



Analisis Pemodelan Tsunami terhadap Perkiraan Kerusakan Infrastruktur di Kawasan Pantai Wediombo, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta

Octiana Lestyan Saputri¹, Kuswaji Dwi Priyono^{1*}, Aziz Akbar Mukasyaf¹, Nirma Lila Anggani¹

¹ Program Studi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta 57169, Indonesia

DOI: <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1775>

Article Info:

Received : 27 Februari 2026
Revised : 13 Maret 2026
Accepted : 02 April 2026
Published : 07 April 2026

Correspondence:

Kuswaji Dwi Priyono

Phone: +62 815-7503-9698

Abstract: The Wediombo Beach area, Gunungkidul Regency, Special Region of Yogyakarta, is located within a tsunami-prone zone caused by the subduction of the Indo-Australian Plate beneath the Eurasian Plate along the Sunda Subduction Zone. This study aims to: (1) model tsunami scenarios based on wave height variations of 7 m, 14 m, and 21 m; and (2) estimate the extent of infrastructure damage under each scenario in the Wediombo Beach area. Inundation zone modeling was performed using the DEM overlay method with 30-meter resolution SRTM data in ArcGIS, while infrastructure damage estimation followed the classification framework proposed by Schneider, Hoffmann, and Reicherter (2016), based on elevation and distance-to-coastline parameters. Infrastructure data were obtained through OpenStreetMap (OSM) digitization and validated by field surveys covering 64 infrastructure units. The modeling results indicate inundation areas of 0.023600 km² (7 m scenario), 0.032215 km² (14 m scenario), and 0.037193 km² (21 m scenario). Of the 64 infrastructure units analyzed, 51 units (79.69%) are potentially affected, comprising 23 units (44.23%) with severe damage, 15 units (28.85%) with moderate damage, and 14 units (26.92%) with minor damage. Economic infrastructure exhibits the highest impact rate (91.18%), whereas all transportation infrastructure remains unaffected across all three scenarios, indicating its strategic role as evacuation routes. These findings provide a scientific basis for tsunami hazard zonation and the formulation of coastal spatial planning policies in the Wediombo Beach area.

Keywords: Tsunami; DEM Overlay; Inundation Zone; Infrastructure Damage; Wediombo Beach; Disaster Mitigation.

Citation: Lestyan Saputri, O., Dwi Priyono, K., Mukasyaf, A. A., & Anggani, N. L. (2026). Analisis Pemodelan Tsunami terhadap Perkiraan Kerusakan Infrastruktur di Kawasan Pantai Wediombo, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, Dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 7(2), 845–854. <https://doi.org/10.29303/goescienceed.v7i2.1775>

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat kerawanan bencana tertinggi di dunia akibat posisi geografisnya yang terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dalam zona Cincin Api Pasifik, sehingga wilayah ini memiliki aktivitas seismik yang sangat tinggi. Kerentanan tersebut semakin besar di sepanjang zona megathrust Sumatera dan Selatan Jawa yang berpotensi memicu gempa bumi berkekuatan besar dan tsunami (Windupranata et al., 2024). Pesisir Selatan Jawa secara langsung dipengaruhi oleh aktivitas

zona subduksi Palung Jawa (*Java Trench*), yang terbentuk akibat penunjaman Lempeng Indo-Australia ke bawah Lempeng Eurasia dengan kecepatan 60–70 mm/tahun (Koulali et al., 2017). Muhari et al. (2019) menyebutkan bahwa tsunami Pangandaran tahun 2006 dengan ketinggian gelombang mencapai 21 meter dan tsunami Selat Sunda tahun 2018 menjadi bukti nyata bahwa ancaman tsunami di pesisir selatan Jawa bukan sekadar skenario hipotetis, melainkan bahaya nyata yang sewaktu-waktu dapat terjadi dan menimbulkan korban jiwa serta kerusakan infrastruktur secara masif.

Email: kdp130@ums.ac.id

Pantai Wediombo dengan karakteristik garis pantai sepanjang ± 71 km merupakan kawasan pesisir di Kabupaten Gunungkidul yang terletak berdekatan langsung dengan zona subduksi Selatan Jawa, sehingga rentan terhadap aktivitas seismik dan potensi tsunami. Rekaman aktivitas seismik periode 2024–2025 menunjukkan dinamika tektonik yang cukup aktif, di antaranya gempa berkekuatan Mw 5,8 pada Agustus 2024 yang diikuti ratusan gempa susulan, serta beberapa kejadian gempa bermagnitudo 4,0–5,2 pada kedalaman 10–70 km yang getarannya dirasakan masyarakat di Kecamatan Panggang, Tepus, dan Girisubo (BMKG, 2025). Meskipun rangkaian aktivitas tersebut belum menimbulkan kerusakan signifikan, kondisi ini mengindikasikan adanya akumulasi energi tektonik yang sewaktu-waktu dapat memicu gempa dangkal berkekuatan besar dan berpotensi menimbulkan tsunami.

Secara geomorfologi, Pantai Wediombo memiliki topografi khas berupa elevasi rendah di garis pantai dan lereng bukit di bagian belakangnya. Kemiringan kurang dari 5° dengan rasio lereng 1:50 hingga 1:1.000 menyebabkan amplifikasi ketinggian gelombang tsunami hingga dua hingga tiga kali lipat dibandingkan pantai yang lebih curam (Guntur et al., 2017), sekaligus memicu fenomena *drawdown* dan *run-up* tinggi yang memperluas potensi genangan dan meningkatkan daya rusak terhadap infrastruktur. Suppasri et al. (2021) menyatakan bahwa kondisi ini diperburuk oleh tidak adanya struktur pelindung teknis maupun vegetasi penyangga, sehingga kerusakan yang terjadi tidak hanya berdampak fisik, tetapi juga mengakibatkan kerugian ekonomi secara berantai, gangguan rantai pasokan, serta penurunan daya tarik wisata yang membutuhkan waktu pemulihan cukup lama.

