis dan memetakan kerentanan sosial- ekonomi masyarakat terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap. Hasilnya diharapkan dapat menghasilkan peta kerentanan yang detail dan informatif, serta menjadi dasar penyusunan kebijakan mitigasi bencana yang partisipatif, tepat sasaran, dan berkelanjutan.

METODOLOGI

Data yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari kombinasi data primer dan sekunder. Data primer dikumpulkan melalui observasi lapangan dan dokumentasi langsung terkait sarana dan prasarana kesiapsiagaan bencana, termasuk ketersediaan alat komunikasi, perlengkapan keselamatan, dan kearifan lokal yang relevan (Fitriawati & Suroso, 2023). Sementara itu, data sekunder diperoleh dari instansi pemerintah seperti Badan Pusat Statistik (BPS) dan dokumen resmi lainnya. sebagaimana disajikan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data Penelitian

Jenis Kerentanan	Variabel	Indikator
SOSIAL	Kelompok Umur	Balita (0-4 th), Anak-anak (5-14 th), Lansia (> 60 th)
	Jenis Kelamin	Jumlah laki-laki dan perempuan
	Disabilitas	Jumlah Disabilitas
Ekonomi	Pariwisata/ Toursm	Jumlah hotel dan tempat wisata
	Sarana Keuangan	Bank dan Koperasi, Restoran
	Perdagangan	Pasar dan restoran/rumah makan

Untuk analisis data, penelitian ini menggunakan metode *Self Organizing Map* (SOM), salah satu algoritma dalam *Artificial Neural Network* (ANN) yang berbasis pada pembelajaran tanpa supervisi (*unsupervised learning*). SOM dipilih karena kemampuannya dalam mengelompokkan data multivariat kompleks berdasarkan kemiripan karakteristiknya, sehingga memungkinkan identifikasi kluster dan outlier yang sulit dideteksi dengan metode statistik konvensional. Proses analisis dilakukan dengan menggunakan *toolbox* SOM dalam lingkungan MATLAB. Evaluasi kualitas pelatihan SOM dilakukan melalui perhitungan *Quantization Error* (Qe) dan *Topographic Error* (Te) untuk memastikan representasi data yang optimal dan keberjagaan struktur topologinya.

Menurut Lin dan Chen (2005), algoritma SOM dapat digambarkan sebagai berikut :

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_M]^T$$

Lapisan input terdiri dari sejumlah neuron M, dan lapisan keluaran terdiri dari neuron

keluaran, biasanya dalam kisi 2D. Vektor bobot setiap neuron, yang memiliki dimensi yang sama dengan pola input, diwakili dengan:

$$W_j = [w_{1j}, w_{2j}, \dots, w_{mj}]^T, \quad j=1, 2, \dots, N$$

Selanjutnya, hasil analisis SOM diintegrasikan dengan data spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menghasilkan peta tematik persebaran kerentanan sosial dan ekonomi di Kapanewon Kokap. Integrasi ini mencakup proses overlay curah hujan historis selama 3 tahun dan peta gerakan tanah. Output akhir berupa peta kerentanan yang diklasifikasikan *clustering* kerentanan rendah, sedang, dan tinggi, sehingga dapat menjadi dasar perencanaan mitigasi bencana yang lebih partisipatif, tepat sasaran, dan berkelanjutan.

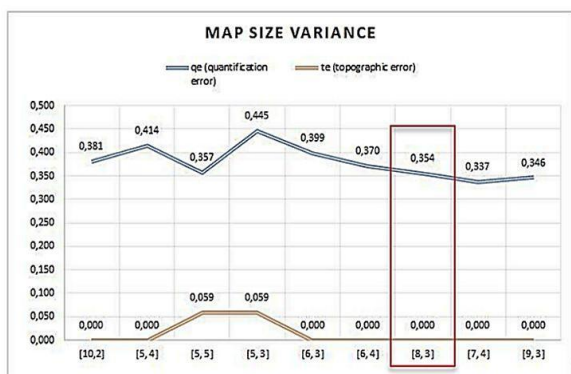
HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *Artificial Neural Network* dengan algoritma *Self-Organizing Map* (SOM) mampu menghasilkan pemetaan spasial yang akurat untuk mengidentifikasi kerentanan sosial-ekonomi terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY. Dengan memanfaatkan data multidimensi seperti kepadatan penduduk, tingkat pendapatan,

aksesibilitas infrastruktur, pola penggunaan lahan, dan kondisi geografis, SOM berhasil mengelompokkan wilayah ke dalam *cluster* kerentanan. Penentuan Ukuran Peta Heksagonal SOM Penentuan ukuran peta heksagonal dalam SOM untuk analisis kerentanan sosial-ekonomi terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap mempertimbangkan kompleksitas data, tujuan analisis spasial, dan efisiensi komputasi. bentuk heksagonal dipilih. karena kemampuannya merepresentasikan hubungan spasial lebih alami dibanding grid persegi, dengan setiap neuron memiliki enam tetangga yang berjarak sama. Ukuran awal peta ditentukan berdasarkan dimensi data input, yaitu jumlah variabel sosial-ekonomi, dan disempurnakan melalui pendekatan iteratif untuk menemukan keseimbangan antara detail spasial dan kestabilan klusterisasi.

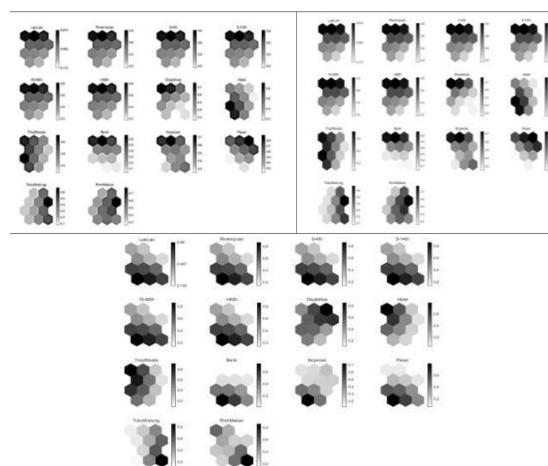
Validasi dilakukan menggunakan *Quantization Error* (Qe) dan *Topographic Error* (Te) untuk memastikan struktur hubungan nonlinear antar variabel tetap terjaga tanpa kehilangan konteks geografis. Hasil menunjukkan bahwa ukuran peta [8 3] menghasilkan Qe sebesar 0,354 dan Te sebesar 0,00, (gambar 1) menunjukkan performa pelatihan SOM yang optimal. Konfigurasi ini memungkinkan setiap sel heksagonal mewakili kelompok desa dengan profil kerentanan unik, mendukung

analisis spasial yang akurat dan relevan untuk perencanaan mitigasi bencana.



Gambar 1. Seleksi ukuran peta yang efektif (2021- 2023)

Visualisasi komponen setiap variabel kerentanan sosial dan ekonomi untuk menentukan kontribusinya dalam membangun peta situs disajikan dalam Gambar 2 merupakan visualisasikan hasil analisis SOM yang menunjukkan kontribusi variabel sosial dan ekonomi dalam membentuk pola kerentanan terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap selama periode 2021–2023. Setiap peta heksagonal merepresentasikan distribusi spasial satu variabel spesifik, dengan gradasi warna dari gelap ke terang yang mencerminkan intensitas kontribusi warna gelap menunjukkan kontribusi tinggi terhadap kerentanan, sementara warna terang mengindikasikan pengaruh rendah.



