

Tsunami Hazard Level Mapping Using Geographic Information Systems in Trenggalek Regency

Pemetaan Tingkat Bahaya Tsunami Menggunakan Sistem Informasi Geografis di Kabupaten Trenggalek

M. Rakif Panguale ^{ID1*}, **Moh. Saiful Rahman Hamka** ^{ID1}, **Syafril Mayu Dinata** ^{ID1}, **Ryzka Arsalia** ^{ID1}, **Aisyah Nur Nabila** ^{ID1}, **Santi Febrianti** ^{ID1}, **N.A.A. Dinda Agustina** ^{ID2}

*Email corresponding author: muhamad.rakif@ppns.ac.id

¹Teknik Perancangan Dan Konstruksi Kapal, Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60117, Indonesia.

²Teknik Bangunan Kapal, Teknik Bangunan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Surabaya, 60117, Indonesia.

Abstract. Indonesia's southern coastal regions, including Trenggalek Regency, are highly vulnerable to tsunamis due to their proximity to the active subduction zone along the Indian Ocean. Accurate hazard mapping is therefore crucial to support disaster risk reduction efforts. This study aims to analyze and map the tsunami hazard level in the coastal region of Trenggalek Regency using a spatial modeling approach based on Geographic Information Systems (GIS). The method integrates topographic slope, surface roughness, and tsunami wave height data to estimate inundation extent through a mathematical model that incorporates *Hloss* (wave height loss). The model outputs were used to generate a tsunami hazard index, ranging from 0 to 1, and classified into three hazard classes: low, medium, and high. The results indicate that coastal areas with flat terrain and low roughness coefficients such as settlements and rice fields in the districts of Watulimo, Panggul, and Munjungan are categorized as high hazard zones due to their vulnerability to wide-scale inundation. In contrast, forested or steep-sloped regions demonstrate limited inundation extents due to greater physical resistance. This spatial mapping provides essential information for disaster mitigation, coastal planning, and early warning system development in tsunami-prone areas.

Keywords: tsunami hazard, inundation, spatial modeling, Trenggalek, GIS

Abstrak. Wilayah pesisir selatan Indonesia, termasuk Kabupaten Trenggalek, memiliki kerentanan tinggi terhadap tsunami karena kedekatannya dengan zona subduksi aktif di Samudera Hindia. Oleh karena itu, pemetaan bahaya yang akurat menjadi sangat penting untuk mendukung upaya pengurangan risiko bencana. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan memetakan tingkat bahaya tsunami di wilayah pesisir Kabupaten Trenggalek menggunakan pendekatan pemodelan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Metode yang digunakan mengintegrasikan data kelerengan topografi, kekasaran permukaan, dan tinggi gelombang tsunami untuk memperkirakan luas genangan melalui model matematis berbasis nilai *Hloss* (kehilangan ketinggian gelombang). Hasil model digunakan untuk menghasilkan indeks bahaya tsunami dengan rentang nilai 0 hingga 1, yang kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kelas bahaya: rendah, sedang, dan tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa wilayah pesisir dengan topografi datar dan koefisien kekasaran rendah seperti kawasan permukiman dan persawahan di Kecamatan Watulimo, Panggul, dan Munjungan termasuk dalam kategori bahaya tinggi karena berpotensi mengalami genangan luas. Sebaliknya, daerah berhutan atau bertopografi curam menunjukkan jangkauan genangan yang lebih terbatas karena memiliki hambatan fisik yang lebih besar. Pemetaan spasial ini memberikan informasi penting untuk mitigasi bencana, perencanaan wilayah pesisir, dan pengembangan sistem peringatan dini di daerah rawan tsunami.

Kata Kunci: bahaya tsunami, genangan, pemodelan spasial, Trenggalek, SIG

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang rawan terhadap bencana alam karena terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia, dan Lempeng Pasifik (Setyaningsih et al., 2022). Lempeng Indo-Australia bergerak sepanjang tahun dengan kecepatan relatif sekitar 7 cm per tahun mendekati Lempeng Eurasia, yang menjadikan Indonesia berada di dalam wilayah *ring of fire* (Jumadi et al., 2023). Pergerakan lempeng-lempeng ini dapat menyebabkan tumbukan dan patahan di laut, yang jika terjadi di wilayah laut dangkal dalam skala besar, dapat memicu terjadinya tsunami.