Kawasan Pantai Wediombo memiliki indeks kesesuaian lahan wisata pesisir sebesar 84,52% (Budiasti et al., 2022), yang mendorong berkembangnya infrastruktur ekonomi secara masif di zona pesisir – berbanding terbalik dengan minimnya kajian ilmiah mengenai potensi bahaya tsunami di kawasan tersebut. Topografi pesisir yang didominasi dataran rendah di sekitar garis pantai, dikombinasikan dengan konsentrasi infrastruktur ekonomi dan sosial pada zona elevasi rendah, menempatkan kawasan ini pada tingkat kerentanan struktural yang tinggi terhadap genangan tsunami.

Survei lapangan Oktober 2025 mengidentifikasi 64 unit infrastruktur pada jarak 19–174 m dari garis pantai, dengan mayoritas berupa UMKM yang terkonsentrasi dalam radius < 50 m; mengacu pada Windupranata et al. (2024), infrastruktur pada jarak tersebut memiliki tingkat kerentanan 51–70% terhadap dampak tsunami, yang menegaskan urgensi kajian spasial bahaya tsunami di kawasan Pantai Wediombo.

Meskipun beberapa penelitian telah mengkaji bahaya tsunami di pesisir selatan Jawa, kajian spesifik yang mengintegrasikan pemodelan zona inundasi multi-skenario dengan estimasi kerusakan infrastruktur berbasis klasifikasi spasial di kawasan Pantai Wediombo belum pernah dilakukan. Marfai et al. (2019) dan Steinritz et al. (2021) telah memetakan bahaya tsunami di Gunungkidul secara umum, namun tidak menyertakan analisis kerentanan infrastruktur eksisting secara unit per unit. Kesenjangan inilah yang menjadi dasar urgensi penelitian ini.

Penelitian ini berkontribusi secara orisinal melalui dua hal: (1) penyusunan peta zona inundasi tsunami multi-skenario berbasis *overlay DEM* untuk kawasan Pantai Wediombo yang belum tersedia sebelumnya; dan (2) estimasi tingkat kerusakan infrastruktur pesisir secara spasial menggunakan kerangka klasifikasi Schneider et al. (2016) yang diadaptasi pada konteks lokal. Hasil penelitian diharapkan menjadi basis ilmiah bagi perencanaan tata ruang pesisir dan penyusunan strategi mitigasi bencana tsunami di kawasan Pantai Wediombo.

Metode

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif yang dikombinasikan dengan pendekatan geospasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk memodelkan potensi dampak tsunami terhadap infrastruktur di kawasan Pantai Wediombo. Pemodelan spasial dilakukan melalui teknik *overlay* multi-parameter dengan mengintegrasikan data ketinggian gelombang, elevasi lahan, dan jarak infrastruktur dari garis pantai guna menghasilkan estimasi tingkat kerusakan infrastruktur pada berbagai skenario kejadian tsunami (Rukhajeet et al., 2023). Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan gambaran spasial yang terukur dan sistematis sebagai dasar analisis risiko serta rekomendasi mitigasi bencana.

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan Pantai Wediombo, Desa Jepitu, Kecamatan Girisubo, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta ($8^\circ 11' 10,957''$ LS; $110^\circ 42' 35,759''$ BT), terletak di pesisir selatan Pulau Jawa yang berhadapan langsung dengan Samudra Hindia. Posisi geografis ini menempatkan kawasan tersebut dalam zona subduksi Lempeng Indo-Australia terhadap Lempeng Eurasia di sepanjang Zona Subduksi Sunda, sehingga memiliki kerentanan tinggi terhadap gempa bumi dan tsunami. Pemilihan lokasi didasarkan pada intensitas aktivitas wisata dan kepadatan infrastruktur pesisir yang signifikan, serta minimnya kajian ilmiah mengenai potensi bahaya tsunami secara spasial di kawasan ini.

Objek penelitian mencakup dua hal utama: (1) zona inundasi tsunami yang dimodelkan berdasarkan variasi ketinggian gelombang 7 meter, 14 meter, dan 21

meter; dan (2) infrastruktur eksisting di kawasan pesisir yang berpotensi terdampak genangan pada setiap skenario. Infrastruktur yang dikaji diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu infrastruktur ekonomi (warung, kios, dan penginapan), infrastruktur sosial

(mushola, toilet umum, dan pos jaga), serta infrastruktur transportasi (area parkir), dengan total 64 unit infrastruktur yang teridentifikasi dalam wilayah kajian.

Instrumen dan bahan penelitian yang digunakan disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Instrumen dan Bahan Penelitian

Instrumen/Bahan	Spesifikasi	Sumber	Jenis Data	Fungsi
<i>ArcGIS</i>	<i>Software SIG</i>	<i>ESRI</i>	–	<i>Overlay DEM</i> , ekstraksi elevasi, pengukuran jarak, visualisasi peta
<i>Time Stamp</i>	Dok. foto bermetadata waktu	Survei lapangan	Primer	Dokumentasi kondisi fisik aktual infrastruktur
Citra <i>Sentinel-2 (SAS Planet)</i>	Citra multispektral 10 m	<i>SAS Planet</i>	Sekunder	Acuan digitasi infrastruktur dan kondisi pesisir
Titik Infrastruktur	Koordinat lokasi infrastruktur	<i>Google Earth</i>	Primer	Basis koordinat lokasi setiap infrastruktur
<i>DEM SRTM</i>	Resolusi 30 m (1 <i>arc-second</i>)	BIG	Sekunder	Data elevasi dasar pemodelan zona inundasi
Data <i>OSM</i>	Data vektor infrastruktur	<i>OpenStreetMap</i>	Sekunder	Referensi awal sebaran dan jenis infrastruktur
Data Spasial Pantai	Data vektor garis pantai	BIG	Sekunder	Acuan pengukuran jarak infrastruktur dari pantai
Data Historis Tsunami	Kejadian tsunami pesisir selatan Jawa	Literatur/BMKG	Sekunder	Dasar penetapan skenario ketinggian gelombang
Peta Administrasi	Kel. Jepitu, Kec. Girisubo, Kab. Gunungkidul, DIY	BIG	Sekunder	Batas wilayah kajian dan referensi administratif