Gambar 2. Visualisasi komponen setiap variabel kerentanan (2021-2023)

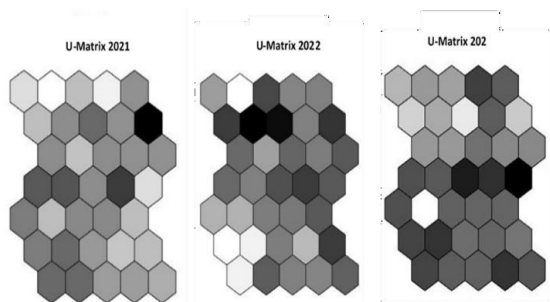
Visualisasi ini mengungkap interaksi kompleks antarvariabel sekaligus memberikan panduan spasial untuk merancang intervensi mitigasi yang kontekstual. Dengan memanfaatkan temuan tersebut dalam kebijakan pengurangan risiko bencana, Kapanewon Kokap dapat meningkatkan ketahanan masyarakat secara lebih inklusif dan berkelanjutan di tengah peningkatan ancaman longsor.

Diagram U- Matrix Tahun 2021- 2023

Hasil analisis SOM menunjukkan pola spasial kerentanan sosial-ekonomi terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap, dengan fokus pada struktur klusterisasi, kontribusi variabel, dan prioritas faktor risiko. Pada diagram U-Matrix (Unified Distance Matrix), peta heksagonal menggambarkan sebaran wilayah berdasarkan kemiripan karakteristik atribut dan spasial. Warna

gelap (hitam/abu-abu tua) merepresentasikan batas antar kluster dengan tingkat *dissimilarity* tinggi, sedangkan warna terang (putih/abu-abu muda) menunjukkan area dengan kesamaan atribut yang kuat dan tingkat *dissimilarity* rendah. Kluster dengan warna gelap di sebelah kanan bawah peta mengindikasikan desa-desa dengan kondisi sosial-ekonomi yang rentan. Sebaliknya, kluster terang di tengah dan tepi peta mencerminkan wilayah dengan tingkat kesejahteraan dan diversifikasi ekonomi yang lebih baik, sehingga memiliki kerentanan lebih rendah terhadap risiko longsor.

Visualisasi U-Matrix ini menjadi dasar untuk memahami distribusi spasial kerentanan serta menentukan prioritas mitigasi bencana di wilayah studi (gambar. 3), berdasarkan data periode 2021–2023.

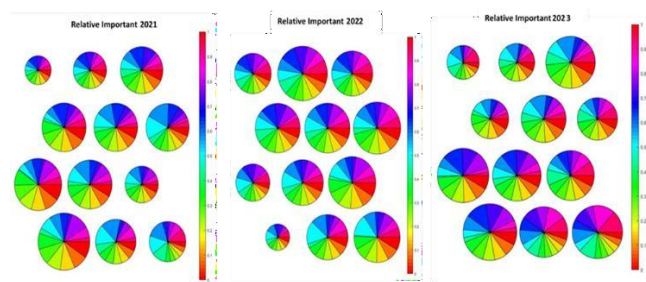


Gambar 3. Pengolahan U-Matrix 2021-2023

Diagram Relative Important 2021-2023

Diagram relative important pada SOM untuk tahun 2021–2023 menggambarkan dinamika perubahan

kontribusi relatif berbagai faktor dalam membentuk pola kerentanan terhadap bahaya longsor di Kapanewon Kokap. Setiap lingkaran mewakili neuron pada peta SOM, dengan gradasi warna yang menunjukkan tingkat pengaruh faktor tertentu, merah untuk kontribusi kuat, kuning/oranye untuk moderat, dan biru untuk lemah. Analisis ini tidak hanya memetakan distribusi spasial, tetapi juga merefleksikan evolusi prioritas risiko selama tiga tahun, sebagaimana ditunjukkan gambar 4.



Gambar 4. Diagram Relative Important SOM Tahun 2021-2023

Analisis dinamika kerentanan sosial-ekonomi di Kapanewon Kokap selama periode 2021–2023 menunjukkan perubahan pola yang signifikan. Pada tahun 2021, dominasi warna merah menggambarkan bahwa kerentanan lebih dipengaruhi oleh faktor struktural seperti keterbatasan infrastruktur dasar dan keberadaan kelompok rentan, terutama di wilayah berlereng curam. Faktor dengan kontribusi sedang (kuning/oranye)

mencerminkan peran ekonomi informal dan institusi lokal, sementara aspek seperti akses layanan formal atau diversifikasi ekonomi (biru) belum menjadi prioritas.

Pada tahun 2022, terjadi pergeseran pola dengan meningkatnya kontribusi sektor informal seperti pariwisata dan pertanian intensif, tercermin dari semakin luasnya area berwarna merah pada variabel tersebut. Beberapa wilayah mulai menunjukkan perkembangan infrastruktur formal dengan munculnya warna hijau/kuning, meski cakupannya masih terbatas. Perubahan juga terlihat pada faktor demografi, dengan adanya adaptasi melalui migrasi tenaga kerja, meskipun kelompok rentan tetap menjadi fokus utama.

Tahun 2023 menunjukkan homogenisasi warna merah pada faktor infrastruktur dasar, kelompok rentan, dan ekonomi lokal, mengindikasikan integrasi ketiga aspek sebagai penentu utama kerentanan. Namun, wilayah dengan aksesibilitas lebih baik mulai memperlihatkan peningkatan kapasitas adaptasi (kuning/oranye) dan mitigasi (hijau/kuning). Intervensi seperti pembangunan fasilitas tahan bencana dan pelatihan pengelolaan lahan mulai berdampak, meski belum merata.

Perubahan gradasi warna dari biru ke merah mencerminkan transformasi

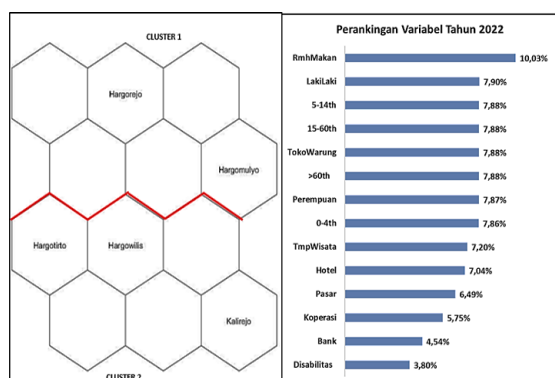
ekonomi dan sosial yang memperluas basis risiko: pertumbuhan sektor informal meningkatkan pendapatan sekaligus memperbesar dampak potensial longsor. Di sisi lain, ketahanan meningkat di wilayah dengan warna merah pada faktor infrastruktur formal, menunjukkan efektivitas intervensi pemerintah. Namun, disparitas tetap ada, terutama di daerah dengan ketergantungan tinggi pada sumber daya alam.

Secara keseluruhan, analisis ini menegaskan bahwa kerentanan sosial-ekonomi merupakan proses dinamis yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara faktor struktural dan kontekstual. Untuk strategi mitigasi yang responsif, diperlukan pemantauan berkala terhadap pergeseran prioritas risiko serta penguatan kolaborasi antara pemerintah, swasta, dan masyarakat dalam mengurangi ketimpangan akses layanan dan memperkuat kapasitas adaptasi kelompok rentan.

Clustering dan Variabel Dominan 2022 seperti halnya clustering dan variabel dominan tahun 2021, visualisasi clustering menggunakan Self Organizing Map (SOM) pada gambar U-Matrix memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana tingkat kerentanan di Kapnewon Kokap tahun 2022 dapat dikelompokkan berdasarkan kemiripan karakteristik sosial dan ekonomi. Dalam peta ini, setiap

wilayah direpresentasikan sebagai sebuah hexagon.

