

Pemetaan Zona Kerawanan Tsunami Berbasis GIS Sebagai Langkah Strategis Dalam Mitigasi Di Wilayah Pesisir Kabupaten Malang

Muhammad Nurul Huda^{1*}, Nur Kahfi Mukhlisin Anwar¹, Dan Solihan¹

¹Program Studi Geografi, Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Malang, Kota Malang, Jawa Timur, Indonesia

*E-mail: muhammad.nurul.2307226@students.um.ac.id

Received: 17 01 2025 / Accepted: 23 12 2025 / Published online: 21 01 2026

ABSTRAK

Kabupaten Malang berada di kawasan pesisir selatan Jawa yang berhadapan langsung dengan Samudra Hindia dan dipengaruhi aktivitas subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia. Kondisi ini menjadikan wilayah tersebut termasuk dalam zona rawan tsunami yang memerlukan analisis kerawanan secara spasial. Penelitian ini bertujuan memetakan tingkat kerawanan tsunami serta menyusun arahan mitigasi berbasis data geospasial. Metode penelitian menggunakan pendekatan sistem informasi geografis (SIG) dengan pemanfaatan data *Digital Elevation Model Nasional* (DEMNAS) dan citra Sentinel-2A. Empat parameter yang dianalisis mencakup elevasi, kemiringan lereng, jarak terhadap sungai, dan jarak terhadap garis pantai. Setiap parameter diolah menggunakan metode *scoring-weighting* untuk menghasilkan peta zonasi kerawanan. Hasil pemetaan menunjukkan bahwa zona sangat rawan tersebar di Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur. Karakteristik wilayah pada zona tersebut didominasi bentuk lahan datar dengan elevasi di bawah sepuluh meter dan jarak pantai kurang dari lima ratus meter. Analisis spasial ini menjadi dasar dalam penentuan wilayah prioritas mitigasi tsunami di Kabupaten Malang, mencakup penguatan infrastruktur pelindung, penataan jalur evakuasi, serta pengelolaan ekosistem pantai.

Kata Kunci: Tsunami, GIS, Kerawanan Pesisir, Mitigasi Bencana, Kabupaten Malang

ABSTRACT

The southern coastal region of Malang Regency faces the Indian Ocean and lies along the active subduction zone between the Indo-Australian and Eurasian Plates. This geological setting places the area within a high-risk tsunami zone that requires spatial-based vulnerability assessment. This study aims to map tsunami hazard zones and develop spatially based mitigation strategies. A geographic information system (GIS) approach was applied using Digital Elevation Model Nasional (DEMNAS) and Sentinel-2A imagery as the main datasets. Four parameters were analyzed, including elevation, slope, distance to rivers, and distance to the shoreline. Each parameter was processed using the *scoring-weighting* method to produce a tsunami vulnerability zonation map. The results show that areas classified as highly vulnerable are concentrated in Sumbermanjing Wetan, Gedangan, and Bantur Districts. These locations are characterized by low elevation, flat topography, and proximity of less than five hundred meters to the coastline. The spatial analysis provides a reference for identifying tsunami-prone areas and determining priority locations for disaster mitigation efforts, including infrastructure strengthening, evacuation route planning, and coastal ecosystem management.

Keywords: Tsunami, GIS, Coastal Vulnerability, Disaster Mitigation, Malang Regency

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu wilayah paling rawan tsunami di dunia karena berada di pertemuan empat lempeng aktif, yaitu Eurasia, Indo-Australia, Pasifik, dan Filipina, yang menghasilkan aktivitas seismik tinggi serta zona subduksi panjang dari Sumatra hingga Papua. Kondisi tektonik ini memicu potensi guncangan besar di dasar laut yang dapat memicu deformasi vertikal dan menghasilkan gelombang tsunami berskala destruktif. Menurut data dari Yudhicara (2023), sejak tahun 416 hingga 2021, catatan menunjukkan lebih dari seratus kejadian tsunami telah melanda wilayah kepulauan Indonesia, menimbulkan korban jiwa dan kerugian besar, seperti peristiwa Aceh 2004, Pangandaran 2006, dan Palu 2018. Bencana Palu menjadi bukti bahwa tsunami tidak hanya disebabkan oleh gempa megathrust, tetapi juga dapat dipicu oleh longsoran bawah laut yang memperkuat energi gelombang di wilayah sempit, memperparah dampak pada daerah pesisir padat penduduk. Sekitar 65 persen populasi Indonesia tinggal di zona pesisir yang berdekatan dengan sumber gempa aktif, sehingga ancaman tsunami bukan lagi risiko hipotetik melainkan bahaya nyata yang berulang. Kawasan selatan Pulau Jawa, khususnya pesisir Kabupaten Malang, terletak tepat di depan zona subduksi Indo-Australia–Eurasia yang dikenal memiliki segmen *megathrust* aktif dan berpotensi menghasilkan gelombang tsunami tinggi dalam waktu evakuasi yang sangat singkat. Menurut Dokumen KRB Nasional Provinsi Jawa Timur 2022 - 2026, Kabupaten Malang menempati urutan ke 5 Kabupaten di Jawa Timur yang memiliki potensi tsunami terbesar (Tabel 1). Situasi tersebut menuntut strategi mitigasi berbasis kajian spasial untuk mengidentifikasi tingkat kerentanan wilayah pesisir secara akurat dan menyusun langkah pengurangan risiko

yang efektif, terutama melalui pemanfaatan sistem informasi geografis (GIS) sebagai pendekatan utama dalam pemetaan bahaya tsunami.

Penelitian mengenai pemetaan dan penilaian kerentanan tsunami berbasis GIS telah berkembang pesat di berbagai wilayah pesisir dunia dan memperlihatkan pentingnya integrasi data geospasial dan pendekatan multi-kriteria dalam mitigasi bencana. Biswas dan Sila (2023) menegaskan bahwa pemetaan kerentanan tsunami berbasis GIS di pesisir timur India efektif menilai risiko berdasarkan parameter ketinggian, kemiringan lereng, kepadatan penduduk, jarak pantai, serta penggunaan lahan. Penerapan metode *Analytic Hierarchy Process* (AHP) dalam studi tersebut menghasilkan peta yang menggambarkan tingkat kerentanan secara akurat dan dapat digunakan untuk mendukung perencanaan mitigasi awal. Penelitian di Malang oleh Irawan et al. (2024) memperkuat hal ini dengan menunjukkan kemampuan GIS dalam memprediksi area genangan tsunami secara rinci melalui pemodelan topografi menggunakan data *Digital Elevation Model* (DEM) ALOS PALSAR, di mana skenario ketinggian gelombang 10, 15, dan 20 meter menunjukkan kerentanan tinggi di wilayah pesisir selatan Kabupaten Malang. Sementara itu, Lessy dan Sabar (2021) di Maluku Utara memanfaatkan overlay peta tematik untuk mengidentifikasi area rawan tsunami berdasarkan faktor elevasi, kemiringan, jarak sungai, dan jarak garis pantai, yang hasilnya mendukung perencanaan dokumen penilaian risiko bencana di tingkat lokal. Kajian lain oleh Jitt-Aer et al. (2022) menyoroti penggunaan GIS dan metode *dasymetric mapping* untuk mengestimasi populasi terdampak tsunami di Phuket, Thailand, guna meningkatkan efektivitas logistik kemanusiaan. Dari sisi teknologi data, Amra et al. (2025) memperkenalkan pemanfaatan *error-*

reduced Digital Elevation Models (DEMs) seperti FABDEM dan DiluviumDEM yang mampu meningkatkan akurasi pemodelan genangan tsunami pada wilayah dataran rendah. Selain pemetaan genangan, pendekatan mitigasi berbasis evakuasi juga banyak dikembangkan, seperti penelitian Bonilauri et al. (2021) di Pulau Stromboli, Italia, yang menggunakan GIS untuk menentukan waktu dan rute evakuasi tercepat menuju zona aman berdasarkan model makroskopik. Hasil-hasil penelitian tersebut memperlihatkan pergeseran paradigma dari sekadar pemetaan bahaya menjadi pengembangan sistem mitigasi terpadu berbasis data spasial yang dapat diadaptasi di berbagai wilayah pesisir rawan tsunami.