Tsunami adalah gelombang laut dahsyat yang muncul karena adanya pergerakan atau gangguan yang tiba-tiba di bawah laut, umumnya disebabkan oleh

aktivitas tektonik seperti gempa bumi bawah laut atau letusan gunung api bawah laut. Wilayah yang memiliki risiko tinggi meliputi Pulau Jawa (yang paling padat penduduknya), Sumatera bagian selatan, serta pulau-pulau kecil di lepas pantainya. Risiko ini disebabkan oleh interaksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia, di mana Lempeng Indo-Australia menunjam ke bawah Lempeng Eurasia dan membentuk zona subduksi Sunda (Sudaryanto et al., 2024; Putri et al., 2024). Zona konvergensi ini menciptakan kondisi yang mendukung terjadinya peningkatan signifikan dalam kejadian gempa bumi dan tsunami.

Secara geografis, wilayah pesisir selatan Pulau Jawa termasuk Kabupaten Trenggalek berada dalam zona risiko tinggi terhadap kejadian tsunami. Proksimitas wilayah ini terhadap zona subduksi aktif di selatan Jawa meningkatkan kerentanannya terhadap gempa bumi tektonik berkekuatan besar yang berpotensi memicu tsunami dan sering disebut sebagai zona megathrust. Segmen *megathrust* Jawa Timur yang membentang sepanjang pantai Selatan Jawa Timur menunjukkan bahwa segmen megathrust ini memiliki potensi untuk melepaskan energi yang sangat besar, dengan beberapa skenario terburuk memperkirakan potensi gempa hingga magnitudo 8,7 (Pusat Studi Gempa Nasional [PuSGeN], 2017). Selain itu, berdasarkan hasil studi endapan paleotsunami menunjukkan bahwa endapan Tsunami yang dijumpai di Teleng, Pacitan dan Prigi, Trenggalek diidentifikasi sebagai endapan Paleotsunami yang terjadi pada 1921 dan 1930 (Anugrah et al., 2015). Penemuan endapan Paleotsunami pada tahun-tahun tersebut didukung dengan katalog tsunami BMKG yang mencatat kejadian tsunami pada 1921 dan 1930 dengan magnitudo berturut-turut 7,8 dan 6,5 (Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika [BMKG], 2019).

Sebagai wilayah dengan karakteristik geotektonik yang kompleks dan riwayat kejadian tsunami masa lalu, pesisir selatan Jawa, termasuk Kabupaten Trenggalek, memiliki tingkat risiko tsunami yang sangat tinggi. Hal ini diperkuat oleh kajian yang menunjukkan bahwa kawasan ini memiliki kepadatan penduduk yang tinggi dan berada tepat pada zona subduksi lempeng tektonik yang aktif, menjadikannya salah satu wilayah dengan eksposur tsunami tertinggi di Indonesia (Hall et al., 2017; Surindar & Nurhadi, 2021). Mengingat tingkat kerentanan tersebut, pengembangan peta bahaya tsunami menjadi elemen kunci dalam strategi mitigasi risiko bencana. Peta ini tidak hanya penting untuk perencanaan pembangunan yang tangguh bencana, tetapi juga berperan dalam meningkatkan kapasitas kesiapsiagaan masyarakat pesisir dalam menghadapi potensi kejadian tsunami di masa mendatang.