Sumber (*source*) : Penulis (2025)

Data sekunder meliputi: (1) citra *Sentinel-2* yang diakses melalui perangkat lunak *SAS Planet* sebagai acuan visual digitasi infrastruktur dan identifikasi kondisi eksisting kawasan pesisir; (2) *DEM SRTM* resolusi 30 meter dari Badan Informasi Geospasial (BIG) sebagai basis pemodelan elevasi; (3) data spasial garis pantai dari BIG sebagai acuan pengukuran jarak infrastruktur terhadap garis pantai; (4) data *OpenStreetMap (OSM)* sebagai referensi awal sebaran dan tipologi infrastruktur; (5) peta administrasi Desa Jepitu sebagai batas wilayah kajian; serta (6) data historis kejadian tsunami pesisir selatan Jawa sebagai dasar penetapan skenario ketinggian gelombang. Seluruh data infrastruktur didigitasi secara mandiri dalam *ArcGIS* dengan mengacu pada citra *Sentinel-2* dan koordinat *Google Earth*.

Data primer diperoleh melalui survei lapangan di kawasan Pantai Wediombo, meliputi verifikasi keberadaan, jenis, fungsi, dan kondisi fisik aktual setiap infrastruktur hasil digitasi, disertai dokumentasi foto bermetadata waktu menggunakan kamera dengan aplikasi *Time Stamp*. Data lapangan ini selanjutnya digunakan sebagai input final dalam seluruh tahapan analisis spasial. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan metode analisis geospasial

untuk memodelkan skenario tsunami dan memperkirakan kerusakan infrastruktur berdasarkan variasi ketinggian gelombang, yaitu 7 m, 14 m, dan 21 m, di kawasan Pantai Wediombo.

DEM

Tabel 2. Skema Reklasifikasi *DEM* Berdasarkan Skenario Ketinggian Gelombang

Kelas	Rentang Elevasi (m dpl)	Keterangan	Nilai Reklasifikasi
1	0 – 7	Zona Inundasi Skenario I	1
2	7,01 – 14	Zona Inundasi Skenario II	2
3	14,01 – 21	Zona Inundasi Skenario III	3
4	> 21	Tidak Tergenang	0

Sumber (*source*) : Penulis (2025)

Data *DEM SRTM* resolusi 30 meter yang diperoleh dari BIG diproses melalui tiga tahapan dalam *ArcGIS*: (1) pengisian cekungan elevasi (*fill sink*) untuk mengeliminasi anomali nilai *DEM* yang berpotensi menghasilkan zona genangan semu; (2) proyeksi ulang

ke sistem koordinat UTM Zona 49S guna menjamin akurasi perhitungan luas dan jarak linear dalam satuan meter; serta (3) pemotongan (*clip*) sesuai batas administrasi Kelurahan Jepitu sebagai wilayah kajian. Data DEM hasil praproses kemudian direklasifikasi menggunakan fungsi *Reclassify* berdasarkan nilai ambang batas ketinggian gelombang pada masing-masing skenario sebagaimana disajikan pada Tabel 2 diatas.

Proximity

Jarak setiap infrastruktur terhadap garis pantai diukur menggunakan fungsi *Near Analysis* pada *ArcGIS*, menghasilkan nilai jarak Euclidean terdekat dari tiap titik infrastruktur ke garis pantai BIG yang tersimpan sebagai atribut *NEAR_DIST* (meter). Nilai jarak ini berfungsi sebagai proksi intensitas paparan energi hidrodinamik tsunami, di mana infrastruktur yang lebih dekat ke garis pantai menerima energi gelombang lebih besar sehingga potensi kerusakan strukturalnya lebih tinggi. Pendekatan ini selaras dengan konsep *exposure* dalam kerangka penilaian kerentanan fisik bangunan terhadap tsunami.

Zonal Statistics

Nilai elevasi setiap infrastruktur diekstraksi dari data *DEM* menggunakan fungsi *Zonal Statistics as Table* pada *ArcGIS*, dengan parameter statistik minimum (MIN) yang merepresentasikan elevasi terendah pada zona lokasi masing-masing infrastruktur. Pemilihan nilai minimum didasarkan pada pertimbangan bahwa dalam konteks bahaya tsunami, elevasi terendah suatu infrastruktur merupakan titik paling rentan yang pertama kali terjangkau oleh genangan gelombang.

Intersect

Fungsi *Intersect* digunakan untuk menggabungkan layer titik infrastruktur dengan layer zona inundasi hasil *overlay*, sehingga setiap infrastruktur memperoleh atribut skenario inundasi terendah yang mampu menggenangnya. *Output* proses ini menghasilkan tabel atribut terpadu yang memuat identitas infrastruktur (nomor, kategori, koordinat), elevasi hasil *Zonal Statistics*, jarak dari garis pantai hasil *Near Analysis*, dan kode skenario terdampak pertama.