Kajian terkait potensi bahaya tsunami di wilayah pesisir selatan Kabupaten Malang telah dilakukan oleh sejumlah peneliti, tetapi sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada pemodelan genangan dan tinggi gelombang tanpa meninjau mitigasi secara terpadu. Armono et al. (2021) meneliti tinggi gelombang, *run-up*, dan jarak genangan di pesisir Blitar dan Malang menggunakan model numerik Delft3D dan memperoleh hasil bahwa tinggi maksimum tsunami mencapai 20 meter dengan jarak genangan hingga 765 meter dari garis pantai. Kajian tersebut belum mengulas aspek mitigasi atau pengurangan risiko di wilayah terdampak. Irawan et al. (2024) memanfaatkan data ALOS PALSAR-DEM untuk memetakan area genangan pada skenario tinggi gelombang 10, 15, dan 20 meter serta mengidentifikasi kecamatan paling rawan seperti Gedangan dan Sumbermanjing Wetan. Penelitian

tersebut menegaskan pentingnya pemetaan berbasis GIS, tetapi belum mengaitkan hasil spasialnya dengan strategi mitigasi yang spesifik. Widowati et al. (2024) mengidentifikasi jumlah penduduk terdampak tsunami di Sumbermanjing Wetan menggunakan analisis risiko berbasis variabel ancaman dan kerentanan, tetapi pendekatan tersebut berhenti pada estimasi sosial tanpa analisis fisik wilayah atau arah penanganan risiko. Usman et al. (2024) menilai kesiapsiagaan masyarakat pasca pandemi di Desa Tambakrejo melalui evaluasi kapasitas tempat evakuasi dan jaringan jalan, sementara Kardina et al. (2025) merancang jalur evakuasi berbasis GIS menggunakan metode *Network Analyst* untuk mengidentifikasi rute tercepat menuju titik aman. Penelitian ini menutup celah tersebut melalui analisis geospasial berbasis GIS untuk menentukan tingkat kerawanan tsunami di enam kecamatan pesisir Kabupaten Malang yaitu Donomulyo, Bantur, Gedangan, Sumbermanjing Wetan, Tirtoyudo, dan Ampelgading. Analisis tersebut mencakup variabel jarak pantai, kelerengan, ketinggian, serta jarak dari sungai yang diolah dari data DEMNAS dan citra Sentinel-2A. Tujuan penelitian adalah menilai pola kerawanan tsunami di wilayah pesisir selatan Kabupaten Malang melalui pemetaan berbasis GIS serta merumuskan strategi mitigasi terpadu yang melibatkan aspek fisik, sosial, dan ekosistem. Hasil penelitian diharapkan memperkuat arah kebijakan mitigasi berbasis tata ruang, mendukung kesiapsiagaan masyarakat pesisir, dan mendorong pengelolaan wilayah pesisir yang lebih adaptif terhadap ancaman tsunami.

Tabel 1. Potensi Bahaya Tsunami di Provinsi Jawa Timur

No	Kabupaten/Kota	Bahaya				Kelas
		Luas (Ha)			Total	
		Rendah	Sedang	Tinggi		
1	Pacitan	117	158	2142	2417	Tinggi
2	Trenggalek	174	160	2584	2918	Tinggi
3	Tulungagung	12	14	786	812	Tinggi
4	Blitar	26	29	925	980	Tinggi
5	Malang	127	128	2686	2941	Tinggi
6	Lumajang	259	347	3270	3876	Tinggi
7	Jember	500	512	4902	5914	Tinggi
8	Banyuwangi	1331	1837	8295	11463	Tinggi
9	Situbondo	1365	569	0	1934	Sedang
10	Probolinggo	900	0	0	900	Rendah
11	Pasuruan	364	0	0	364	Rendah
12	Sidoarjo	523	0	0	523	Rendah

Sumber: Dokumen KRB Nasional Provinsi Jawa Timur 2022 - 2026

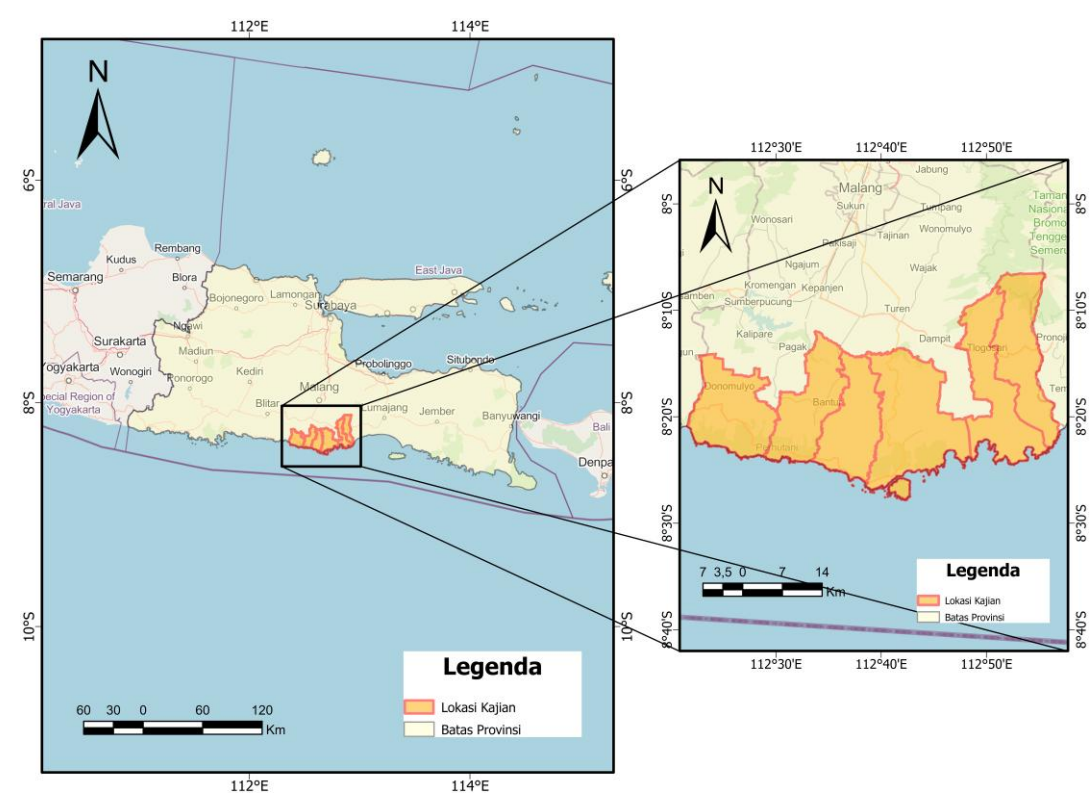
METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Wilayah penelitian berada di bagian selatan Kabupaten Malang, mencakup enam kecamatan pesisir, yaitu Donomulyo, Bantur, Gedangan, Sumbermanjing Wetan, Tirtoyudo, dan Ampelgading. Secara geografis, area tersebut berbatasan di sebelah barat oleh Kabupaten Blitar, di selatan oleh Samudra Hindia, serta di timur oleh Kabupaten Lumajang (Gambar 1). Kondisi topografi wilayah pesisir selatan Malang umumnya tidak rata, terdiri atas perbukitan kapur (*karst*) yang memanjang sejajar garis pantai (Pertiwi et al., 2020). Ketinggian wilayah berkisar antara 0 hingga 650 meter di atas permukaan laut. Pada beberapa bagian, topografi cenderung landai dengan elevasi rendah, terutama di sekitar daerah muara dan dataran pantai. Kondisi tersebut

menyebabkan area pesisir memiliki tingkat kerentanan tinggi terhadap potensi tsunami.