Pemanfaatan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) memegang peranan penting dalam pemodelan skenario potensi bahaya tsunami. SIG merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk membantu dalam pengumpulan, pemeliharaan, penyimpanan, analisis, keluaran, dan distribusi dari data dan informasi spasial (Sarah et al., 2024). Dalam konteks pembuatan peta bahaya tsunami, SIG memungkinkan integrasi dan analisis data spasial multidimensi, seperti *Digital Elevation Model* (DEM), klasifikasi tutupan lahan, serta parameter ketinggian gelombang tsunami. Pembuatan peta bahaya tsunami menggunakan SIG merupakan langkah strategis dalam mendukung proses identifikasi, evaluasi, serta pengambilan keputusan yang terbilang cepat dan efektif dengan akurasi yang tinggi (Sambah et al., 2018; Paramita et al., 2021). Beberapa penelitian telah menunjukkan hasil yang baik diterapkan di beberapa wilayah seperti Bengkulu (Fachri et al., 2022; Anjeli et al.,

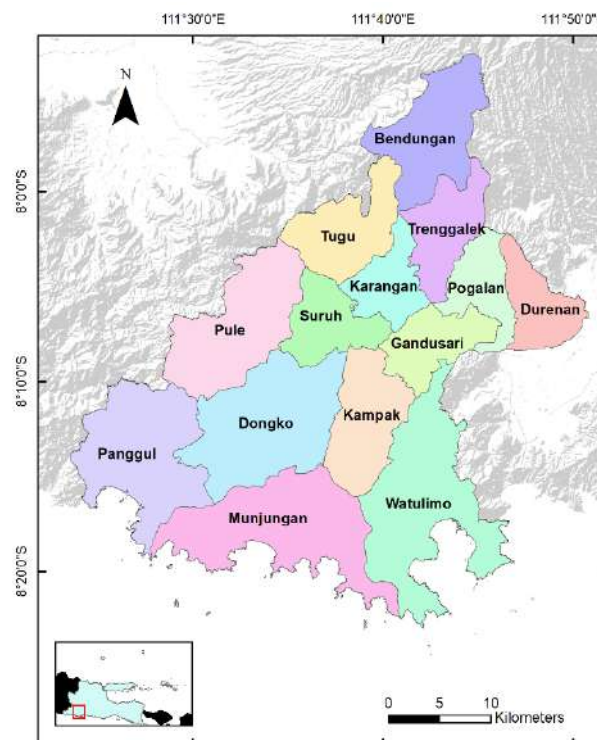
2025), Serang (Paramita et al., 2021), Cilegon (Sarah et al., 2024), Yogyakarta (Steinrizt et al., 2021; Setyaningsih et al., 2022, Sudaryatno et al., 2024), Ambon (Rakuasa dan Salakory 2020).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis spasial potensi bahaya bencana tsunami dan melakukan pemetaan area potensi terdampak inundasi tsunami di wilayah pesisir Kabupaten Trenggalek sebagai salah satu upaya mitigasi bencana. Manfaat yang diharapkan yaitu berdasarkan peta bahaya yang dihasilkan dapat dibuat langkah meminimalkan dampak bencana tsunami di sekitar wilayah Kabupaten Trenggalek dengan menggunakan pendekatan Proses pemetaan dilakukan dengan menggabungkan pendekatan SIG.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Data Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah pesisir Kabupaten Trenggalek, Provinsi Jawa Timur, yang terletak di pesisir Selatan Pulau Jawa. Kabupaten Trenggalek berhadapan langsung dengan zona subduksi, yaitu pertemuan antara Lempeng Eurasia (di utara) dan Lempeng Indo-Australia (di selatan). Zona subduksi di selatan Jawa ini menyebabkan tingkat kegempaan yang tinggi dan potensi terjadinya gempa bumi megathrust, yang berisiko menimbulkan bencana tsunami di sepanjang pesisir selatan Jawa, termasuk Trenggalek. Untuk memberikan gambaran visual tentang area penelitian, peta wilayah Kabupaten Trenggalek ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Kabupaten Trenggalek

Penelitian ini memanfaatkan data sekunder yang diunduh sepenuhnya dari sejumlah situs resmi dan platform daring milik institusi nasional. Seluruh data tersebut