Overlay Spasial

Overlay spasial dilakukan menggunakan *Raster Calculator* untuk menghasilkan peta distribusi zona inundasi pada setiap skenario. Piksel *DEM* dengan nilai elevasi di bawah atau sama dengan nilai ambang batas diklasifikasikan sebagai zona berpotensi tergenang, dengan persamaan: Skenario I – *Con("DEM" ≤ 7, 1, 0)*; Skenario II – *Con("DEM" ≤ 14, 1, 0)*; dan Skenario III – *Con("DEM" ≤ 21, 1, 0)*. Raster hasil klasifikasi selanjutnya dikonversi ke format vektor menggunakan *Raster to Polygon*, dihitung luasnya melalui *Calculate Geometry*, dan divisualisasikan sebagai peta zona inundasi dengan kode warna biru (≤7 m), kuning (≤14 m), dan merah (≤21 m).

Skoring dan Klasifikasi Tingkat Kerusakan

Estimasi tingkat kerusakan infrastruktur dilakukan melalui sistem skoring berbasis dua parameter spasial yang diadaptasi dari Schneider et al. (2016), yaitu: (1) skenario inundasi, yang mencerminkan tinggi gelombang minimum yang mampu menggenangi infrastruktur; dan (2) jarak dari garis pantai, sebagai proksi intensitas paparan energi hidrodinamik gelombang. Skema pemberian skor dan klasifikasi tingkat kerusakan berdasarkan total skor masing-masing disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Skoring Parameter Klasifikasi Tingkat Kerusakan Infrastruktur

Parameter	Kondisi	Skor	Dasar Penentuan
Skenario Inundasi	Terdampak Skenario I (elevasi 0-7 m dpl)	3	Paparan gelombang tertinggi; elevasi terendah
	Terdampak Skenario II (elevasi 7,01-14 m dpl)	2	Paparan gelombang menengah
	Terdampak Skenario III (elevasi 14,01-21 m dpl)	1	Paparan gelombang rendah
	Elevasi > 21 m dpl	0	Di luar jangkauan semua skenario
Jarak dari garis pantai	< 50 meter	2	Zona paparan tinggi; energi gelombang penuh
	≥ 50 meter	1	Zona paparan sedang; terjadi reduksi energi gelombang

Sumber (*source*): Schneider et al. (2016) dan Dall'Osso et al. (2009); Modifikasi Penulis, 2025

Tabel 4. Klasifikasi Tingkat Kerusakan Berdasarkan Total Skor

Total Skor	Tingkat Kerusakan	Kriteria Spasial	Warna Simbologi
5	BERAT	Terdampak Skenario I + jarak < 50 m dari garis pantai	MERAH
3-4	SEDANG	Terdampak Skenario I + jarak ≥ 50 m, atau terdampak Skenario II	KUNING
1-2	RINGAN	Hanya terdampak Skenario III	HIJAU
0	TIDAK TERDAMPAK	Elevasi > 21 m dpl; di luar zona inundasi ketiga skenario	ABU-ABU

Hasil dan Diskusi

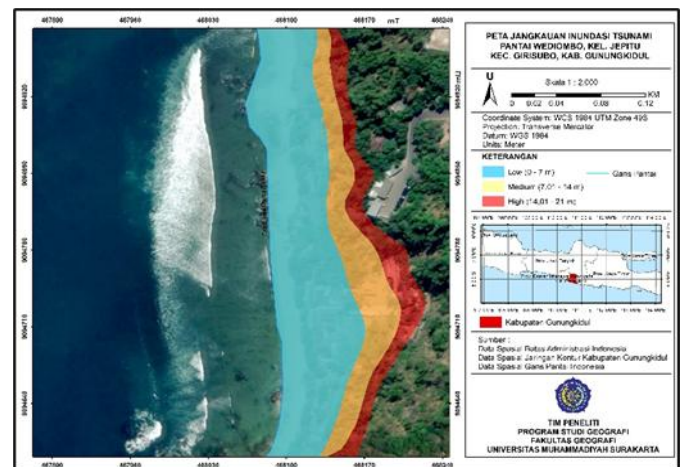
Pemodelan skenario inundasi tsunami dilakukan menggunakan metode *overlay* spasial berbasis data *Digital Elevation Model (DEM)* dalam lingkungan Sistem Informasi Geografis (SIG). Metode ini mengklasifikasikan seluruh area dengan nilai elevasi ≤ tinggi gelombang pada masing-masing skenario sebagai zona berpotensi tergenang, melalui tumpang-tindih *layer DEM* dengan ambang batas ketinggian gelombang yang telah ditetapkan. Pendekatan ini, sebagaimana dikemukakan oleh BNPB (2012) dan Koshimura et al. (2009), diakui valid dan efisien untuk kajian awal zonasi bahaya tsunami pada skala regional.

Tiga skenario ketinggian gelombang ditetapkan pada 7 m, 14 m, dan 21 m berdasarkan data historis tsunami di kawasan kajian, serta divisualisasikan menggunakan kode warna biru, kuning, dan merah secara berurutan guna memudahkan interpretasi dan perbandingan spasial antarskenario. Pendekatan multi-skenario semacam ini sejalan dengan praktik pemodelan bahaya tsunami berbasis skenario yang telah diterapkan secara luas, seperti yang dilakukan oleh Jumadi et al. (2025) di kawasan pesisir Pacitan yang menggunakan skenario gempa Mw 8,8 dengan simulasi propagasi tsunami berbasis *Shallow Water Equations*, serta oleh Steinritz et al. (2021) yang mengembangkan metode berbasis *ArcGIS* untuk menghitung zona risiko tsunami di Daerah Istimewa Yogyakarta.

Skenario I menghasilkan zona inundasi seluas 0,0236 km² pada rentang elevasi 0-7 m dpl. Zona ini terkonsentrasi di dataran rendah pesisir dengan pola distribusi yang dipengaruhi kemiringan lereng, sehingga menjadi nilai acuan (*baseline*) sekaligus mengindikasikan wilayah dengan kerentanan tertinggi, karena terdampak bahkan pada kejadian tsunami berintensitas rendah. Temuan ini konsisten dengan kajian yang menunjukkan bahwa wilayah

berkemiringan lereng sangat rendah (0-8%) secara konsisten terklasifikasi ke dalam zona bahaya tsunami sangat tinggi. Skenario II menghasilkan luas inundasi sebesar 0,0322 km², bertambah 0,0086 km² (36,50%) terhadap Skenario I.