Kondisi sosial wilayah pesisir selatan memperlihatkan distribusi penduduk yang cukup padat. Berdasarkan data BPS tahun 2024, jumlah penduduk di Kecamatan Donomulyo tercatat 69.803 jiwa, Bantur 70.229 jiwa, Gedangan 59.777 jiwa, Sumbermanjing Wetan 104.738 jiwa, Tirtoyudo 68.596 jiwa, dan Ampelgading 59.911 jiwa. Sumbermanjing Wetan memiliki populasi tertinggi karena wilayahnya meliputi kawasan pesisir aktif dan pusat kegiatan perikanan. Sebagian besar masyarakat bekerja di sektor pertanian, perikanan, serta pariwisata pesisir. Kepadatan penduduk yang tinggi di daerah dekat pantai menambah potensi risiko terhadap bencana tsunami.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Alat dan Bahan

Tabel 2 memperlihatkan data spasial utama yang digunakan dalam penelitian. DEMNAS digunakan sebagai dasar untuk menghasilkan informasi ketinggian dan kelerengan wilayah. Peta RBI skala 1:25.000 berfungsi sebagai acuan dalam menentukan jaringan sungai, garis pantai, serta elemen geografis lain pada wilayah studi. Data sungai dan garis pantai dalam format raster digunakan untuk proses analisis jarak terhadap sumber bahaya tsunami melalui metode buffer. Batas administrasi dalam format shapefile dimanfaatkan untuk membatasi area penelitian sesuai wilayah administratif Kabupaten Malang bagian selatan. Semua data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro guna menghasilkan peta zonasi kerawanan tsunami.

Tabel 2. Alat dan Bahan

Data	Format
DEMNAS	Raster (.tif)
Peta RBI 1:25.000	Shapefile (.shp)
Data Sungai dan Garis Pantai	Raster (.tif)
Batas Administrasi	Shapefile (.shp)

Analisis Data

Klasifikasi interval tiap parameter diadaptasi dari Lessy dan Sabar (2021), yang juga diterapkan dalam studi kerawanan tsunami di wilayah pesisir Maluku Utara. Bobot parameter ditetapkan berdasarkan tingkat pengaruhnya terhadap potensi genangan tsunami, di mana jarak dari garis pantai dan elevasi memiliki kontribusi paling besar (30%), diikuti oleh kemiringan lereng (25%) dan jarak dari sungai (15%) (Tabel 3). Nilai klasifikasi lima tingkat (1–5) merepresentasikan urutan tingkat kerentanan dari sangat rendah hingga sangat tinggi. Penelitian ini

menggunakan data primer dan sekunder sebagai dasar analisis spasial. Data primer meliputi kondisi topografi wilayah, garis pantai, lokasi sungai, serta persepsi masyarakat terhadap potensi bencana. Data sekunder mencakup kepadatan penduduk, catatan kejadian gempa bumi, dan data pendukung lain yang relevan. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, pengambilan data spasial, serta digitalisasi peta. Analisis

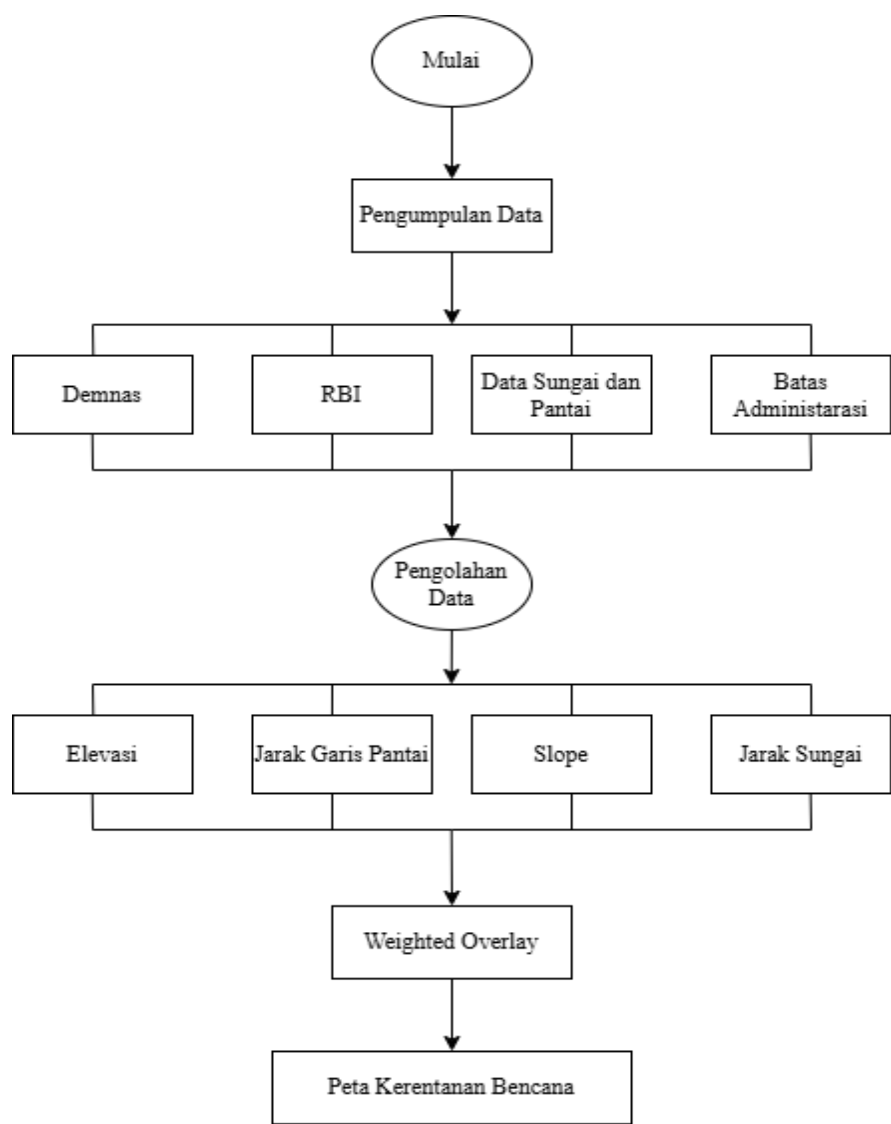
dilakukan melalui metode *scoring* dan *weighting* terhadap empat parameter utama yaitu jarak garis pantai, elevasi, kemiringan lereng, dan jarak sungai. Setiap parameter diklasifikasikan menjadi lima kelas kerentanan berdasarkan pengaruh terhadap potensi bahaya tsunami. Nilai total kerentanan dihitung menggunakan persamaan. Tahapan dalam penelitian disajikan pada Gambar 2.

Tabel 3. Pembobotan Parameter

Parameters	Class	Score	Weight
Distance from coastline (m)	0-500m	5	30
	501-1000m	4	
	1001-1500m	3	
	1501-3000m	2	
	>3000m	1	
Elevation (m)	<10m	5	30
	11-25m	4	
	26-50m	3	
	51-100m	2	
	>100m	1	
Slope (%)	0-2%	5	25
	3-5%	4	
	6-15%	3	
	16-40%	2	
	>40%	1	
	0-100m	5	

Parameters	Class	Score	Weight
Distance from river (m)	101-200m	4	
	201-300m	3	
	301-500m	2	
	>500m	1	

Sumber: Lessy & Sabar (2021)