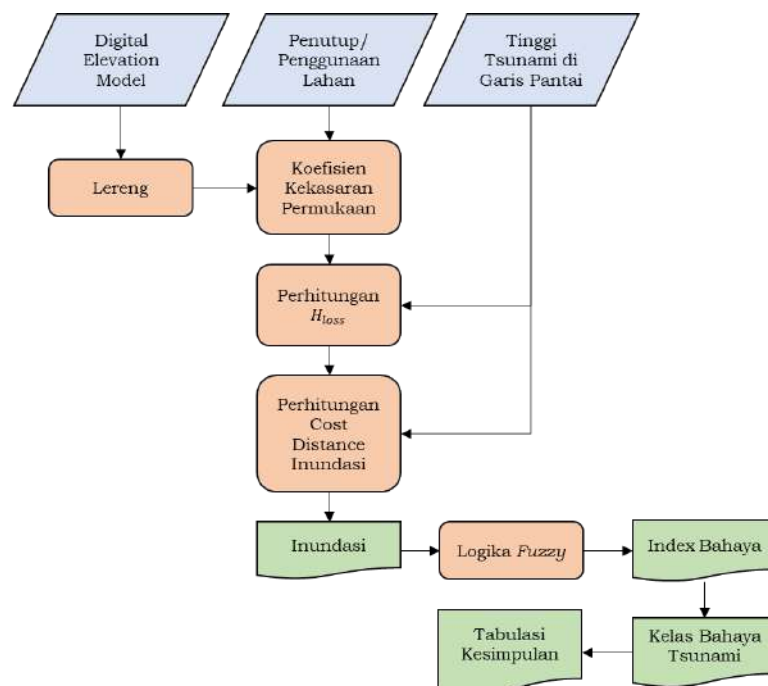
menjadi acuan utama dalam proses analisis untuk pemodelan bahaya tsunami. Adapun jenis data yang digunakan dijabarkan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Data dan sumber data penelitian

Jenis Data	Format	Sumber	Keterangan
Digital Elevation Model (DEM)	Raster	FABDEM (<i>Forest And Buildings removed Copernicus DEM</i>) dan DeltaDTM	Resolusi 30 meter
Tutupan Lahan	Polygon	Badan Informasi Geospasial (BIG)	Klasifikasi tutupan lahan
Tinggi Tsunami	Polyline	Hasil <i>Probabilistic Tsunami Hazard Assessment</i> (PTHA) oleh Horspool at al. (2014)	Tinggi tsunami sepanjang garis pantai
Batas Administratif	Polygon	Badan Informasi Geospasial (BIG)	Batas desa dan kecamatan

Metode Pengolahan Data

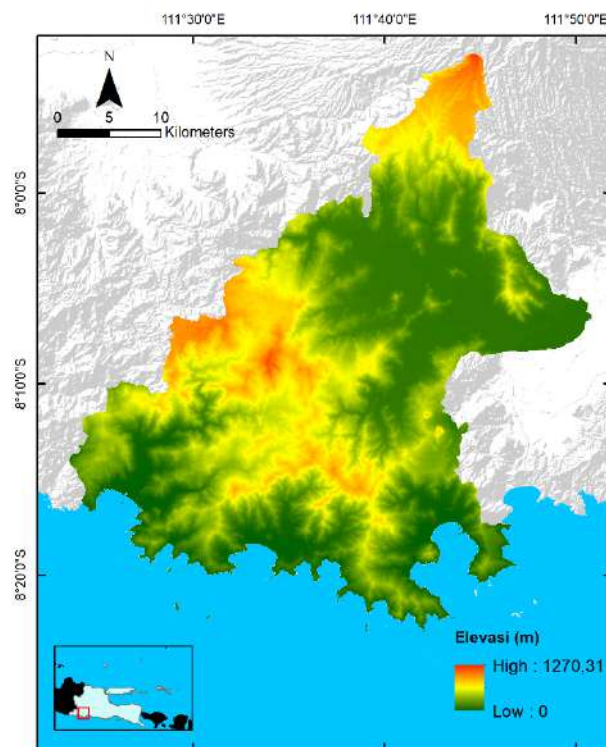
Pengolahan data dalam penelitian ini meliputi analisis dan pemodelan spasial untuk memetakan kelas bahaya tsunami menggunakan SIG. Proses ini seluruhnya dilakukan menggunakan perangkat lunak *ArcGIS* dan dibantu oleh *Microsoft Excel* untuk tabulasi data. Secara umum diagram alir metode pemetaan bahaya yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir metode pemetaan bahaya tsunami (dimodifikasi dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana [BNPB], 2018)