Visualisasi clustering menggunakan Self- Organizing Map (SOM) pada gambar U-Matrix tahun 2022 yang ditunjukkan pada gambar 7 memberikan wawasan mendalam tentang bagaimana tingkat kerentanan di Kapanewon Kokap dapat dikelompokkan berdasarkan kemiripan karakteristik sosial dan ekonomi dengan pendekatan unsupervised learning, SOM berhasil mengidentifikasi klaster- klaster unik yang merefleksikan dinamika kompleks antara faktor geografis, demografis, dan ekonomi lokal. Dengan demikian, visualisasi SOM ini menjadi alat penting untuk merancang intervensi mitigasi yang responsif terhadap konteks lokal, seperti prioritas pembangunan infrastruktur tahan bencana di klaster rentan atau program pelatihan kewirausahaan bagi komunitas di wilayah dengan potensi ekonomi formal yang meningkat.



Gambar 7. Clustering dan Variabel Dominan Kerentanan Tahun 2022

Gambar 7 menampilkan hasil analisis SOM untuk tahun 2022, yang membagi wilayah Kapanewon Kokap menjadi dua klaster berdasarkan pola kerentanan sosial-ekonomi terhadap bahaya longsor, sama seperti hasil tahun 2021. Klaster 1, meliputi desa-desa seperti Hargorejo dan Hargomulyo, memiliki warna lebih gelap pada *U-Matrix*, mengindikasikan tingkat kesamaan atribut yang kuat. Wilayah ini ditandai oleh topografi curam, keterbatasan infrastruktur, serta ketergantungan pada sektor informal seperti rumah makan (10,03%) dan dominasi laki-laki (7,90%), menjadikan faktor ekonomi informal dan dinamika gender sebagai penentu utama kerentanan.

Sebaliknya, Klaster 2 (Hargotirto, Hargowilis, Kalirejo) memiliki warna lebih terang, mencerminkan profil kerentanan yang lebih rendah dengan lokasi relatif datar, aksesibilitas lebih baik, serta potensi pengembangan ekonomi formal seperti tempat wisata (7,20%) dan hotel (7,04%). Dibandingkan tahun 2021, kontribusi variabel disabilitas menurun menjadi 3,80%, kemungkinan akibat perubahan demografi atau efektivitas intervensi mitigasi.

Di kedua klaster, dinamika sosial-ekonomi menunjukkan pergeseran fokus dari faktor struktural ke aspek ekonomi

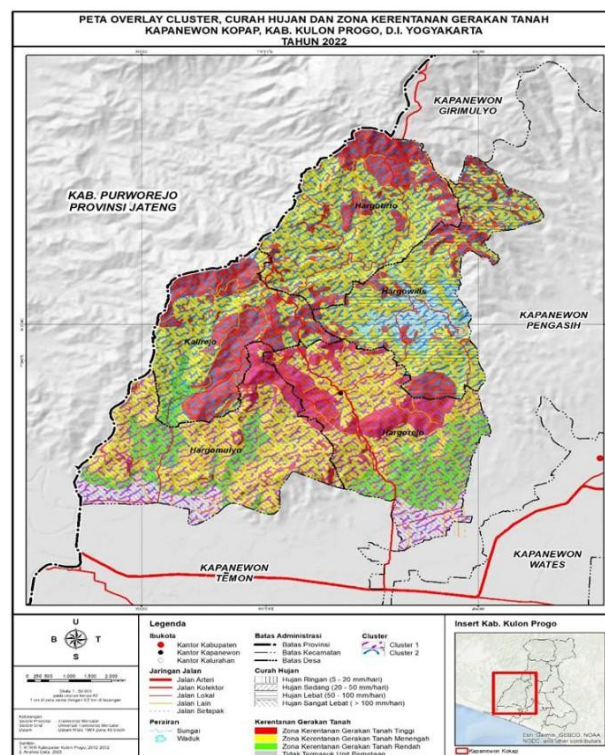
informal dan demografi. Di Klaster 1, ketergantungan pada rumah makan dan proporsi laki-laki yang tinggi menciptakan siklus risiko yang kompleks, sehingga memerlukan intervensi prioritas berupa pengembangan infrastruktur pariwisata ramah lingkungan dan pelatihan keselamatan kerja. Sementara itu, Klaster 2 memiliki potensi untuk memperkuat ketahanan melalui penguatan koperasi dan regulasi pembangunan wisata yang mempertimbangkan risiko geografis.

Kelompok usia 5–14 tahun (7,88%) juga menjadi fokus karena keterbatasan mobilitas dan kemampuan evakuasi darurat, terutama di area dengan warna gelap pada U-Matrix. Oleh karena itu, strategi mitigasi harus mencakup perlindungan khusus bagi anak-anak dalam rencana darurat.

Secara holistik, analisis ini menegaskan bahwa mitigasi bencana tidak hanya berfokus pada infrastruktur fisik, tetapi juga pada transformasi sistem ekonomi lokal dan adaptasi demografi. Klaster 1 memerlukan pendekatan ganda untuk memperkuat ketahanan fisik sekaligus melindungi kelompok rentan, sementara Klaster 2 dapat difokuskan pada pengembangan ekonomi formal yang inklusif dan berkelanjutan.

Hasil klasterisasi SOM selanjutnya dioverlay menggunakan SIG bersama data

administrasi dan curah hujan tahun 2022 untuk menghasilkan peta tematik sebaran kerentanan. Hasil overlay dapat dilihat pada Gambar 8.



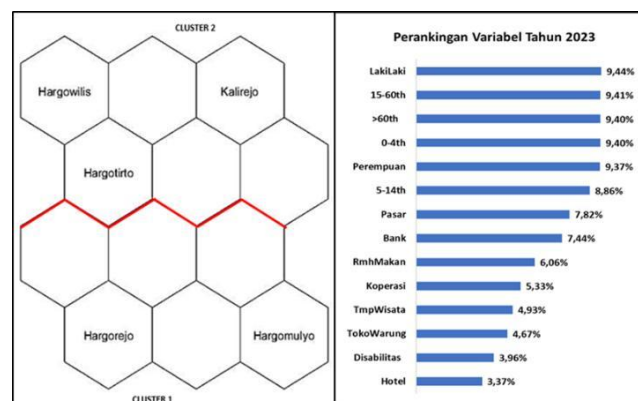
Gambar 8. Overlay Clustering Kerentan Sosial dan Ekonomi, Curah Hujan Gerakan tanah dengan GIS Tahun 2022

Gambar 8 menampilkan peta klaster kerentanan bencana longsor di Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY, berdasarkan data tahun 2022. Wilayah ini memiliki topografi berbukit dan terbagi menjadi lima desa: Hargomulyo, Hargorejo, Hargowilis, Hargotirto, dan Kalirejo. Pola distribusi curah hujan menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah Kokap memiliki intensitas sedang hingga sangat lebat (20–>100 mm/hari), yang direpresentasikan dengan arsiran

diagonal. Curah hujan tinggi ini berkontribusi pada risiko gerakan tanah yang signifikan di wilayah tersebut. Zona berwarna merah menggambarkan kerentanan gerakan tanah tinggi, terutama di bagian utara dan tengah, yaitu sekitar Hargotirto dan sebagian Kalirejo. Sementara itu, zona kuning-hijau mencerminkan kerentanan menengah hingga rendah, lebih dominan di bagian selatan. Peta ini menjadi alat penting untuk perencanaan mitigasi bencana dan pengelolaan tata ruang yang responsif bencana, mengingat kombinasi faktor topografi, curah hujan tinggi, dan kondisi geologi yang rentan terhadap longsor di Kapanewon Kokap.