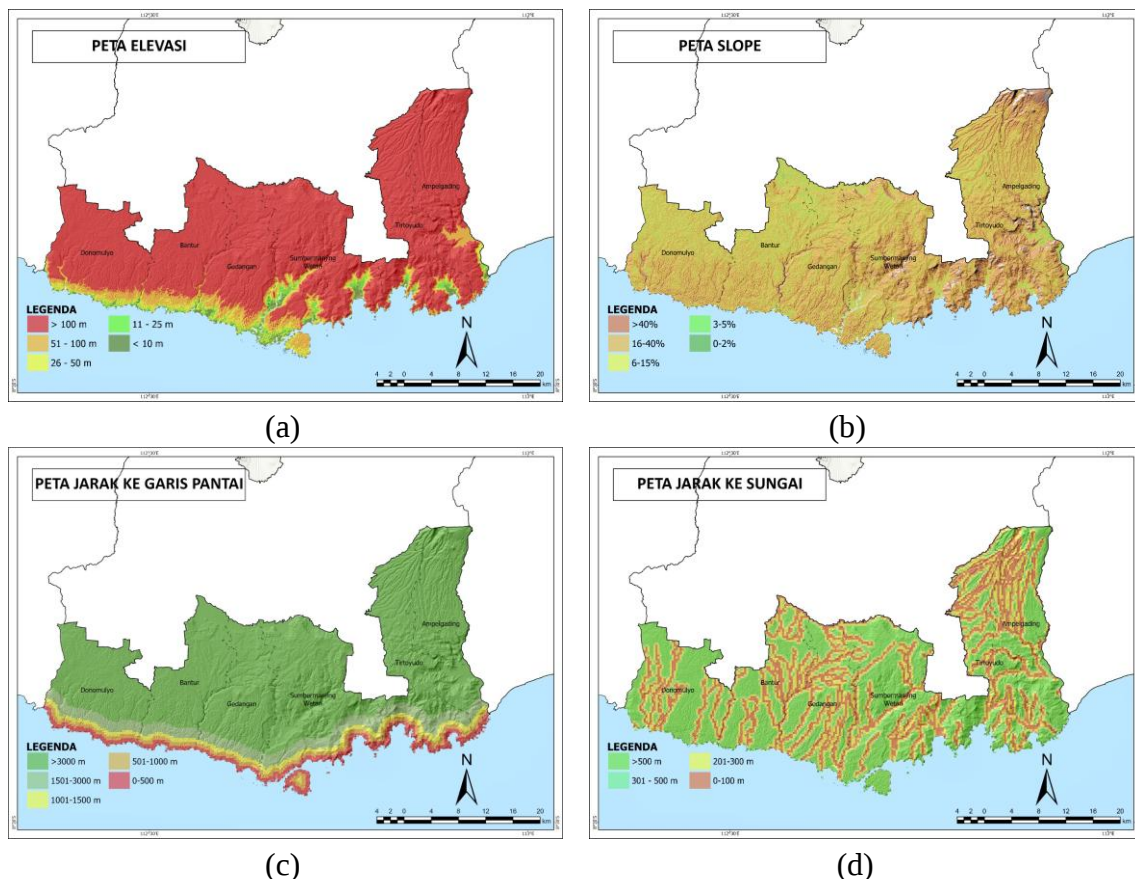
Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Parameter Fisik

Analisis parameter fisik dilakukan terhadap empat komponen utama yang berpengaruh terhadap tingkat kerawanan tsunami, yaitu kemiringan lereng (*slope*), elevasi, jarak ke sungai, dan jarak ke garis pantai (Gambar 3). Keempat parameter tersebut dipilih karena berperan penting dalam menentukan besarnya potensi

genangan dan arah perambatan gelombang tsunami di kawasan pesisir. Peta tiap parameter disusun berdasarkan hasil pengolahan data DEMNAS dan citra Sentinel-2A yang telah melalui tahapan pra-pemrosesan. Klasifikasi dan pembobotan parameter diadaptasi dari penelitian Lessy dan Sabar (2021) yang disesuaikan dengan karakteristik geomorfologi pesisir selatan Kabupaten Malang.



Gambar 3. (a) Peta Elevasi; (b) Peta Kelerengan; (c) Peta Jarak ke Garis Pantai; (d) Peta Jarak ke Sungai.

Elevasi dan Kemiringan Lokasi Penelitian

Kelerengan dan elevasi merupakan dua parameter utama yang berpengaruh terhadap tingkat kerentanan wilayah pesisir terhadap tsunami (Sinaga et al., 2024). Hasil analisis peta kelerengan dari data DEMNAS menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah pesisir selatan

Kabupaten Malang memiliki kemiringan 0–5%, terutama pada Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur (Gambar 3b). Lereng landai menjadi area paling berisiko karena energi gelombang tsunami tidak terdisipasi ketika mencapai daratan sehingga daya rusaknya

meningkat (Marfai et al., 2021). Kondisi ini sejalan dengan teori *run-up* yang menyatakan bahwa gelombang yang bergerak di atas permukaan datar akan mempertahankan energi kinetiknya lebih lama sebelum kehilangan kecepatan. Sebaliknya, wilayah berlereng curam seperti bagian utara Ampelgading dan Tirtoyudo cenderung menghambat perambatan gelombang, tetapi masih berpotensi terdampak aliran balik pascagenangan (Alwi & Mutaqin, 2022).

Analisis elevasi menunjukkan pola spasial yang serupa terhadap potensi genangan. Area dengan ketinggian kurang dari 10 meter tersebar luas di sepanjang garis pantai, khususnya di pesisir Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur (Gambar 3a). Berdasarkan teori gelombang laut, semakin rendah ketinggian suatu wilayah, semakin besar peluang terjadinya genangan karena energi gelombang tsunami akan terus bergerak hingga kehilangan elevasi yang signifikan (Sriyanto et al., 2024). Zona dengan ketinggian 11–25 meter berfungsi sebagai area transisi yang masih berpotensi terdampak aliran air, sedangkan wilayah lebih dari 100 meter relatif aman karena berada jauh dari pengaruh energi *run-up*.

Distribusi spasial lereng landai dan ketinggian rendah menunjukkan arah kerentanan yang dominan ke wilayah selatan Kabupaten Malang. Daerah tersebut memperlihatkan orientasi lereng mengarah ke pantai dan menyebabkan gelombang tsunami berpotensi bergerak lurus tanpa banyak hambatan morfologi. Pola ini mempertegas bahwa orientasi kemiringan memiliki peran penting dalam menentukan arah rambatan gelombang, sedangkan variasi elevasi di sisi darat berfungsi sebagai batas alami bagi intensitas *run-up*. Area pesisir yang sejajar garis pantai berpotensi mengalami tekanan hidrodinamik paling besar, khususnya di zona muara sungai yang berfungsi sebagai

jalur masuk utama aliran gelombang ke daratan (Muzani et al., 2024).

Jarak dari Sungai

Pola spasial jarak terhadap sungai menunjukkan hubungan yang cukup signifikan antara sistem hidrologi pesisir dan arah rambatan gelombang tsunami (Chapkanski et al., 2022; Röbbke et al., 2018). Berdasarkan hasil analisis, wilayah yang berada pada radius 0–100 meter dari badan sungai tersebar di sebagian besar kecamatan pesisir, terutama di Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur (Gambar 3d). Area ini teridentifikasi sebagai zona sangat rawan karena sungai berfungsi sebagai saluran alami yang menyalurkan energi gelombang dari laut menuju daratan. Saat gelombang tsunami memasuki muara, aliran air akan mengalami proses percepatan akibat penyempitan saluran, sehingga menciptakan efek *funneling* yang meningkatkan kecepatan dan tinggi gelombang di sepanjang jalur sungai (Gharnate et al., 2025). Fenomena ini diperkuat oleh karakteristik morfologi lembah sungai di Malang selatan yang sempit dan memanjang, sehingga energi gelombang sulit terdisipasi sebelum mencapai dataran lebih tinggi.

Pola tersebut juga berkaitan langsung dengan fenomena *backwash*, yaitu arus balik dari gelombang tsunami yang kembali menuju laut melalui saluran sungai. Arus balik yang kuat dapat memperluas daerah genangan dan memperparah kerusakan di bantaran sungai, terutama pada daerah dataran rendah dekat muara. Kondisi ini menunjukkan bahwa sungai tidak hanya berperan sebagai jalur masuk gelombang, tetapi juga sebagai saluran keluar yang memperbesar sirkulasi energi air di sekitar pesisir. Kasus serupa pernah diamati di Palu pada tahun 2018, ketika gelombang yang memasuki teluk memperkuat kecepatan aliran melalui muara sungai dan

memperluas zona terdampak hingga ke pusat kota. Penelitian Jitt-Aer et al. (2022) di Phuket, Thailand, juga menemukan pola serupa, di mana kanal dan muara sungai memperpanjang jangkauan genangan karena terjadinya penguatan energi pada saluran yang sejajar arah datangnya gelombang.