Pembuatan Peta Kelerengan

Data Digital Elevation Model (DEM) merupakan data raster yang menyajikan informasi ketinggian permukaan bumi dalam bentuk spasial. Data DEM yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data DTM. Penelitian ini menggunakan dua sumber data *Digital Terrain Model (DTM)*, yaitu DeltaDTM untuk rentang elevasi 0 hingga 10 meter yang memang khusus dioptimalkan untuk wilayah pesisir dan dataran rendah (Pronk et al., 2024) dan FABDEM untuk elevasi di atas 10 meter. FABDEM memiliki data yang lebih akurat daripada data global lain (Marsh et al., 2023; Nahed et al., 2023). Selain itu, resolusi spasial FABDEM yang lebih baik memungkinkan representasi fitur topografi yang lebih kecil seperti jalur aliran sempit, menjadikannya komponen penting dalam pembuatan peta bahaya tsunami. Kedua dataset tersebut diasimilasikan menggunakan metode *blending* untuk menghasilkan model elevasi yang komprehensif (Gambar 3). Hasil model elevasi yang telah diasimilasi tersebut, dilakukan analisis kemiringan lahan menggunakan perangkat lunak *ArcGIS*, yang menghitung perubahan elevasi antar piksel dalam satuan derajat. Hasil akhir dari proses ini berupa peta kelerengan yang merepresentasikan tingkat kemiringan topografi wilayah.

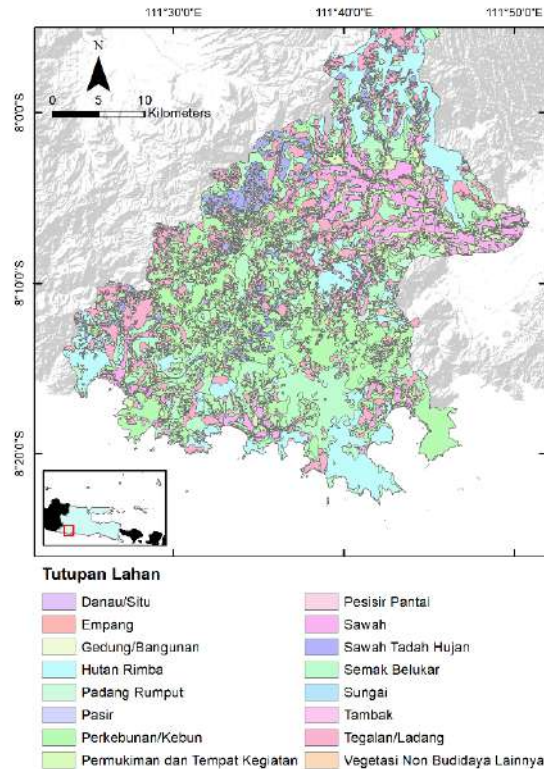


Gambar 3. Peta *Data Digital Elevation Model (DEM)* Kabupaten Trenggalek

Pembuatan Peta Kekasaran Permukaan

Peta kekasaran dianalisis menggunakan data vektor tutupan lahan (Gambar 4). Data tutupan lahan Kabupaten Trenggalek terlebih dahulu dilakukan koreksi spasial serta kesesuaiannya dengan batas wilayah administratif kemudian masing-masing kelas tutupan lahan diklasifikasikan ke dalam kategori nilai koefisien kekasaran (*roughness coefficient*) berdasarkan referensi pada Tabel 2. Setiap jenis tutupan lahan memiliki koefisien kekasaran permukaan yang berbeda; semakin tinggi koefisiennya, semakin kompleks penggunaan lahan tersebut untuk genangan air, begitu juga

sebaliknya (Sudaryatno et al., 2024). Data koefisien kekasaran yang telah diklasifikasikan selanjutnya diubah ke dalam format raster untuk dianalisis lebih lanjut. Data ini kemudian diintegrasikan dengan data DEM dalam proses pemodelan, dengan tujuan untuk memperhitungkan pengaruh hambatan permukaan terhadap penyebaran dan kedalaman genangan tsunami.