Clustering dan Variabel Dominan Tahun 2023

Hasil analisis untuk tahun 2023 yang membagi wilayah Kapanewon Kokap menjadi dua kluster utama yaitu kluster 1 dan kluster 2 berdasarkan pola kerentanan sosial-ekonomi terhadap bahaya longsor, di mana setiap kluster merepresentasikan kelompok desa dengan karakteristik serupa sementara garis merah pada peta menunjukkan batas antar-kluster dengan tingkat dissimilarity tinggi sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 9



Gambar 9. Clustering dan Variabel Dominan Kerentanan Tahun 2023

Klasterisasi tahun 2023 dilakukan dengan mempertimbangkan interaksi kompleks antarvariabel sosial dan ekonomi yang saling terkait, sehingga menghasilkan kluster dengan profil kerentanan spesifik. Cluster 1, meliputi desa seperti Hargorejo dan Hargomulyo, memiliki warna lebih gelap pada U- Matrix, menunjukkan kesamaan atribut yang kuat serta tingkat kerentanan tinggi. Wilayah ini umumnya berada di lereng curam dengan infrastruktur dasar terbatas dan ketergantungan pada sektor informal seperti jasa fisik dan konstruksi. Faktor demografi menjadi penentu utama kerentanan, tercermin dari dominannya variabel Laki-laki (9,44%), disusul Kelompok Usia 15–60 tahun (9,41%), dan Lansia (>60 tahun) (9,40%).

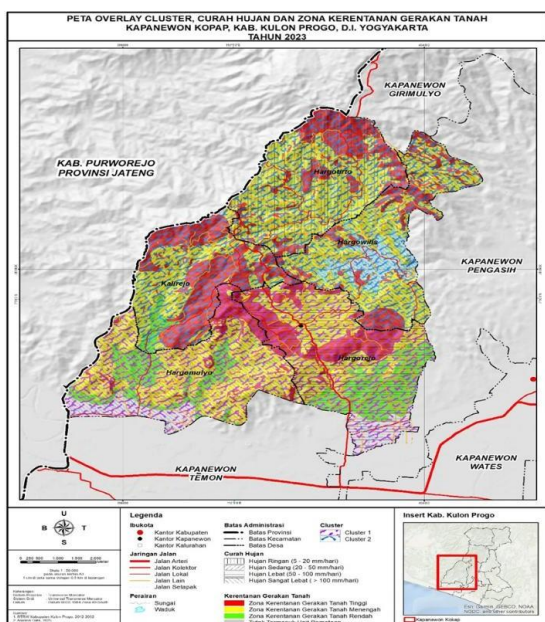
Sebaliknya, Cluster 2 (Hargowilis, Kalirejo, Hargotirto) ditandai oleh warna lebih terang, mencerminkan kerentanan

lebih rendah akibat topografi relatif datar, aksesibilitas infrastruktur yang lebih baik, serta potensi pengembangan ekonomi formal seperti Bank (7,04%) dan Pasar (7,20%) meskipun kontribusinya masih moderat. Klaster ini memiliki potensi untuk meningkatkan ketahanan melalui penguatan koperasi dan regulasi pengembangan pariwisata yang memperhitungkan risiko bencana.

Analisis juga mengungkap pentingnya perlindungan bagi kelompok rentan seperti Kelompok Usia 0–4 tahun (9,37%) dan Perempuan (9,37%), yang memiliki keterbatasan mobilitas dan peran penting dalam pengelolaan rumah tangga. Keduanya memerlukan skema mitigasi khusus dalam rencana darurat, terutama di wilayah dengan warna gelap pada U-Matrix.

Hasil ini menegaskan bahwa mitigasi bencana tidak hanya fokus pada infrastruktur fisik, tetapi juga transformasi sistem ekonomi lokal dan adaptasi demografi. Cluster 1 membutuhkan intervensi ganda penguatan infrastruktur sekaligus skema perlindungan sosial bagi kelompok rentan. Sementara itu, Cluster 2 dapat difokuskan pada pengembangan ekonomi formal yang inklusif dan berkelanjutan, tanpa meninggalkan masyarakat yang masih bergantung pada sektor informal.

Dengan memahami pola interaksi antar-klaster dan variabel dominan ini, pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dapat merancang kebijakan yang responsif terhadap risiko saat ini sekaligus antisipatif terhadap dinamika sosial-ekonomi di masa depan, guna membangun ketahanan komunitas yang berkelanjutan di wilayah rawan longsor. Hasil klasterisasi SOM selanjutnya di-overlay menggunakan SIG bersama data administrasi dan curah hujan tahun 2023 untuk menghasilkan peta tematik sebaran kerentanan. Hasil overlay dapat dilihat pada Gambar 10 yang menampilkan overlay dari beberapa lapisan informasi krusial. Pola curah hujan yang direpresentasikan melalui arsiran menunjukkan variasi dari hujan ringan (5-20 mm/hari) hingga hujan sangat lebat (>100 mm/hari) di berbagai bagian wilayah. Distribusi zona kerentanan gerakan tanah ditandai dengan warna merah untuk tingkat kerentanan tinggi yang dominan di bagian utara termasuk wilayah Hargotirto dan sebagian barat Kalirejo. Zona kerentanan menengah (warna kuning) tersebar luas di bagian tengah, sementara zona kerentanan rendah (warna hijau) lebih banyak terlihat di bagian selatan wilayah Hargomulyo.



Gambar 10. Overlay Clustering Kerentan Sosial dan Ekonomi, Curah Hujan Gerakan tanah dengan GIS Tahun 2023

Tren Clustering dan Variabel Dominan Tahun 2021, 2022 dan 2023

Analisis tren klasterisasi dan variabel dominan di Kapanewon Kokap selama periode 2021–2023 mengungkapkan dinamika kerentanan sosial- ekonomi yang kompleks. Penerapan SOM membagi wilayah menjadi dua klaster utama Cluster 1 dan Cluster 2 dengan karakteristik kontras yang mencerminkan pergeseran fokus risiko dari faktor infrastruktur dan kelompok rentan (2021) ke struktur demografi dan ekonomi informal (2022–2023).

Pada tahun 2021, Cluster 1 (Hargorejo, Hargomulyo, Hargotirto) ditandai oleh ketergantungan tinggi pada infrastruktur dasar seperti toko/warung

(18,98%) dan proporsi penyandang disabilitas yang signifikan (16,95%). Faktor ini menjadi penentu utama kerentanan, terutama di desa- desa dengan topografi curam dan akses terbatas. Sebaliknya, Cluster 2 (Kalirejo, Hargowilis) menunjukkan stabilitas lebih baik berkat lokasi relatif datar dan diversifikasi ekonomi.

Tahun 2022 mencatat pergeseran fokus ke sektor ekonomi informal dan struktur gender. Rumah makan (10,03%) dan laki-laki (7,90%) menjadi variabel dominan di Cluster 1, mengindikasikan pertumbuhan usaha mikro dan pariwisata yang rentan gangguan fisik. Di Cluster 2, tempat wisata (7,20%) dan hotel (7,04%) mulai menunjukkan potensi pengembangan ekonomi formal, meskipun kontribusinya masih moderat. Penurunan kontribusi variabel disabilitas (3,80%) mungkin menunjukkan peningkatan aksesibilitas atau perubahan komposisi populasi, tetapi tetap perlu pemantauan lebih lanjut.

Pada tahun 2023, faktor demografi menjadi penentu utama kerentanan, dengan laki-laki (9,44%), kelompok usia 15–60 tahun (9,41%), dan lansia (>60 tahun) (9,40%) mendominasi Cluster 1. Hal ini menegaskan bahwa struktur tenaga kerja dan usia memengaruhi kapasitas adaptasi

masyarakat: laki- laki usia produktif lebih terpapar risiko pekerjaan fisik, sementara lansia menghadapi hambatan mobilitas. Di Cluster 2, bank (7,44%) dan pasar (7,82%) mulai menjadi indikator ketahanan ekonomi, meski sektor informal seperti rumah makan (6,06%) dan wisata (4,93%) masih relevan. Penurunan kontribusi toko/warung (dari 18,98% pada 2021 menjadi 4,67% pada 2023) mengindikasikan perkembangan ekonomi formal sebagai substitusi sektor informal.