Jarak dari Garis Pantai

Parameter jarak terhadap garis pantai menunjukkan tingkat pengaruh paling tinggi terhadap potensi kerawanan tsunami karena berkaitan langsung dengan intensitas energi gelombang yang diterima daratan (Sriyanto et al., 2024). Berdasarkan hasil analisis spasial, area dalam radius 0–500 meter dari garis pantai dikategorikan sebagai zona paling berisiko tinggi. Zona ini tersebar luas di sepanjang pantai Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur, di mana karakter topografi cenderung landai dan elevasi rendah (Gambar 3c). Energi gelombang yang mencapai daratan pada zona tersebut memiliki tekanan hidrodinamik tinggi, sehingga potensi erosi, kerusakan fisik, dan genangan lebih besar dibandingkan area yang berjarak lebih jauh dari pantai. Sementara itu, area berjarak 501–1000 meter masih menunjukkan potensi genangan sekunder akibat dorongan momentum air dari gelombang utama yang menembus lebih jauh ke arah daratan (Shigeru et al., 2025).

Distribusi spasial memperlihatkan pola linear yang mengikuti konfigurasi garis pantai selatan Kabupaten Malang. Di bagian barat, Kecamatan Donomulyo menunjukkan pola kerentanan yang tinggi pada kawasan pantai Sumberoto dan Kedungsalam, di mana jarak antar permukiman dan garis pantai relatif dekat. Di bagian tengah, Gedangan dan Sumbermanjing Wetan memperlihatkan struktur spasial padat di area berjarak kurang dari 500 meter dari pantai, mempertegas orientasi aktivitas

masyarakat yang berpusat di zona berisiko tinggi. Fenomena ini sejalan dengan teori wave run-up yang menjelaskan bahwa amplitudo gelombang tsunami menurun seiring bertambahnya jarak dari garis pantai, tetapi pada wilayah berlereng landai, kehilangan energi terjadi secara lambat sehingga jangkauan genangan dapat meluas hingga beberapa kilometer ke pedalaman (Sinaga et al., 2024).

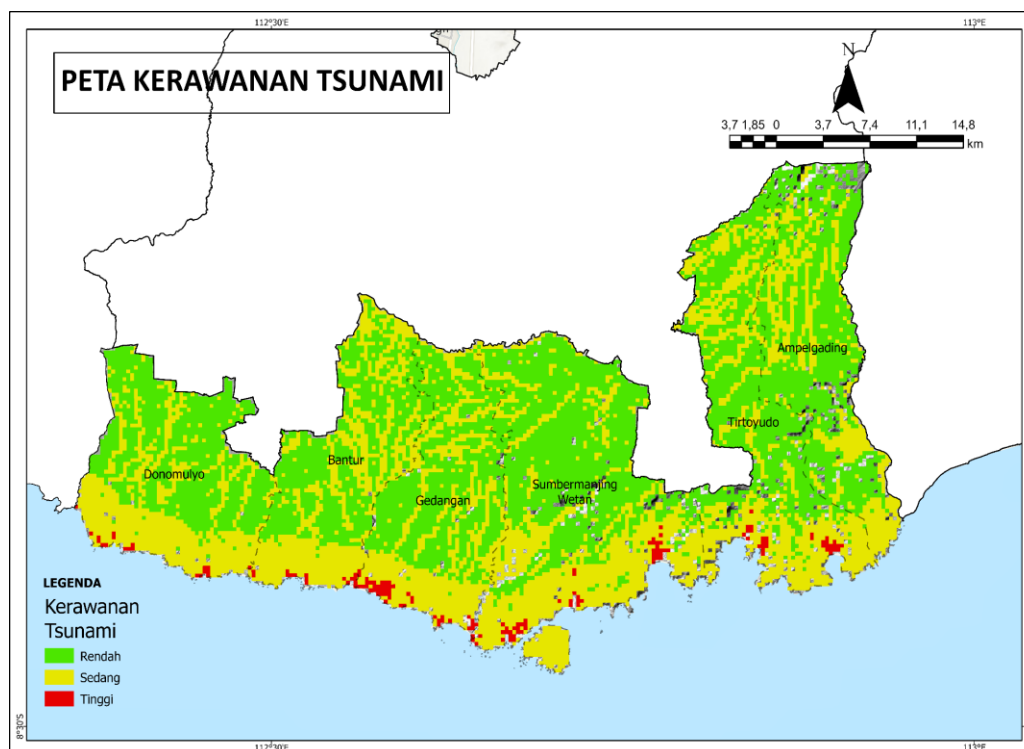
Analisis Kerawanan Tsunami

Peta hasil *overlay* dari empat parameter utama menunjukkan sebaran spasial tingkat kerawanan tsunami di pesisir Kabupaten Malang yang terbagi atas tiga kategori utama, yaitu rendah, sedang, dan tinggi (Gambar 4). Zona berkategori tinggi terpusat di wilayah pesisir bagian selatan yang meliputi Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Gedangan, Bantur, dan sebagian Donomulyo, di mana wilayah-wilayah tersebut berhadapan langsung terhadap Samudra Hindia dan berada pada topografi yang relatif datar. Area ini ditandai oleh jarak terhadap pantai kurang dari 500 meter, kemiringan lereng di bawah 5 persen, dan elevasi di bawah 25 meter di atas permukaan laut. Kondisi morfometri seperti ini memperkuat potensi genangan tsunami karena tidak terdapat penghalang topografi yang signifikan untuk mereduksi energi gelombang. Pada sisi lain, wilayah bagian tengah hingga utara dari keenam kecamatan memiliki kondisi topografi yang lebih tinggi dan bergelombang, sehingga klasifikasinya didominasi kategori sedang hingga rendah. Pola penyebaran tersebut mengindikasikan keterkaitan erat antara konfigurasi morfologi pesisir selatan Malang dan tingkat bahaya tsunami yang dihasilkan melalui analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Fenomena ini menunjukkan bahwa faktor jarak terhadap garis pantai, bentuk topografi, dan ketinggian permukaan tanah memiliki

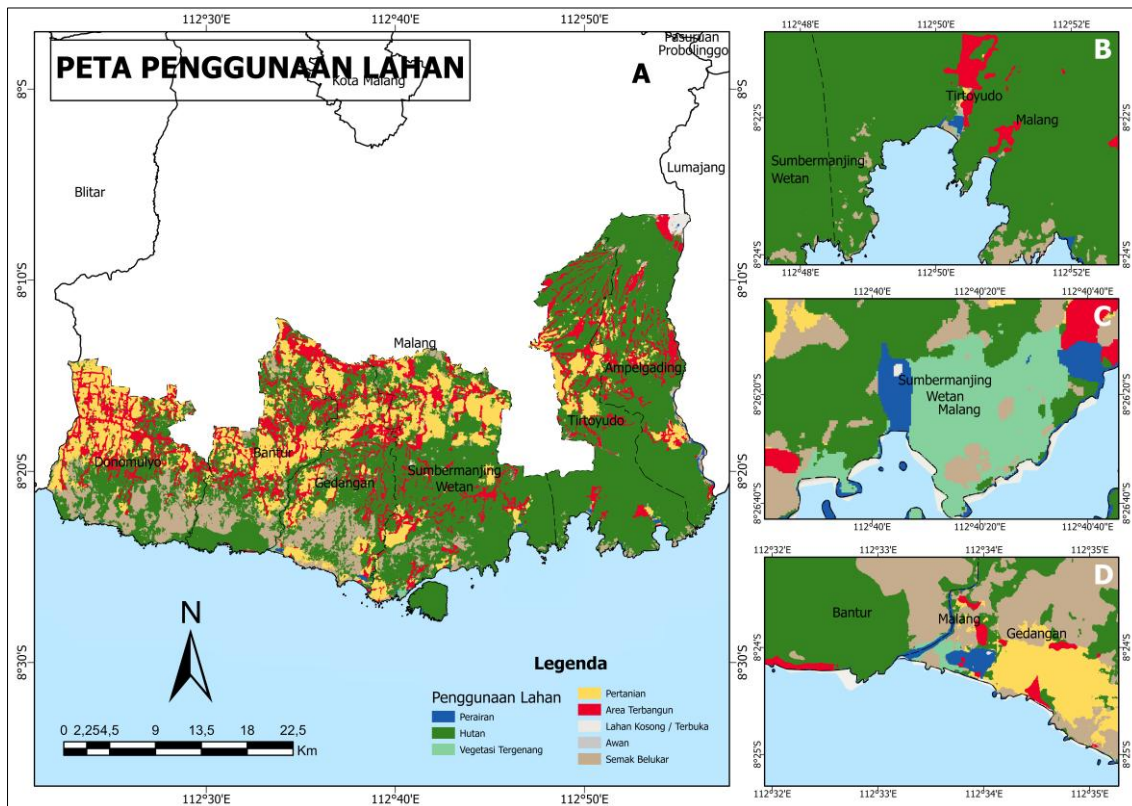
keterhubungan kuat terhadap tingkat kerawanan tsunami yang terpetakan. Pada area seperti Tambakrejo, Sitiarjo, dan Gajahrejo, zona berwarna merah pada peta hasil overlay terdistribusi cukup luas dan umumnya berada di sekitar dataran muara sungai yang cenderung landai serta berdekatan dengan permukiman padat.