Gambar 4. Peta penutup lahan Kabupaten Trenggalek (Badan Informasi Geospasial)

Tabel 2. Koefisien kekasaran berdasarkan penutup lahan (Badan Nasional Penanggulangan Bencana [BNPB], 2018)

Jenis	Nilai Koefisien
Badan Air	0,007
Rawa	0,015
Empang	0,007
Tambak	0,01
Pasir/Bukit Pasir	0,018
Semak/Belukar	0,04
Padang Rumput	0,02
Hutan	0,07
Kebun/Perkebunan	0,035
Tegalan/Ladang	0,03
Sawah	0,02
Lahan Pertanian	0,025
Pemukiman/Lahan Terbangun	0,05
Mangrove	0,06

Pemetaan Genangan Tsunami

Sebaran spasial luasan wilayah terdampak tsunami dihitung menggunakan model matematis yang dikembangkan oleh Berryman (2006). Model ini merupakan perhitungan kehilangan ketinggian tsunami per 1m jarak ketinggian genangan berdasarkan harga jarak terhadap lereng dan kekasaran permukaan. Secara matematis model tersebut digambarkan dengan Persamaan (1):

$$\left(H_{loss} = \frac{167 n^2}{H_0^{1/3}} \right) + 5 \sin S \quad (1)$$

Dimana:

- H_{loss} : kehilangan ketinggian tsunami per 1m jarak inundasi
- n : koefisien kekasaran permukaan
- H_0 : ketinggian gelombang tsunami di garis pantai (m)
- S : besarnya lereng permukaan (derajat)

Model pada persamaan (1) mengintegrasikan resistensi dari permukaan daratan terhadap propagasi gelombang tsunami dan pengaruh topografi. Hasil pada model persamaan (1) selanjutnya dilakukan perhitungan *cost distance* bersama data tinggi tsunami di pinggir pantai. Pada penelitian ini, data tinggi tsunami yang digunakan merupakan hasil dari perkiraan tinggi tsunami dengan menggunakan metode *probabilistic tsunami hazard assessment* (PTHA) (Horspool at al., 2014). *Cost distance* merupakan proses menghitung seberapa jauh inundasi yang dicapai oleh rambatan tsunami dari garis pantai pada skenario yang telah ditentukan (Abdillah & Muhsoni, 2020)

Analisis Bahaya Tsunami

Analisis terhadap potensi bahaya tsunami dilakukan dengan mengklasifikasikan tinggi genangan ke dalam indeks bahaya, yang selanjutnya dibagi menjadi tiga kategori tingkat risiko. Tahap awal dalam proses ini adalah pembentukan indeks menggunakan pendekatan logika *fuzzy*, yang dinilai efektif dalam mengelompokkan data spasial dengan nilai kontinu ke dalam kategori diskrit. Indeks bahaya tsunami merepresentasikan hasil transformasi dari estimasi tinggi genangan tsunami, dengan rentang nilai antara 0 hingga 1. Pendekatan ini merepresentasikan tingkat bahaya tsunami, seperti rendah, sedang, atau tinggi berdasarkan nilai indeks tersebut. Semakin besar tinggi gelombang tsunami (melebihi 3 meter), maka nilai indeks akan semakin mendekati 1. Sebaliknya, jika tinggi tsunami berada di bawah 1 meter, nilai indeks akan cenderung mendekati 0. Hasil akhir dari analisis ini berupa peta bahaya tsunami yang menggambarkan distribusi spasial dari masing-masing kategori bahaya, yang disajikan hingga pada skala administratif tingkat kecamatan.