Pertambahan yang relatif besar ini mencerminkan ketersediaan area luas pada rentang elevasi 7-14 m dpl yang berkarakteristik morfologi teras pantai (*coastal terrace*) dengan kenaikan elevasi yang bertahap. Skenario III menghasilkan zona inundasi terluas sebesar 0,037193 km², bertambah 0,004978 km² (15,45%) terhadap Skenario II. Meskipun interval ambang batas antarskenario konstan sebesar 7 m, laju pertambahan luas menunjukkan tren penurunan. Hal ini mencerminkan kondisi topografi yang semakin curam pada elevasi 14-21 m dpl, selaras dengan temuan Marfai et al. (2019) di Pantai Drini, Gunungkidul, bahwa topografi karst berkemiringan curam menjadi faktor pembatas signifikan terhadap jangkauan inundasi tsunami ke arah daratan.



Gambar 1. Peta Perbandingan Zona Inundasi Tsunami Kawasan Pantai Wediombo pada Tiga Skenario Tinggi Gelombang Sumber (*source*) : Penulis, 2025

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil *Overlay DEM* terhadap Skenario Tinggi Gelombang Tsunami

Skenario	Ambang Elevasi (m)	Luas Zona Inundasi (km ²)	Kode Warna	Rentang Elevasi Tergenang (m dpl)
I	7	0,023600	Biru	0 - 7
II	14	0,032215	Kuning	0 - 14
III	21	0,037193	Merah	0 - 21

Sumber (*source*): Hasil Analisis *Overlay DEM* (2025)

Meskipun kenaikan *threshold* antarskenario konstan sebesar 7 m, pertambahan luas zona inundasi bersifat tidak proporsional: peralihan Skenario I ke II

menghasilkan penambahan terbesar (0,0086 km²; 36,50%), sedangkan peralihan Skenario II ke III lebih kecil (0,0050 km²; 15,45%). Temuan ini menegaskan bahwa dalam metode *overlay DEM*, luas genangan lebih ditentukan oleh morfologi topografi lokal daripada besaran tinggi gelombang itu sendiri; temuan ini selaras dengan Bosserelle et al. (2021) yang menunjukkan

bahwa laju penambahan zona inundasi lebih dipengaruhi oleh gradien topografi daripada besaran skenario gelombang, dan bahwa *overestimasi* luas inundasi cenderung terjadi pada wilayah dataran rendah yang datar, sementara kawasan dengan lereng curam memperlihatkan perbedaan minimal antarskenario.

Tabel 6. Pertambahan Luas Zona Inundasi Antarskenario

Perbandingan Skenario	Pertambahan Luas (km ²)	Persentase Pertambahan	Rentang Elevasi Tambahan (m dpl)
Skenario I → II	0,008615	+36,50%	7 - 14
Skenario II → III	0,004978	+15,45%	14 - 21
Skenario I → III	0,013593	+57,60%	7 - 21

Sumber (source): Hasil Analisis *Overlay DEM* (2025)

Metode *overlay DEM* bersifat statis dan tidak mensimulasikan dinamika aliran tsunami secara nyata, sehingga faktor kecepatan rambat, arah datang gelombang, *run-up*, kekasaran permukaan, vegetasi, dan struktur pelindung pantai tidak diperhitungkan – berpotensi menghasilkan *overestimasi* luas inundasi. Kimpton et al. (2024) menyatakan bahwa metode *bathtub* berbasis *DEM* secara konsisten menghasilkan peta inundasi yang terlalu konservatif dengan karakteristik *overestimasi* yang ekstensif dibandingkan model numerik dinamis, serta oleh Tufekci-Enginar et al. (2022) menegaskan bahwa hasil pemodelan bahaya alam, termasuk pemodelan inundasi tsunami, sangat sensitif terhadap akurasi data elevasi masukan dan bahwa *underestimasi* tidak dapat diterima karena menghasilkan informasi yang tidak andal bagi pengambil keputusan dalam perencanaan mitigasi. Secara kuantitatif, studi komparasi menunjukkan bahwa metode *bathtub DEM* dapat menghasilkan *overestimasi* luas inundasi hingga 20–40% dibandingkan model hidrodinamika numerik, terutama pada wilayah dataran rendah berpantai landai seperti Wediombo. Implikasinya, angka luas inundasi yang dihasilkan dalam penelitian ini perlu diperlakukan

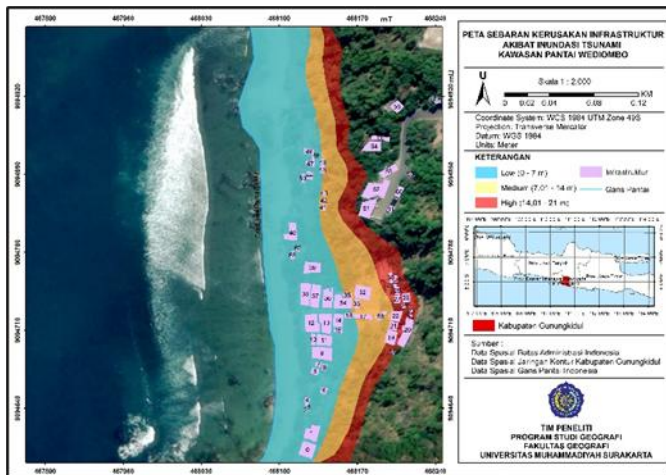
sebagai batas atas (*upper bound*) zonasi bahaya, bukan sebagai nilai absolut. Meskipun demikian, pendekatan ini diakui valid sebagai kajian awal zonasi bahaya tsunami pada skala lokal, dan hasil ketiga skenario inundasi selanjutnya menjadi basis spasial bagi estimasi kerusakan infrastruktur yang dibahas pada bagian berikut.