Analisis parameter topografi menunjukkan bahwa wilayah ber-elevasi rendah merupakan area paling rentan terhadap bahaya tsunami karena secara fisik mudah terjangkau oleh gelombang yang menjalar dari laut menuju daratan. Berdasarkan data DEMNAS, wilayah pesisir selatan Kabupaten Malang secara umum berada pada ketinggian antara 0 hingga 25 meter di atas permukaan laut, terutama di sepanjang pesisir Kecamatan Donomulyo, Bantur, Gedangan, dan Sumbermanjing Wetan. Kondisi tersebut menjelaskan mengapa sebagian besar area pesisir berpotensi tinggi terhadap genangan tsunami. Variasi warna hijau hingga kuning pada peta elevasi

menunjukkan gradien ketinggian rendah yang tersebar luas di sepanjang tepian pantai, sedangkan wilayah berwarna coklat tua di bagian utara menunjukkan area perbukitan karst yang lebih stabil secara geomorfik. Perbedaan ketinggian ini memiliki konsekuensi langsung terhadap penyebaran gelombang tsunami, sebab semakin rendah topografi maka semakin besar pula potensi genangan. Fenomena ini juga terlihat pada parameter kelerengan yang menunjukkan bahwa sebagian besar area pesisir memiliki lereng kurang dari 5 persen, terutama di wilayah selatan Gedangan dan Bantur. Daerah yang landai semacam ini berperan penting terhadap perambatan energi tsunami yang cenderung tidak tereduksi saat memasuki wilayah daratan. Di sisi lain, area perbukitan di Tirtoyudo dan Ampelgading berfungsi sebagai batas alami yang dapat mengurangi intensitas gelombang karena memiliki kemiringan curam dan elevasi tinggi.



Gambar 4. Peta Kerawanan Tsunami



Gambar 5. (a) Peta Penggunaan Lahan Area Kajian; (b) Penggunaan Lahan Kawasan Pantai Sendangbiru; (c) Penggunaan Lahan Area Pantai Wonogoro; dan (d) Penggunaan Lahan Area Tambaksari

Validasi hasil pemetaan dilakukan secara kualitatif melalui interpretasi citra Google Earth dan observasi visual kondisi aktual wilayah pesisir. Verifikasi dilakukan dengan mencocokkan zona hasil overlay terhadap morfologi dataran pantai, persebaran permukiman, dan jalur sungai yang tampak pada citra resolusi tinggi. Kawasan pesisir Sendangbiru, Sipelot, Wonogoro–Nganteb, dan Sidoasri memperlihatkan korelasi spasial yang kuat dengan hasil pemetaan kerawanan tsunami yang diklasifikasikan sebagai zona merah pada peta kerawanan (Gambar 5). Di Sendangbiru, morfologi datar dan kedekatannya dengan muara serta aktivitas padat penduduk di sepanjang Jalan Pantai Sendangbiru menjadikan wilayah ini sebagai konsentrasi risiko tinggi.

Aglomerasi permukiman yang menjorok ke arah laut tanpa penghalang alami memfasilitasi penetrasi gelombang hingga ke kawasan TPI dan area wisata utama (Gambar 5b). Kondisi serupa ditemukan di Pudjihardjo–Sipelot yang memiliki konfigurasi topografi terbuka menghadap Samudra Hindia, di mana permukiman linear di sekitar muara sungai berpotensi menjadi jalur utama penjarangan gelombang. Sebagian besar area berjarak kurang dari 500 meter dari garis pantai berada pada elevasi rendah di bawah 10 meter, sesuai dengan pola zona merah pada hasil *overlay*, memperkuat indikasi tingginya potensi genangan di sepanjang pesisir tengah Kabupaten Malang.

Kawasan Wonogoro hingga Nganteb memperlihatkan intensitas

kerentanan serupa dengan dominasi tambak dan lahan datar di tepi pantai yang berfungsi sebagai area transisi antara laut dan permukiman (Gambar 5c). Struktur lahan terbuka dan minim vegetasi pelindung menjadikan tekanan hidrodinamik tsunami sulit tereduksi, terutama di sekitar muara sungai yang tampak mengalir langsung ke arah permukiman. Pada bagian timur, wilayah Tambaksari–Sidoasri juga menunjukkan pola kerentanan tinggi dengan jalur jalan utama yang sejajar pantai dan area permukiman rapat di dataran rendah sekitar Pantai Perawan Sidoasri (Gambar 5d).

Hasil *overlay* dari seluruh parameter menunjukkan pola kerawanan yang sangat erat kaitannya dengan bentuk lahan pesisir dan kedekatan terhadap garis pantai. Area berwarna merah pada peta akhir yang menggambarkan zona kerawanan tinggi terbentang hampir sejajar garis pantai mulai dari Donomulyo hingga Ampelgading, terutama pada bagian yang dekat dengan muara sungai dan dataran rendah. Pola linear tersebut mengindikasikan bahwa konfigurasi topografi datar berperan dominan dalam mengontrol arah penyebaran gelombang tsunami. Pada bagian utara yang terdiri atas perbukitan kapur curam, zona berwarna hijau lebih luas karena potensi genangan lebih kecil akibat kondisi elevasi yang tinggi. Sebaliknya, wilayah muara sungai dan dataran pantai terbuka di Sumbermanjing Wetan dan Gedangan menjadi area yang paling rentan karena berada di pertemuan antara sungai dan laut yang dapat berfungsi sebagai saluran alami penjalaran gelombang. Hasil analisis ini memiliki kesesuaian kuat terhadap temuan Irawan et al. (2024) yang menggunakan pemodelan Digital Elevation Model ALOS PALSAR untuk memprediksi area genangan tsunami di pesisir selatan Kabupaten Malang. Dalam penelitian tersebut disebutkan bahwa Gedangan dan

Sumbermanjing Wetan merupakan wilayah dengan area genangan terluas pada skenario gelombang setinggi 15 hingga 20 meter.

Langkah Mitigasi

Perumusan strategi mitigasi pada penelitian ini didasarkan atas hasil analisis spasial tingkat kerawanan tsunami dan hasil telaah berbagai literatur terkait mitigasi bencana di wilayah pesisir (PERKA BNPB No. 2 Tahun 2012; Baeda et al., 2016; Wijanarko et al., 2022; Pamuji et al., 2023; Nuriyana et al., 2024). Strategi ini diarahkan untuk menekan tingkat risiko tsunami pada kawasan pesisir Kabupaten Malang dengan mempertimbangkan karakteristik geomorfologi, kepadatan penduduk, serta distribusi permukiman di daerah yang tergolong sangat rawan. Berdasarkan hasil *overlay* peta kerawanan tsunami, wilayah pesisir Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur menjadi prioritas mitigasi karena memiliki topografi landai, elevasi rendah (<10 m), dan berhadapan langsung dengan Samudra Hindia. Pendekatan mitigasi yang dirumuskan meliputi aspek struktural dan non-struktural yang saling melengkapi dalam membangun sistem perlindungan pesisir yang tangguh.