Analisis Statistik dan Tabulasi Bahaya Tsunami

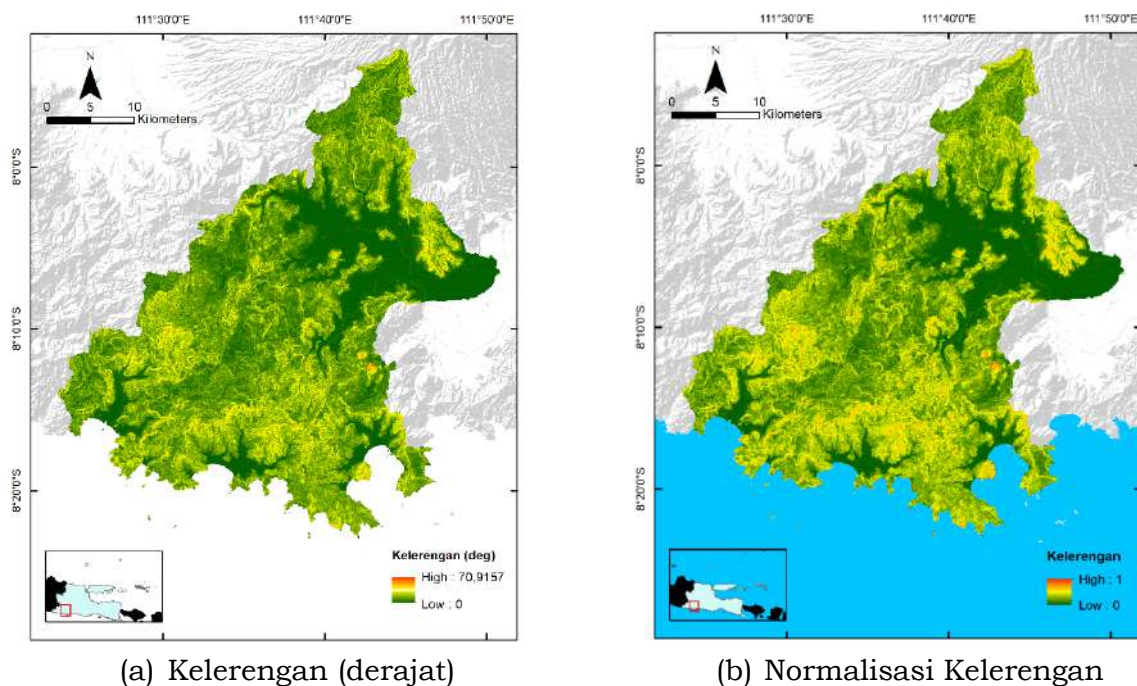
Analisis ini dilakukan menggunakan analisis statistik zonal (*zonal statistics*) berdasarkan batas administrasi desa. Metode ini digunakan untuk menghitung luasan area dari masing-masing kelas bahaya. Hasil tabulasi sebaran luasan bahaya pada

setiap tingkat wilayah administratif yang diperoleh kemudian divisualisasikan dalam bentuk tabel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Peta Kelerengan

Peta kelerengan merupakan faktor penting dalam menetapkan tingkat bahaya tsunami di suatu wilayah karena dapat mempengaruhi penetrasi gelombang dan luas jangkauan genangan tsunami. Kondisi topografi yang cenderung datar memungkinkan gelombang untuk bergerak lebih jauh ke daratan sehingga memperluas area bahaya. Sebaliknya, wilayah dengan lereng yang curam akan mereduksi energi gelombang, sehingga membatasi sebaran genangan (Subardjo dan Ario, 2016; Anjeli et al., 2024). Peta kelerengan hasil analisis (Gambar 5 (a)), menunjukkan nilai kemiringan lereng di Kabupaten Trenggalek bervariasi, berkisar antara 0 hingga 70,9157 derajat. Peta ini secara efektif berfungsi untuk mengidentifikasi wilayah-wilayah yang berpotensi tergenang oleh tsunami, terutama daerah dengan kemiringan rendah.