Secara keseluruhan, analisis ini menegaskan bahwa kerentanan sosial-ekonomi bukanlah fenomena statis, melainkan hasil interaksi dinamis antara faktor struktural (infrastruktur), ekonomi (sektor informal vs. formal), dan demografi (usia, gender). Cluster 1 tetap menjadi wilayah prioritas mitigasi, dengan kebutuhan untuk mengurangi ketergantungan pada sektor fisik yang rentan, meningkatkan akses layanan kesehatan bagi lansia, serta melibatkan laki-laki dalam pelatihan keselamatan kerja guna membangun ketahanan bencana yang lebih inklusif dan berkelanjutan.

Cluster 2 memiliki potensi untuk memperkuat ketahanan masyarakat melalui penguatan koperasi dan regulasi pengembangan wisata yang mempertimbangkan risiko geografis. Meski begitu, tantangannya adalah

memastikan bahwa pertumbuhan ekonomi formal tidak meninggalkan kelompok yang masih bergantung pada sektor informal.

Perubahan dominasi variabel dari Toko/Warung (2021) ke Rumah Makan (2022) dan akhirnya ke faktor demografi (2023) mengungkapkan transisi masyarakat dari ketergantungan pada infrastruktur dasar ke ekonomi informal, lalu ke struktur usia dan gender yang lebih kompleks. Di *Cluster 1*, ketergantungan pada tenaga kerja laki-laki dalam pekerjaan fisik seperti konstruksi menciptakan siklus risiko yang tinggi. Intervensi prioritas harus mencakup pelatihan keselamatan kerja, pengembangan alternatif mata pencaharian non-fisik, serta peningkatan akses layanan kesehatan bagi lansia.

Analisis ini menegaskan bahwa mitigasi bencana tidak hanya berfokus pada infrastruktur fisik, tetapi juga pada transformasi sistem ekonomi lokal dan adaptasi demografi. Cluster 1 memerlukan pendekatan ganda: penguatan ketahanan fisik sekaligus skema perlindungan sosial bagi kelompok rentan. Sementara itu, Cluster 2 dapat difokuskan pada pengembangan ekonomi formal yang inklusif dan berkelanjutan.

Dengan memahami pola interaksi antar-klaster dan variabel dominan, pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dapat merancang kebijakan

yang responsif terhadap risiko saat ini sekaligus antisipatif terhadap perubahan dinamis di masa depan, guna membangun ketahanan komunitas yang berkelanjutan tanpa mengabaikan konteks demografi dan ekonomi lokal.

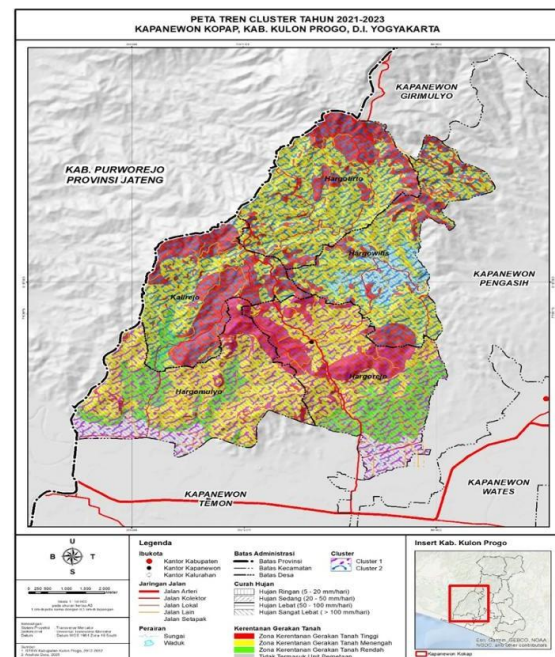
Hasil tren klasterisasi kerentanan dengan metode SOM selanjutnya di-overlay menggunakan SIG untuk menghasilkan peta tematik sebaran risiko. Hasil overlay dapat dilihat pada Gambar 11. merupakan Peta tren klaster tahun 2021–2023 menunjukkan pola persebaran kerentanan gerakan tanah yang konsisten di Kapanewon Kokap, Kabupaten Kulon Progo, DIY. Wilayah utara, terutama Hargotirto dan perbatasan dengan Girimulyo, secara stabil berada dalam zona kerentanan tinggi (warna merah), dipengaruhi oleh topografi berbukit dan curah hujan lebat (>50 mm/hari). Kluster ini membentuk area solid selama tiga tahun pengamatan.

Wilayah barat, terutama Kalirejo, juga menunjukkan kerentanan tinggi yang membentang mengikuti kontur lereng. Zona ini berkorelasi kuat dengan intensitas hujan lebat hingga sangat lebat, memperkuat risiko gerakan tanah.

Area tengah (sebagian Hargowilis dan Hargorejo) didominasi oleh kerentanan menengah (warna kuning) dengan stabilitas relatif tinggi sepanjang periode

penelitian, meski ada sedikit fluktuasi musiman. Sementara itu, bagian selatan, terutama Hargomulyo, didominasi oleh zona kerentanan rendah (warna hijau) yang luas dan kohesif, meski pada batasannya terdapat titik transisi ke kerentanan menengah.

Yang menarik adalah keberadaan Cluster 1 dan Cluster 2 yang konsisten selama tiga tahun, mencerminkan karakteristik unik kombinasi faktor topografi, geologi, dan hidrologi. Jaringan jalan yang melintasi wilayah berbeda rentan bencana menunjukkan variasi risiko sesuai dengan klaster kerentanan yang dilaluinya. Jalan di zona utara dan barat (kerentanan tinggi) memiliki risiko lebih besar terdampak longsor dibandingkan jalan di bagian selatan.



Gambar 11. Overlay Clustering Kerentan Sosial dan Ekonomi, Curah Hujan,

Gerakan tanah dengan GIS Tahun 2021-2023

Integrasi Multisektoral sebagai Kunci Ketahanan

Rekomendasi mitigasi dan kesiapsiagaan bencana di Kapanewon Kokap harus dirancang secara holistik, berdasarkan dinamika kerentanan yang teridentifikasi melalui analisis SOM selama periode 2021–2023. Perubahan pola kerentanan dari ketergantungan pada infrastruktur dasar dan kelompok rentan (2021), ke sektor ekonomi informal dan struktur gender (2022), hingga dominasi faktor demografi seperti usia dan tenaga kerja fisik (2023), menunjukkan perlunya strategi yang tidak sektoral, melainkan terintegrasi dalam tiga pilar utama.

Langkah-langkah kolaboratif yang melibatkan pemerintah daerah, swasta, masyarakat, dan lembaga pendidikan harus dilakukan. Penguatan infrastruktur fisik perlu dibarengi dengan pengembangan ekonomi inklusif untuk mengurangi ketergantungan pada sektor rentan, sementara edukasi mitigasi harus didukung teknologi pembelajaran mesin agar respons lebih adaptif dan berbasis data. Adapun langkah- langkah yang harus dilakukan adalah:

Penguatan Infrastruktur Tahan Bencana yang Responsif terhadap Klaster dan Variabel Dominan

Langkah pertama dalam mitigasi bencana adalah memprioritaskan pembangunan infrastruktur yang sesuai dengan profil klaster dan variabel dominan di setiap wilayah. *Cluster 1* (Hargorejo, Hargomulyo), yang konsisten berada dalam kategori kerentanan tinggi selama tiga tahun terakhir, memerlukan intervensi infrastruktur fisik langsung untuk mengatasi faktor risiko utamanya. Mengingat toko/warung dan rumah makan menjadi indikator kritis pada 2021–2022, pengembangan pasar lokal tahan bencana dengan cadangan pangan dan sistem logistik darurat harus diprioritaskan guna memastikan akses layanan dasar tetap terjaga saat bencana terjadi.