Mitigasi Struktural

Mitigasi struktural difokuskan pada upaya fisik untuk mengurangi dampak langsung gelombang tsunami terhadap permukiman dan infrastruktur vital. Pembangunan tanggul laut (*seawall*) dan pemecah gelombang (*breakwater*) direkomendasikan di pesisir Sendangbiru, Sidoasri, dan Tambakrejo karena wilayah tersebut menunjukkan nilai kerawanan tinggi dan merupakan pusat aktivitas nelayan. Keberadaan infrastruktur pelindung ini dapat mereduksi energi gelombang dan memperlambat laju genangan sebagaimana diterapkan di Pantai Losari Makassar (Baeda et al.,

2016). Selain itu, pembangunan menara evakuasi vertikal di zona permukiman padat berjarak kurang dari 500 meter dari garis pantai, terutama di Desa Sitiarjo dan Sumbermanjing, menjadi langkah strategis. Hasil penelitian Pamuji et al. (2023) menunjukkan bahwa ketinggian run-up tsunami di beberapa wilayah pesisir Indonesia dapat mencapai enam meter, sehingga menara evakuasi perlu dirancang minimal sepuluh meter dari permukaan tanah untuk menjamin keamanan evakuasi vertikal. Upaya penguatan struktur

bangunan publik seperti sekolah, fasilitas kesehatan, dan jembatan pada jalur evakuasi utama juga diperlukan, sebab bangunan tersebut dapat berfungsi ganda sebagai titik kumpul sementara saat terjadi bencana. Penerapan mitigasi struktural ini harus disesuaikan dengan arahan rencana tata ruang wilayah agar tidak mengganggu fungsi ekologis pantai serta memperhatikan daya dukung lingkungan setempat. Langkah mitigasi structural wilayah kajian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Langkah Mitigasi Struktural

Mitigasi	Lokasi Prioritas	Keterangan	Deskripsi
Early Warning System	Sumbermanjing Wetan, Gedangan	Kecamatan padat penduduk	Sistem peringatan dini berbasis sirine dan SMS blast untuk memberi waktu evakuasi masyarakat
Breakwater	Sepanjang Zona Merah Tsunami	Area ini dekat dengan laut lepas, jadi gelombang tsunami cenderung kuat sebelum mencapai daratan	Struktur pemecah gelombang di laut untuk meredam energi gelombang sebelum mencapai daratan
Seawall	Wilayah Pesisir dengan fasilitas penting (tempat wisata)	Pusat aktivitas ekonomi (nelayan dan wisata), sehingga infrastruktur perlu perlindungan	Dinding pelindung di garis pantai untuk mencegah air masuk ke daratan akibat gelombang kecil
Jalur Evakuasi	Area Zona Merah	Wilayah ini minim akses jalur aman, jadi perlu jalur darurat yang cepat menuju tempat tinggi.	Jalan dengan rambu yang jelas untuk memudahkan masyarakat menuju titik aman saat tsunami.

Mitigasi Non Struktural

Di sisi lain, mitigasi non-struktural diarahkan untuk membangun kesiapsiagaan sosial dan kelembagaan dalam menghadapi ancaman tsunami. Peningkatan kapasitas masyarakat pesisir menjadi prioritas utama melalui pendidikan kebencanaan, sosialisasi mitigasi, serta pelatihan evakuasi di tingkat sekolah dan komunitas. Fauzi et al. (2023) menegaskan bahwa pelatihan mitigasi di sekolah secara signifikan dapat meningkatkan kesadaran serta keterampilan evakuasi masyarakat pesisir. Oleh karena itu, kegiatan pendidikan kebencanaan perlu diintegrasikan dalam kurikulum sekolah dasar dan menengah di Kecamatan Bantur dan Gedangan yang berada di zona rawan tinggi. Selain itu, simulasi evakuasi tahunan dan penataan jalur evakuasi perlu dilaksanakan secara berkala. Hasil penelitian Wijanarko et al. (2022) menunjukkan bahwa keberadaan jalur evakuasi yang terpetakan dengan baik dan dilengkapi rambu dapat menurunkan risiko keterlambatan evakuasi hingga

empat puluh persen. Jalur evakuasi harus disertai papan petunjuk arah, titik kumpul, serta informasi jarak ke zona aman agar mudah dikenali masyarakat. Penguatan sistem peringatan dini (*early warning system*) melalui optimalisasi sensor dan jaringan komunikasi BPBD Kabupaten Malang juga perlu dikembangkan, dengan memastikan sistem tersebut terintegrasi dengan stasiun BMKG terdekat agar peringatan dapat diterima masyarakat dalam waktu kurang dari lima menit setelah deteksi gempa. Selain itu, penyusunan rencana kontinjensi berbasis komunitas yang melibatkan perangkat desa, kelompok nelayan, dan tokoh masyarakat merupakan langkah penting untuk menciptakan mekanisme tanggap darurat lokal yang efektif. Hal ini sejalan dengan temuan Kurniawan et al. (2021) yang menekankan pentingnya keterlibatan masyarakat dalam perencanaan mitigasi berbasis partisipatif guna meningkatkan ketahanan komunitas pesisir. Langkah mitigasi *non structural* wilayah kajian disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Langkah Mitigasi Non Struktural

Mitigasi	Lokasi Prioritas	Keterangan
Edukasi Masyarakat	Semua kecamatan zona merah	Memberikan edukasi tentang bahaya tsunami, tanda-tanda awal seperti surutnya air laut, dan langkah evakuasi. Edukasi juga mencakup cara membaca peta jalur evakuasi dan mengenali suara sirine EWS.
Simulasi Bencana	Sekolah dan Organisasi/Kelompok Masyarakat	Latihan rutin untuk seluruh masyarakat (termasuk kelompok rentan) tentang cara evakuasi cepat dan efektif. Simulasi ini mencakup penggunaan jalur evakuasi, titik kumpul, dan respons darurat.

Mitigasi			Lokasi Prioritas	Keterangan
Pembentukan Bencana	Kelompok	Sadar	Setiap desa di zona merah	Organisasi masyarakat yang terdiri dari warga setempat, bertugas untuk menyebarkan informasi darurat, memandu evakuasi, dan mengoordinasi bantuan hingga tim penyelamat tiba.

KESIMPULAN

Penelitian ini dilakukan untuk memetakan zona kerawanan tsunami di wilayah pesisir Kabupaten Malang serta merumuskan strategi mitigasi berbasis analisis geospasial. Pendekatan yang digunakan mengandalkan sistem informasi geografis (SIG). Empat parameter yang dianalisis meliputi elevasi, kemiringan lereng, jarak ke sungai, dan jarak ke garis pantai. Semua parameter tersebut diolah melalui proses *scoring-weighting* hingga menghasilkan peta zonasi kerawanan dengan tiga tingkat bahaya: tinggi, sedang, dan rendah. Hasil analisis menunjukkan bahwa wilayah dengan morfologi landai, elevasi di bawah sepuluh meter, dan jarak terhadap pantai kurang dari lima ratus meter termasuk ke dalam kategori sangat rawan. Area dengan tingkat bahaya tertinggi berada di Kecamatan Sumbermanjing Wetan, Gedangan, dan Bantur, sedangkan bagian utara seperti Tirtoyudo dan Ampelgading memiliki tingkat kerawanan lebih rendah. Secara umum, peta kerawanan yang dihasilkan mampu memperlihatkan sebaran spasial bahaya tsunami secara detail dan realistis, sekaligus menggambarkan hubungan antara kondisi fisik wilayah dan tingkat risikonya.

Penelitian ini memberikan manfaat dalam penyusunan kebijakan mitigasi bencana berbasis tata ruang pesisir. Selain menjadi dasar perencanaan pembangunan di kawasan rawan, hasil penelitian ini juga mendukung peningkatan kesiapsiagaan

masyarakat melalui pendekatan mitigasi yang lebih komprehensif. Rekomendasi yang diajukan terbagi dalam dua aspek, yaitu mitigasi struktural (pembangunan *breakwater*, tanggul laut, dan menara evakuasi), dan mitigasi non-struktural (pendidikan kebencanaan, pelatihan, serta sistem peringatan dini).