Estimasi tingkat kerusakan infrastruktur dilakukan menggunakan pendekatan klasifikasi berbasis tiga parameter spasial, yaitu skenario tinggi gelombang, elevasi infrastruktur (m dpl), dan jarak dari garis pantai (m), mengacu pada kerangka penilaian kerentanan fisik Schneider, Hoffmann, dan Reicherter (2016). Dari 51 infrastruktur yang berpotensi terdampak, klasifikasi menghasilkan 23 unit kerusakan berat (44,23%), 15 unit kerusakan sedang (28,85%), dan 14 unit kerusakan ringan (26,92%). Dominasi kerusakan berat pada hampir separuh infrastruktur terdampak mengindikasikan bahwa sebagian besar aktivitas ekonomi dan sosial di kawasan Pantai Wediombo terkonsentrasi pada zona dengan paparan bahaya tertinggi. Rincian selengkapnya disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Klasifikasi Tingkat Kerusakan Infrastruktur di Kawasan Pantai Wediombo

No. Infra.	Kategori	Skenario	Jarak (m)	Elevasi MIN (m dpl)	Tingkat Kerusakan
1-14	Ekonomi / Sosial	I	25,92-44,91	1,54-5,78	Berat
15-16, 34, 36, 44, 46, 47, 62	Ekonomi / Sosial	I	56,94-112,42	2,85-6,82	Sedang
37-40, 45, 48-50, 63	Ekonomi / Sosial	I	29,22-49,60	3,03-6,44	Berat
17, 32, 33, 41-43, 58	Ekonomi / Sosial	II	19,36-174,04	8,26-11,78	Sedang
18-31	Ekonomi / Sosial	III	77,93-127,33	16,04-18,79	Ringan

Sumber (source): Hasil Analisis *Overlay DEM* dengan Klasifikasi Schneider et al. (2016)



Gambar 2. Peta Sebaran Tingkat Kerusakan Infrastruktur Akibat Inundasi Tsunami di Kawasan Pantai Wediombo Sumber (source) : Penulis, 2025

Dari 64 infrastruktur yang dikaji, sebanyak 51 unit (79,69%) berpotensi terdampak genangan pada setidaknya satu skenario. Distribusi kerusakan didominasi kategori berat (44,23%), mengindikasikan tingkat paparan bahaya yang sangat tinggi di kawasan ini. Skenario I menjangkau 30 infrastruktur pada elevasi 1,54–6,82 m dpl. Dari jumlah tersebut, 23 unit diperkirakan mengalami kerusakan berat karena berada dalam jarak kurang dari 50 m dari garis pantai dan langsung terpapar energi gelombang penuh, terdiri atas 17 infrastruktur ekonomi dan 6 infrastruktur sosial. Temuan ini konsisten dengan Syafruddin et al. (2024) yang mengonfirmasi bahwa elevasi dan jarak dari garis pantai merupakan parameter penentu utama tingkat kerentanan tsunami, di mana wilayah berelevasi rendah dan berjarak dekat dari pantai secara konsisten terklasifikasi ke dalam zona kerentanan sangat tinggi.

Tabel 8. Rekapitulasi Infrastruktur Terdampak Pertama Kali per Skenario

Skenario	Tinggi Gel. (m)	Infra. Ekonomi	Infra. Sosial	Jml Baru Terdampak	Tingkat Kerusakan
I	7	21	9	30	Berat (jarak < 50 m) / SEDANG (jarak ≥ 50 m)
II	14	2	5	7	Sedang
III	21	8	6	14	Ringan
Tidak Tergenang	—	3	3	10*	—
Total	—	34	23	64	—

*termasuk 4 infrastruktur transportasi yang tidak terdampak pada ketiga skenario

Sumber: Hasil Analisis *Overlay DEM* dengan Klasifikasi Schneider et al. (2016)

Tabel 9. Distribusi Tingkat Kerusakan Berdasarkan Kategori Infrastruktur

Kategori Infrastruktur	Total Unit	Kerusakan Berat	Kerusakan Sedang	Kerusakan Ringan	Tidak Terdampak	% Terdampak
Infrastruktur Ekonomi	34	17 (50,00%)	4 (11,76%)	10 (29,41%)	3 (8,82%)	91,18%
Infrastruktur Sosial	23	6 (26,09%)	11 (47,83%)	4 (17,39%)	3 (13,04%)	86,96%
Infrastruktur Transportasi	4	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	4 (100%)	0%
Total	64	23 (44,23%)	15 (28,85%)	14 (26,92%)	10 (15,63%)	81,25%

Sumber: Hasil Analisis *Overlay DEM* dengan Klasifikasi Schneider et al. (2016)

Skenario II menambah 7 infrastruktur terdampak baru pada elevasi 8,26–11,78 m dpl, seluruhnya diperkirakan mengalami kerusakan sedang. Kasus infrastruktur no. 58 yang berjarak 174,04 m dari garis pantai namun berelevasi 11,78 m dpl dan tetap terdampak membuktikan bahwa jarak horizontal tidak dapat dijadikan indikator tunggal keamanan tanpa mempertimbangkan elevasi lahan. Hal ini dikonfirmasi oleh Jumadi et al. (2024) di Teluk Pacitan, yang

menunjukkan bahwa analisis bahaya tsunami multi-skenario memerlukan pertimbangan simultan antara ketinggian gelombang dan karakteristik topografi lokal.