Selain itu, jalan evakuasi inklusif perlu dikembangkan di wilayah dengan proporsi penyandang disabilitas dan lansia yang tinggi, dilengkapi desain yang memperhatikan mobilitas kelompok rentan seperti trotoar bertekstur, tangga darurat, atau jalur evakuasi berundak. Di sisi lain, Cluster 2 (Kalirejo, Hargowilis), yang memiliki potensi ekonomi formal lebih baik seperti bank dan pasar pada 2023 membutuhkan pengembangan infrastruktur pendukung pariwisata dan ekonomi berkelanjutan yang mempertimbangkan

risiko geografis. Regulasi pembangunan wisata harus mensyaratkan analisis risiko longsor dan penggunaan material konstruksi ramah lingkungan untuk mengurangi tekanan pada lereng. Integrasi antara pemerintah daerah, akademisi, dan lembaga teknis seperti Badan Geologi menjadi penting untuk memastikan infrastruktur tidak hanya tahan bencana, tetapi juga adaptif terhadap perubahan iklim dan dinamika sosial-ekonomi.

Diversifikasi Ekonomi Inklusif untuk Mengurangi Ketergantungan pada Sektor Rentan

Analisis SOM menunjukkan bahwa sektor informal seperti rumah makan (2022) dan tenaga kerja laki-laki (2022–2023) menjadi faktor risiko signifikan di Cluster 1, karena aktivitasnya rentan terganggu oleh longsor. Untuk mengurangi ketergantungan pada sektor ini, perlu dirancang program pemberdayaan ekonomi yang mengalihkan mata pencaharian ke bidang lebih tahan bencana, seperti agroforestri berkelanjutan, kerajinan lokal, atau pariwisata edukasi mitigasi bencana. Program tersebut dapat dikembangkan melalui koperasi desa, yang pada tahun 2023 mulai berperan sebagai indikator ketahanan ekonomi, dengan dukungan pelatihan teknis dan akses pembiayaan mikro dari lembaga formal.

Di Cluster 2, fokus harus dialihkan ke pengembangan ekonomi formal yang inklusif salah satunya melalui penguatan koperasi sebagai wadah distribusi logistik darurat dan pengelola dana ketahanan bencana. Contohnya, koperasi dapat menyediakan stok pangan dan obat-obatan yang mudah diakses saat bencana, serta menjadi pusat pelatihan manajemen risiko bagi masyarakat.

Integrasi antar sektor informal dan formal harus didukung kebijakan daerah, seperti subsidi pajak untuk usaha kecil yang menerapkan prinsip mitigasi bencana dan insentif bagi koperasi yang aktif dalam adaptasi iklim dan ketahanan komunitas.

Peningkatan Kapasitas Adaptasi Sosial melalui Edukasi dan Partisipasi Komunitas

Kerentanan sosial dan ekonomi tidak hanya dipengaruhi oleh infrastruktur atau ekonomi, tetapi juga oleh kesadaran dan partisipasi masyarakat dalam mitigasi bencana. Analisis SOM menunjukkan bahwa kelompok usia muda dan lansia (2022–2023) menjadi fokus karena keterbatasan mobilitas mereka, sementara laki-laki dalam usia produktif (2022–2023) memiliki risiko paparan fisik tinggi. Untuk mengatasi ini, program edukasi mitigasi harus dirancang secara spesifik untuk setiap kelompok usia dan gender.

Misalnya, pelatihan evakuasi darurat harus melibatkan simulasi yang mempertimbangkan kebutuhan penyandang disabilitas dan lansia, sementara laki-laki dalam sektor fisik perlu diberikan pelatihan keselamatan kerja dan kesadaran akan risiko geofisik. Selain itu, partisipasi komunitas dalam perencanaan mitigasi harus diperkuat melalui forum desa tangguh bencana yang melibatkan tokoh adat, pemuda, perempuan, dan kelompok rentan. Forum ini dapat menjadi platform untuk merancang rencana darurat yang sesuai dengan konteks lokal, seperti penentuan titik evakuasi alternatif atau pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan. Integrasi antara pemerintah desa, organisasi non- pemerintah, dan akademisi diperlukan untuk memastikan program edukasi tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga praktis dan relevan dengan kondisi lapangan.

Penggunaan Teknologi Pembelajaran Mesin untuk Monitoring Dinamis dan Perencanaan Antisipatif.

Dinamika kerentanan yang terus berubah dari fokus pada infrastruktur dasar

KESIMPULAN

Identifikasi klaster kerentanan sosial-ekonomi di Kapanewon Kokap berhasil membagi wilayah menjadi dua kelompok utama. Klaster 1 (Hargorejo dan

(2021) ke ekonomi informal (2022) dan demografi (2023)—menegaskan perlunya sistem monitoring yang dinamis untuk mendeteksi pergeseran risiko secara real-time. teknologi pembelajaran mesin seperti som dapat dimanfaatkan untuk menganalisis data spasial dan sosial-ekonomi secara berkala, sehingga pemerintah daerah mampu merancang kebijakan antisipatif. misalnya, jika data menunjukkan peningkatan kontribusi variabel seperti tempat wisata atau bank, kebijakan mitigasi harus segera menyesuaikan fokusnya ke pengembangan infrastruktur wisata yang aman bencana atau pengelolaan dana darurat melalui lembaga keuangan formal.

Integrasi teknologi ini harus didukung oleh database terpadu yang mencakup data geografis, demografi, dan ekonomi, serta diakses oleh semua pemangku kepentingan. Selain itu, pelatihan teknis bagi aparat desa dan staf pemerintah daerah diperlukan untuk memastikan pemanfaatan teknologi ini tidak hanya terbatas pada analisis akademis, tetapi juga menjadi alat pengambilan keputusan operasional.

Hargomulyo) tergolong wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi, dipengaruhi oleh kombinasi topografi curam, ketergantungan pada infrastruktur dasar yang terbatas, serta dominasi kelompok

rentan seperti lansia dan penyandang disabilitas. Sebaliknya, Klaster 2 (Kalirejo, Hargowilis, Hargetirto) menunjukkan tingkat kerentanan lebih rendah, ditopang oleh potensi ekonomi formal seperti keberadaan pasar dan lembaga keuangan, serta kondisi geografis yang lebih landai.