Keterbatasan penelitian ini terletak pada validasi hasil spasial yang masih bersifat kualitatif dan belum mencakup simulasi genangan dinamis. Faktor sosial-ekonomi masyarakat juga belum dianalisis secara mendalam dalam konteks spasial kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggabungkan model numerik *run-up* tsunami dan analisis sosial-ekonomi berbasis spasial agar hasilnya dapat digunakan secara lebih komprehensif dalam penyusunan kebijakan mitigasi dan perencanaan wilayah pesisir Kabupaten Malang.

DAFTAR PUSTAKA

Alwi, M., & Mutaqin, B. W. (2022). Geospatial mapping of tsunami susceptibility in Parangtritis coastal area of Yogyakarta, Indonesia. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(15). <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10608-2>

Amra, R., Araki, S., Geiß, C., & Davies, G. (2025). Error-reduced digital

- elevation models and high-resolution land cover roughness in mapping tsunami exposure for low elevation coastal zones. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101438>
- Armono, H. D., Putra, A. R., & Wahyudi. (2021). Analysis of Tsunami Wave Height, Run-up, and Inundation in the Coastal of Blitar and Malang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 936(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012013>
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2021). Dokumen Kajian Risiko Bencana Nasional Provinsi Riau 2022 - 2026. *Kedeputan Bidang Sistem Dan Strategi Direktorat Pemetaan Dan Evaluasi Risiko Bencana*, 173.
- Baeda, A. Y., Klara, S., Hendra, & Muliayati, R. (2016). Mitigasi bencana tsunami di Pantai Losari Makassar, Sulawesi Selatan. *Jurnal JPE*, 20(1), 21–28.
- Biswas, S., & Sil, A. (2023). Tsunami Vulnerability Assessment and Multi-Criteria Decision Making Analysis of Eastern Coast of India Using GIS-Based Tools. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(3), 1270–1287. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1493-y>
- Bonilauri, E. M., Harris, A. J. L., Morin, J., Ripepe, M., Mangione, D., Lacanna, G., ... Deguy, P. (2021). Tsunami evacuation times and routes to safe zones: a GIS-based approach to tsunami evacuation planning on the island of Stromboli, Italy. *Journal of Applied Volcanology*, 10(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s13617-021-00104-9>
- Chapkanski, S., Brocard, G., & Lavigne, F. (2022). Fluvial and coastal landform changes in the Aceh River delta (Northern Sumatra) during the century leading to the 2004 Indian Ocean Tsunami. *Earth Surface Processes and Landforms*, 47(15), 3201–3220. <https://doi.org/10.1002/esp.5292>
- Fauzi, Y., Memi Mayasari, Z., Damayanti, S., Washita Dwi Oktitania, C., Andi Jaya, G., & Al Aiyobi, F. (2023). Peningkatan pengetahuan tentang mitigasi bencana gempa bumi dan tsunami. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian Dan Pengabdian Kepada Masyarakat LPPM Universitas 'Aisyiyah Yogyakarta*, 1, 22–2023.
- Gharnate, A., Sanad, H., & Lhaj, M. O. (2025). *A Comprehensive Review of Polygenetic Signatures , Methodological Advances , and Implications for Coastal Boulder Deposits (CBDs) Assessment*. 1–33.
- Irawan, L. Y., Islam, S. N., Sumarmi, Ardiansyah, Z. F., Dani, F. A., Fadhlurahman, I., ... Fariyah, S. N. (2024). GIS Modelling for Prediction of Tsunami Inundation Areas in Coastal Areas of Malang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1406(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1406/1/012017>
- Jitt-Aer, K., Wall, G., Jones, D., & Teeuw, R. (2022). Use of GIS and dasymetric mapping for estimating tsunami-affected population to facilitate humanitarian relief logistics: a case study from Phuket, Thailand. *Natural Hazards*, 113(1), 185–211.

- <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05295-x>
- Kardina, D., Susilo, A., & Usman, F. (2025). Mapping Tsunami Disaster Evacuation Routes Based on Geographic Information Systems (Case Study: Tambakrejo Village, Malang Regency, East Java). *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 11(5), 282–293.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v11i5.11260>
- Kurniawan, W., Bangun, E., & Prakoso, B. (2021). Estimasi Ancaman Tsunami di Zona Subduksi Sulawesi Bagian Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Tsunami. *PENDIPA Journal of Science Education*, 5(2), 204–209.
<https://doi.org/10.33369/pendipa.5.2.204-209>
- Lessy, M. R., & Sabar, M. (2021). Mapping Tsunami Vulnerability Area for Bacan Sub-District and Its Surroundings - North Maluku Province. *E3S Web of Conferences*, 328.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132804024>
- Marfai, M. A., Khakim, N., Fatchurohman, H., & Salma, A. D. (2021). Planning tsunami vertical evacuation routes using high-resolution UAV digital elevation model: case study in Drini Coastal Area, Java, Indonesia. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(19).
<https://doi.org/10.1007/s12517-021-08357-9>
- Muzani, M., Mataburu, I. B., & Tafiati, T. (2024). Vulnerability and tsunami disaster on the west coast Banten province, Indonesia. *All Earth*, 36(1), 1–12.
- <https://doi.org/10.1080/27669645.2024.2323355>
- Pamuji, D., Setiadji, P., & Karapa, E. (2023). Strategi Pengelolaan Wilayah Pesisir Kabupaten Sarmi Dalam Upaya Mitigasi Tsunami. *Jurnal MEDIAN Arsitektur Dan Planologi*, 13(1), 27–37.
<https://doi.org/10.58839/jmap.v13i1.1248>
- PERKA BNPB No 2 Tahun 2012 Tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana. Jakarta: BNPB
- Pertiwi, W., Bahri, S., Rokhim, S., & Firdhausi, N. F. (2020). Keanekaragaman dan pemerataan jenis Collembola gua di kawasan karst Malang Selatan. *Biotropic: The Journal of Tropical Biology*, 4(2), 134-139.
- Röbke, B. R., & Vött, A. (2017). The tsunami phenomenon. *Progress in Oceanography*, 159, 296-322.
- Shigeru, K., Afifuddin, M., & Al Farizi, M. D. (2025). Compounding the dynamic interactions of sea level rise, tidal levels, and land use changes: A case study of Banda Aceh, 20 years after the 2004 tsunami. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 102, 104315.
- Sinaga, T. P. T., Nugroho, A., Lee, Y. W., & Suh, Y. (2011). GIS mapping of tsunami vulnerability: Case study of the Jembrana regency in Bali, Indonesia. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(3), 537–543.
<https://doi.org/10.1007/s12205-011-0741-8>
- Sriyanto, S. P. D., Nurokhim, A., Sulistian, T., Gunawan, I., Sari, R. I., Samapta,

B. T., ... Harrys, R. M. (2024). Tsunami hazard assessment for the Cilegon industrial zone, Java, Indonesia, by considering various digital elevation model (DEM) datasets and fault source models. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(12).
<https://doi.org/10.1007/s12517-024-12133-w>

Usman, F., Kurniawan, E. B., Fathoni, M., & Rozikin, M. (2024). Tsunami Disaster Preparedness in Tambakrejo Village, Sumbermanjing Wetan Distric, Malang, Indonesia. *Evergreen*, 11(2), 1182–1189.
<https://doi.org/10.5109/7183421>

Widowati, U. D., Rachmawati, T. A., & Usman, F. (2024). Menentukan Penduduk Terdampak Berdasarkan Analisis Risiko Bencana Tsunami di Kecamatan Sumbermanjing Wetan Kabupaten Malang. *Planning for Urban Region And Environment*, 13(3), 251–258.

Wijanarko, T., Tondobala, L., Ontang, F., & Siregar, P. (2022). Mitigasi Bencana Tsunami Di Wilayah Pesisir Kabupaten Bolaang Mongondow Timur Tsunami Disaster Mitigation In The Coastal Area Of East Bolaang.

Yudhicara, Cipta, A., Maemunah, I., Lewu, A. P., & Nurfalah, F. (2023). *Indonesian Tsunami Catalog for the Years 416-2021*.