Skenario III menambah 14 infrastruktur terdampak baru pada elevasi 16,04–18,79 m dpl dengan jarak 77,93–127,33 m dari garis pantai, seluruhnya diperkirakan mengalami kerusakan ringan. Pola spasial ini mengindikasikan bahwa pada skenario ekstrem, dataran pesisir Pantai Wediombo hingga elevasi 21 m

dpl berpotensi tergenang secara serentak, yang dapat mengakibatkan kelumpuhan fungsi infrastruktur secara menyeluruh. Kondisi ini selaras dengan temuan Ibrahim et al. (2023) di pesisir barat Aceh Besar, yang menunjukkan bahwa jangkauan inundasi maksimum pada dataran rendah dapat mencapai 6 km dengan kedalaman aliran 13 m pada skenario Mw 9,2, sementara kawasan berbukit di dekat garis pantai secara signifikan membatasi jarak inundasi ke daratan.

Infrastruktur ekonomi mencatat tingkat keterdampakan tertinggi, yaitu 91,18% dari 34 unit, dengan dominasi kerusakan berat akibat konsentrasinya pada elevasi sangat rendah yang langsung berhadapan dengan garis pantai. Temuan ini dikuatkan oleh Suppasri et al. (2022) yang mengonfirmasi bahwa bangunan komersial pesisir secara konsisten memiliki indeks kerentanan tertinggi terhadap tsunami dibandingkan tipologi bangunan lainnya. Infrastruktur sosial menyusul dengan keterdampakan 86,96% (20 dari 23 unit), konsisten dengan temuan Marfai et al. (2021) di Pantai Drini, Gunungkidul. Sebaliknya, seluruh infrastruktur transportasi (4 unit) yang berada pada elevasi 23,08–27,08 m dpl tidak terdampak pada ketiga skenario. Posisi elevasi yang aman ini menjadikan infrastruktur transportasi sebagai aset strategis jalur evakuasi sebagaimana dikonfirmasi Williams et al. (2020), sekaligus menjadi landasan ilmiah bagi prioritas relokasi dan penguatan struktural infrastruktur terdampak di kawasan Pantai Wediombo.

Kesimpulan

Penelitian ini menghasilkan dua temuan utama yang menjawab tujuan yang ditetapkan. Pertama, pemodelan overlay DEM menghasilkan tiga zona inundasi tsunami dengan luas 0,023600 km² (skenario 7 m), 0,032215 km² (14 m), dan 0,037193 km² (21 m); penambahan luas yang tidak proporsional terhadap kenaikan threshold yang konstan mencerminkan distribusi elevasi topografi lokal, di mana area pada rentang 7–14 m dpl lebih luas dibandingkan 14–21 m dpl. Kedua, dari 64 infrastruktur yang dikaji, 51 unit (79,69%) terdampak dengan rincian 23 unit kerusakan berat (44,23%), 15 unit sedang (28,85%), dan 14 unit ringan (26,92%); dominasi kerusakan berat pada infrastruktur ekonomi di zona elevasi rendah menegaskan bahwa aktivitas perekonomian pesisir terkonsentrasi pada wilayah paling rentan terhadap tsunami.

Infrastruktur transportasi yang seluruhnya berada pada elevasi aman (≥ 23 m dpl) berpotensi menjadi tulang punggung jalur evakuasi dan perlu diprioritaskan dalam rencana kontingensi bencana tsunami di kawasan ini. Berdasarkan temuan tersebut, terdapat tiga rekomendasi operasional yang dapat ditindaklanjuti: (1) penetapan zona larangan

pembangunan permanen pada area elevasi < 7 m dpl dalam radius < 50 m dari garis pantai, mengingat seluruh infrastruktur pada zona ini diprediksi mengalami kerusakan berat bahkan pada skenario tsunami intensitas rendah; (2) relokasi atau penguatan struktural infrastruktur ekonomi dan sosial yang teridentifikasi pada zona kerusakan berat dan sedang, dengan mengacu pada peta sebaran kerusakan yang dihasilkan penelitian ini sebagai dasar prioritas; serta (3) optimalisasi infrastruktur transportasi eksisting pada elevasi ≥ 23 m dpl sebagai titik kumpul dan koridor evakuasi vertikal yang dilengkapi rambu evakuasi tsunami. Untuk meningkatkan akurasi dan kedalaman kajian, integrasi dengan pemodelan numerik hidrodinamika berbasis Shallow Water Equations dan validasi menggunakan data historis tsunami pesisir selatan Jawa direkomendasikan sebagai tahap kajian lanjutan.

Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan konstruktif yang diberikan pada setiap tahapan penelitian ini. Apresiasi juga disampaikan kepada pengelola Kawasan Wisata Pantai Wediombo dan seluruh instansi terkait yang telah memberikan izin akses lokasi serta memfasilitasi proses pengumpulan data lapangan. Penelitian ini merupakan bagian dari tugas akhir pada Program Studi Geografi, Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta. Penulis mengakui dan menghargai kontribusi seluruh pihak yang telah terlibat, baik secara langsung maupun tidak langsung, dalam penyelesaian penelitian ini.

Referensi

- Barberopoulou, A., Borrero, J. C., Uslu, B., Legg, M. R., & Synolakis, C. E. (2011). A second generation of tsunami inundation maps for the state of California. *Pure and Applied Geophysics*, 168, 2133–2146. <https://doi.org/10.1007/s00024-011-0293-3>
- BMKG. (2025). Data gempa bumi wilayah Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. Retrieved from <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/gempa-bumi-m5>
- BNPB. (2012). Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 02 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Bosserelle, C., Williams, S., Lane, E., & Cheung, K. F. (2021). Multiscale quantification of tsunami hazard exposure in a Pacific small island developing state: The case of Samoa.