Analisis tren 2021–2023 menunjukkan perubahan faktor dominan penyebab kerentanan. Pada 2021, ketergantungan pada toko/warung (18,98%) dan keberadaan kelompok disabilitas (16,95%) menjadi faktor utama. Tahun 2022, sektor informal (10,03%) dan proporsi laki-laki (7,90%) mulai mengambil peran signifikan. Memasuki 2023, variabel demografi seperti kelompok usia produktif dan lansia semakin memengaruhi kapasitas adaptasi masyarakat, menandakan perlunya pendekatan mitigasi yang menyesuaikan dinamika sosial dan ekonomi lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Adrian. (2016). Model Spasial Kerentanan Dikawasan Pesisir Selatan Teluk Betung Kota Bandar Lampung Terhadap Bencana Tsunami. *Jurnal SPATIAL Wahana Komunikasi dan Informasi Geografi*, 15(1), 23–28. <https://doi.org/10.21009/spatial.151.04>
- Agrawal, N., Gupta, L., & Dixit, J. (2021). Assessment of the Socioeconomic Vulnerability to Seismic Hazards in the National Capital Region of India Using Factor Analysis. *Sustainability (Switzerland)*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/su13179652>
- Aisha, M., Miladan, N., & Utomo, R. P. (2019). Kajian Kerentanan Bencana pada Kawasan Berisiko Banjir DAS Pepe Hilir, Surakarta. *Jurnal Pembangunan Wilayah Dan Perencanaan Partisipatif*, Vol. 12, hal. 205-2019.
- Akhirianto Novian Andri dan Naryanto Sri Heru. Kajian Kapasitas Dan Persepsi Masyarakat Terhadap Bencana Tanah Longsor Di Desa Margamukti, Kapanewon Pangelangan, Kabupaten Bandung. *Jurnal Riset Kebencanaan Indonesia* Vol. 2 No. 2, Oktober 2016: 117-126
- Akinduko, A. A., & Mirkes, E. M. (2019). Parameterless growing self-organizing maps for large data analysis. *Neural Networks*, 119, 200-218.
- Akiya, A. N. (2017). Bimbingan Kelompok dalam Meningkatkan Kepekaan Sosial Siswa MAN 4 Bantul Yogyakarta. Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga.
- Ahsanti, A., & Husen, A. (2022). Pengelolaan Sampah Berbasis Masyarakat dalam Mitigasi Perubahan Iklim: Suatu Telaah Sistematis. *JGG-Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 11(1), 19–26.
- Anwar Hidayat (2017), Metode Penelitian Adalah: Pengertian, Tujuan, Jenis, Manfaat, Contoh. <https://www.statistikian.com/2017/02/metode-penelitian-metodologi-penelitian.html>
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Kulon Progo, (2016). Daerah Rawan Longsor di Kabupaten Kulon Progo, [online] www.bpbd.kulonprogokab.go.id. id [16 Mei 2017]
- Bigandata, Y. (2021). Kerentanan Sosial Dan Ekonomi Pada Bencana Banjir di Kelurahan Sutojayan Kabupaten Blitar [Univeritas Pembangunan Nasional Veteran Yogyakarta].

- <https://doi.org/10.20961/ijed.v2i1.688>
- Brown, A., Dayal, A., & Del Rio, C. R. (2012). From practice to theory: emerging lessons from Asia for building urban climate change resilience. *Environment and Urbanization*, 24(2)
- Cutter, S. L., Derakhshan, S., & Cutler, H. (2023). Social Vulnerability to Environmental Hazards. *International Journal of Disaster Risk Science*, 14(1), 1-12.
- Dar, R. U. N., & Alam, M. (2020). Understanding Disaster Risk, Its Components and Reduction. *International Conference On Building Resilient and Sustainable Societies: Emerging Social and Economic Challenges*, December. https://www.researchgate.net/profile/Rouf-Un-Nabi-Dar/publication/346935377_Understanding_Disaster_Risk_its_components_and_reduction/links/1b323de590a0b7ed6352ac7/Understanding-Disaster-Risk-its-components-and-reduction.pdf
- Dian Adhietya Arif, Djati Mardiatna, Sri Rum Giyarsih. (2017). Kerentanan Masyarakat Perkotaan terhadap Bahaya Banjir di Kelurahan Legok, Kapanewon Telanipura, Kota Jambi. *Jurnal Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada*, Yogyakarta
- Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council, *Official Journal of the European Union*, (2007)
- Fadhilah, Zamia Riska. (2015). Analisis Tingkat Bahaya dan Kerentanan Banjir di SUB Daerah Aliran Sungai Cipinang, Jakarta Timur. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada
- Firda Miranti H. Usup, 2019, Analisis Aspek Kebencanaan Di Kapanewon Bolangitang Barat Kabupaten Bolaang Mongondow Utara, *Jurnal Spasial* Vol 6. No. 1, 2019. *Jurnal Spasial* Vol 6.No. 1, 2019.
- Fitriawati, F., & Suroso, D. S. A. (2023). Penerapan Prinsip Ekowisata dalam Penyelenggaraan Pariwisata Alam di Taman Wisata Alam (TWA) Kawah Ijen. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 12(1), 1–21. <https://doi.org/10.21009/10.21009/jgg.v12i1.01>
- Fritzke, B. (1995). A growing neural gas network learns topologies. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 7, 625-632.
- Ghasemian, F., Rahim, M. S. M., & Noor, N. M. (2020). Integration of self-organizing maps and deep learning for image classification. *Neural Computing and Applications*, 32, 14209-14223.
- Hakim, H., & Endangsih, T. (2023). Studi Penerapan Sky Garden pada Rumah Susun Jatinegara Barat. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 12(2), 139–155. <https://doi.org/10.21009/jgg.v12i2.04>
- Hartono, 2016. Pengertian Banjir. *Ilmu Geografi*, <https://ilmugeografi.com/bencana-alam/banjir-rob>
- Hasan, M., Kotov, A., Carcone, A. I., Dong, M., Naar, S., & Hartlieb, K. B. (2020). A deep learning approach to predicting behavioral codes from transcripts of patient-provider communication. *IEEE Access*, 8, 112078-112088.
- Hidayat, H., Hamzah, A. H. P., & Hasrianti, H. (2024). Implementasi Konsep Ekonomi Sirkular Untuk Mewujudkan Industri Karet Remah Berkelanjutan. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.21009/jgg.141.001>
- Hizbaron, D. R., Hadmoko, D. S., Samodra, G., Dalimunthe, S. A., dan

- Sartohadi, J. 2010. Tinjauan Kerentanan, Risiko dan Zonasi Rawan Bahaya Rockfall di Kapanewon Kokap, Yogyakarta. *Forum Geografi*, Vol 24, No.2 : 119-136.
- Josiana, G. R., & Hizbaron, D. R. (2019). Kajian Kerentanan Sosial dan Ekonomi Masyarakat Pesisir terhadap Erosi Pantai di Pantai Trisik, Kapanewon Kokap, DIY. *Jurnal Bumi Indonesia*, 8(2).
- Kappes, M. S., Keiler, M., von Elverfeldt, K., & Glade, T. (2012). Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*, 64(2), 1925-1958.
- Kaski, S., & Kohonen, T. (2022). Self-Organizing Maps for Socio-Economic Analysis. In *Handbook of Neural Computation* (pp. 309-327). Academic Press.
- Kohonen, T. (2013). Essentials of the self-organizing map. *Neural Networks*, 37, 52-65.
- T. L. Saaty, "How to make a decision: the analytic hierarchy process," *Eur. J. Oper. Res.*, 1990, doi: 10.1016/0377-2217(90)90057
- Li, X., Zhang, C., & Li, W. (2021). Building block level urban area social vulnerability assessment and visualization: A case study of Wuhan, China. *Sustainable Cities and Society*, 72, 103042.
- Liu, Y., Li, Z., Xiong, H., Gao, X., & Wu, J. (2021). Adaptive growing self-organizing maps for online learning and visualization. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 32(7), 3044-3056
- Maharani, Y. N., & Lee, S. (2017). Assessment of Social Vulnerability to Natural Hazards in South Korea: Case Study for Typhoon Hazard. *Spatial Information Research*, 25(1), 99-116.
<https://doi.org/10.1007/s41324-017-0082-x>
- Maharani, Y. N., Lee, S., & Ki, S. J. (2016). Social Vulnerability at a Local Level Around the Merapi Volcano. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 20(Juli), 63-77.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.012>
- Mintarjo, Sri. (2018). Waspada Tanah Longsor. Bandung: Pakar Raya
- Mochamad. (2013). Governance Dan Capacity Building Dalam Manajemen Bencana Banjir Di Indonesia. *Jurnal Penanggulangan Bencana* Vol. 4 No.2 tahun 2013. hal 69-76
- Muhammad Rizal Pahleviannur et al, 2(023). Kerentanan Sosial Ekonomi terhadap Bencana Banjir di Hilir DAS Citanduy Bagian Barat Kabupaten Pangandaran Jawa Barat, *Media Komunikasi Geografi* 24 (2), 189-205 P-ISSN 0216-8138 | E-ISSN 2580-0183 MKG Vol. 24, No.2, Desember 2023 (189 – 205) DOI: <https://doi.org/10.23887/mkg.v24i2.66370> Nemes, L., & Butcher, A. (2021). Self-organizing maps for vulnerability assessment: A review and critique. *Progress in Human Geography*, 45(4), 788-810.
- Naryanto, Sri Heru. 2017. Analisis Kejadian Bencana Tanah Longsor Tanggal 12 Desember 2014 Di Dusun Jemblung, Desa Sampang, Kapanewon Karangobar, Kabupaten Banjarnegara, Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Alami*, Vol. 1, No. 1.
- Paimin. (2009), "Teknik Mitigasi Bencana Banjir an Tanah Longsor", *Tropenbos International Indonesia Programme*. Hal 19 Pemerintah Kapanewon Kokap.
<https://kulonprogokab.go.id/v31/detil/7670/geogr%20afis>

- Perka BNPB Nomor 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana
- PNBP (2017). Tanah Longsor dan Banjir Bencana yang Mematikan di Indonesia
- Pratiwi, N. AH., 2009. Pola Migrasi Masyarakat Sebagai Akibat Perubahan Iklim Global Jangka pendek (Tugas Akhir Tidak diterbitkan). Semarang, UNDIP
- Purnomo, N. H. 2012. Risiko Bencana Longsorlahan Pada Lahan Pertanian di Wilayah Kompleks Gunungapi Strato Kuarter Arjuno Jawa Timur (Doctoral dissertation, Universitas Gadjah Mada) Rachmat, Reza Adhe dan Pamungkas, Adjie. (2014). Faktor-faktor Kerentanan yang Berpengaruh Terhadap Bencana Banjir di Kapanewon Manggala Kota Makassar. *Jurnal Teknik Pomits*. 3 (2), hlm. 178-183
- Rahayu, S. et al., 2009. Monitoring Air di Daerah Aliran Sungai. Bogor: ICRAF Asia Tenggara
- Rahmaningtyas, N., & Setyono, J. S. (2015). Tingkat Kerentanan Sosial Wilayah Kabupaten Wonogiri. *Teknik PWK (Perencanaan Wilayah Kota)*, 4(4), 653–665.
- Rahmat, P. N., & Giyarsih, S. R. (2014). Penilaian Kerentanan Fisik, Sosial dan Ekonomi DusunDusun di Sekitar Kali Putih terhadap Banjir Lahar Gunungapi Merapi. Universitas Gadjah Mada
- Refda Chairunnisa, 2023, Kajian Kerentanan Ekonomi Akibat Banjir Rob Di Pulau Pasaran, Fakultas Teknik Universitas Lampung Bandar Lampung 2023
- Renhard Haribulan et all (2019). Kajian Kerentanan Fisik Bencana Longsor Di Kapanewon Tomohon Utara.,*Jurnal Spasial* Vol 6. No. 3, 2019
- Rina hayati, 2021. Macam-Macam Metode Penelitian.,
<https://www.myusro.id/?p=1157>
- Rizsa Putri Danianti Dan Sariffuddin (2015), Tingkat Kerentanan Masyarakat Terhadap Bencana Banjir Di Perumnas Tlogosari, Kota Semarang
<https://ejournal2.undip.ac.id/index.php/jpk/article/view/174/html>.
- Sadewo, E. (2018). Dampak Post-Suburbanisasi Dan Pertumbuhan Perkotaan Di Kawasan Pinggiran Metropolitan Jabodetabek Terhadap Kerentanan Bencana Banjir. *Jurnal Green Growth dan Manajemen Lingkungan*, 7(1), 1–21.
<https://doi.org/10.21009/jgg.071.01>
- Shahabi H, Hashim M. 2015. Landslide Susceptibility Mapping Using GIS-based Statistical Models and Remote Sensing Data in Tropical Environment. *Scientific Reports. Malaysia (MY): Universiti Teknologi Malaysia*.
- Situmorang. 2013. Kajian Keterpaduan Kegiatan Pengelolaan Lingkungan Pesisir Di Kelurahan Mangunharjo Kota Semarang. Tugas Akhir Universitas Diponegoro.
- Sugiarto, M. 2017. Metodologi Penelitian Bisnis. Yogyakarta: Andi.
- Sugiyono, 2013, Metodologi Penelitian Kuantitatif, Kualitatif Dan R&D. (Bandung: ALFABETA)
- Supriadi, A., Rustandi, A., Hastuti, D., & Ardiani, G.
- T. (2018). Analytical Hierarchy Process (AHP) Teknik Penentuan Strategi Daya Saing Kerajinan Bordir. Yogyakarta: Cv. Budi Utama
- Supriyono, Primus. 2014. Seri Pendidikan Pengurangan Risiko Bencana Tanah Longsor. Yogyakarta: Andi Yogyakarta.
- Suryanto, S., Hadi, S. P., & Manaf, A. (2024). Micro- geographical analysis of social vulnerability in Yogyakarta Special Region: Implications for

- local development planning. *Indonesian Journal of Geography*, 56(1), 68-79.
- Susanti, Pranatasari Dyah. Arina Miardini, Arina dan Harjadi Beny. 2017. Analisis Kerentanan Tanah Longsor Sebagai Dasar Mitigasi di Kabupaten Banjarnegara. *Journal of Watershed Management Research*. Vol. 1 No. 1: 49-59
- Tamtomo, A. Y., & Priyana, Y. (2020). Analisis Kerentanan Sosial dan Ekonomi terhadap Bencana Banjir Sungai Dengkeng di Kapanewon Cawas Kabupaten Klaten. Universitas Muhammadiyah Surakarta
- Ultsch, A., & Siemon, H. P. (1990). Kohonen's self organizing feature maps for exploratory data analysis. In *Proceedings of the International Neural Network Conference (INNC-90)* (pp. 305- 308).
- UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2017). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva: UNISDR
- Usamah, M., Handmer, J., Mitchell, D., & Ahmed, I. (2014). Can the vulnerable be resilient? Co- existence of vulnerability and disaster resilience: Informal settlements in the Philippines. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10.
- Vesanto, J., & Alhoniemi, E. (2000). Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 11(3), 586-600.
- Vesanto, J., & Alhoniemi, E. (2020). Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 31(3), 586-600.
- Wahyuni, Eldina Fatimah, Azmeri. (2015). Analisis Tingkat Kerentanan dan Kapasitas Masyarakat terhadap Bahaya Banjir Bandang Kapanewon Celala Kabupaten Aceh Tengah. *Jurnal Ilmu Kebencanaan Unsiyah* hlm 33-40 Volume 2 No.3.
- Wignyosukarto, 2007, Kajian Kerentanan di Kawasan Permukiman Rawan Bencana Kapanewon Semarang Barat, Kota Semarang. "Penelitian" Mukhammad Arief dan Bitta Pigawati Winarno. 2013. *Metodologi Penelitian dalam Pendidikan Jasmani*. alang: UM Press.
- Yin, H. (2008). *The self-organizing maps: Background, theories, extensions and applications*. In *Computational intelligence: A compendium* (pp. 715-762). Springer, Berlin, Heidelberg.