- GeoHazards, 2(2), 4.
<https://doi.org/10.3390/geohazards2020004>
- Budiasti, R. R., Suryanti, S., & Purnowo, P. W. (2022). Tourism Suitability Analysis of Wediombo Beach, Gunungkidul Regency, Yogyakarta Special Region, Indonesia. *Journal of Environmental and Agricultural Studies*, 3(2), 01–06. <https://doi.org/10.32996/jeas.2022.3.2.1>
- Dall'Osso, F., Gonella, M., Gabbianelli, G., Withycombe, G., & Dominey-Howes, D. (2009). A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(5), 1557–1565. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1557-2009>
- Guntur, A., Setyawan, W. B., & Marfai, M. A. (2017). Tsunami vulnerability assessment in Gunungkidul coastal area. *Journal of Coastal Conservation*, 21(3), 415–427. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0514-8>
- Ibrahim, Syamsidik, Azmeri, Hasan, M., Irwansyah, A., & Al Farizi, M. D. (2023). Assessing tsunami vertical evacuation processes based on probabilistic tsunami hazard assessment for west coast of Aceh Besar, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00238-5>
- Josiah, N. R., Laknath, D. P. C., & Araki, S. (2019). Simulation of Tsunami Inundation in East Coast of Sri Lanka (pp. 145–152). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-0291-0_21
- Jumadi, J., Priyono, K. D., Sasmi, A. T., Saputra, A., & Gomez, C. (2024). Multi-scenarios tsunami hazard and evacuation routes using seismic data in Pacitan Bay, Indonesia. *International Journal of Geomate*, 26, 46–53. <https://doi.org/10.21660/2024.113.g12345>
- Jumadi, J., Priyono, K. D., Amin, C., Saputra, A., Gomez, C., Lam, K. C., Rohman, A., Patel, N., Sattar, F., Nawaz, M., & Wardani, K. S. (2025). Tsunami risk mapping and sustainable mitigation strategies for megathrust earthquake scenario in Pacitan coastal areas, Indonesia. *Sustainability*, 17(6), 2564. <https://doi.org/10.3390/su17062564>
- Kimpton, J., Davies, G., & Horspool, N. (2024). A rapid simplified method for determining tsunami inundation extent based on energy conservation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1111/mice.13168>
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), 243–273. <https://doi.org/10.1142/S0578563409002004>
- Koulali, A., McClusky, S., Susilo, S., Leonard, Y., Cummins, P., Tregoning, P., & Wijanarto, A. B. (2017). The kinematics of crustal deformation in Java from GPS observations: Implications for fault slip partitioning. *Earth and Planetary Science Letters*, 458, 69–79.
- Marfai, M. A., Khakim, N., Fatchurohman, H., Cahyadi, A., Wibowo, Y. A., & Rosaji, F. S. C. (2019). Tsunami hazard mapping and loss estimation using geographic information system in Drini Beach, Gunungkidul coastal area, Yogyakarta, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*.
- 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), 2028. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08357-9>
- Muhari, A., Heidarzadeh, M., Susmoro, H., Nugroho, H. D., Kriswati, E., Supartoyo, Wijanarto, A. B., Imamura, F., & Arikawa, T. (2019). The December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami as inferred from post-tsunami field surveys and spectral analysis. *Pure and Applied Geophysics*, 176, 5219–5233. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02358-2>
- Rukhaje, S., Brahmasakha Na Sakolnagara, T., Srisuwan, J., Putklang, W., & Hanif, M. (2023). Spatial assessment impact of tsunami hazard on the transportation infrastructure in Phuket South of Thailand. In A. Basit et al. (Eds.), *Proceedings of the International Conference on Radioscience, Equatorial Atmospheric Science and Environment and Humanosphere Science (INCREASE 2022): Springer Proceedings in Physics (Vol. 290, pp. 567–576)*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9768-6_52
- Schneider, B., Hoffmann, G., & Reicherter, K. (2016). Scenario-based tsunami risk assessment using a static flooding approach and high-resolution digital elevation data: An example from Muscat in Oman. *Global and Planetary Change*, 139, 183–194. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.02.005>
- Steinritz, V., Pena-Castellnou, S., Marliyani, G. I., & Reicherter, K. (2021). GIS-based study of tsunami risk in the Special Region of Yogyakarta (Central Java, Indonesia). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 851(1),

012007. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/851/1/012007>
- Suppasri, A., Maly, E., Kitamura, M., Syamsidik, S., Pescaroli, G., Alexander, D., & Imamura, F. (2021). Cascading disasters triggered by tsunami hazards: A perspective for critical infrastructure resilience and disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, 102597. <https://doi.org/10.1016/J.IJDRR.2021.102597>
- Suppasri, A., Murshed, S. N., Pakoksung, K., Charvet, I., Archetti, R., & Latcharote, P. (2022). Tsunami vulnerability evaluation for a small ancient village on eastern Sicily coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(2), 268. <https://doi.org/10.3390/jmse10020268>
- Syafruddin, M., Haryanto, Y., & Widodo, A. (2024). Vulnerability and tsunami disaster on the west coast Banten province, Indonesia. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/27669645.2024.2323355>
- Tufekci-Enginar, D., Dogan, G. G., Suzen, M. L., et al. (2022). Performance analysis of open-source DEMs in tsunami inundation modelling. *Earth Science Informatics*, 15, 2447-2466. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00852-1>
- Williams, J. H., Wilson, T. M., Horspool, N., Paulik, R., Wotherspoon, L., Lane, E. M., & Hughes, M. W. (2020). Assessing transportation vulnerability to tsunamis: Utilising post-event field data from the 2011 Tōhoku tsunami, Japan, and the 2015 Illapel tsunami, Chile. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2), 451-470. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-451-2020>
- Windupranata, W., Al Ghifari, M. W., Nusantara, C. A. D. S., Shafa, M., Hayatiningsih, I., Mulia, I. E., & Nuraghnia, A. (2024). Probabilistic Tsunami Hazard Analysis of Batukaras Village as a Tourism Village in Indonesia. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-2860>