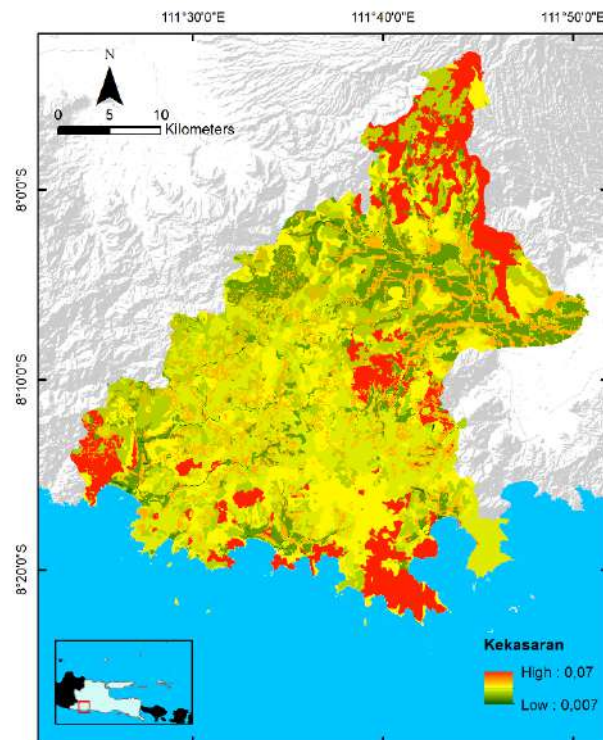
Gambar 5. Peta (a) kelerengan (derajat), (b) normalisasi kelerengan Kabupaten Trenggalek

Wilayah Kabupaten Trenggalek menunjukkan keragaman morfologi, dengan adanya dataran relatif datar di area pesisir dan perbukitan yang curam di bagian tengah dan utara. Jangkauan vertikal (*run-up*) tsunami berbanding terbalik dengan nilai kelerengan pantai; wilayah dengan kemiringan landai, seperti pantai, cenderung menghasilkan tinggi tsunami yang lebih besar." (Fachri, et al. 2022). Peta kelerengan hasil analisis selanjutnya, dinormalisasi ke dalam rentang nilai 0-1 menggunakan fungsi sinus. Normalisasi spasial dilakukan agar visualisasi peta lebih representatif dalam perhitungan risiko dan mitigasi bencana berbasis spasial. Nilai yang dihasilkan dari transformasi ini secara langsung merepresentasikan tingkat hambatan topografi terhadap aliran tsunami (Gambar 5 (b)).

Peta Kekasaran Permukaan

Koefisien kekasaran permukaan memberikan gambaran terhadap kekasaran suatu permukaan yang memberikan pengaruh gesekan antara gelombang tsunami dengan permukaan yang dilalui (Nugianto, 2024). Peta kekasaran permukaan hasil analisis, di Kabupaten Trenggalek menunjukkan nilai yang bervariasi, berkisar antara 0,007 hingga 0,07 (Gambar 6). Nilai kekasaran tersebut menunjukkan adanya perbedaan karakteristik tutupan lahan yang ada di wilayah Kabupaten Trenggalek. Kekasaran permukaan dalam menentukan zona bahaya tsunami yang berasal dari daerah pesisir memiliki tingkat ketahanan yang berbeda terhadap dampak gelombang tsunami saat menerjang daratan (Dewatama dan Ekaputra, 2021). Semakin tinggi nilai kekasaran permukaan, maka semakin besar hambatan terhadap aliran air tsunami, sehingga mengakibatkan penurunan kecepatan dan energi tsunami saat mencapai daratan.

Berdasarkan peta kekasaran permukaan, wilayah pesisir Kabupaten Trenggalek didominasi oleh kelas permukiman dan lahan pertanian, termasuk sawah. Hasil klasifikasi koefisien kekasaran permukaan menunjukkan dominasi nilai koefisien 0,03 dan 0,04. Dominasi ini sejalan dengan karakteristik tutupan lahan di area studi, yang mayoritas terdiri atas kebun/perkebunan (25%) dengan koefisien kekasaran 0,035 dan semak belukar (18%) dengan nilai 0,04. Tegalan/ladang (15%) dan hutan rimba (14%) masing-masing memiliki koefisien 0,03 dan 0,07, memberikan kontribusi terhadap sebaran nilai kekasaran menengah. Selain itu, tutupan permukiman dan lahan terbangun (13%) memiliki koefisien tertinggi, yaitu 0,05, yang turut menyumbang pada dominasi kategori kekasaran sedang. Sawah (8%) yang memiliki koefisien kekasaran 0,02 menjadi salah satu penyumbang utama pada rentang kekasaran rendah.



Gambar 6. Peta kekasaran permukaan Kabupaten Trenggalek

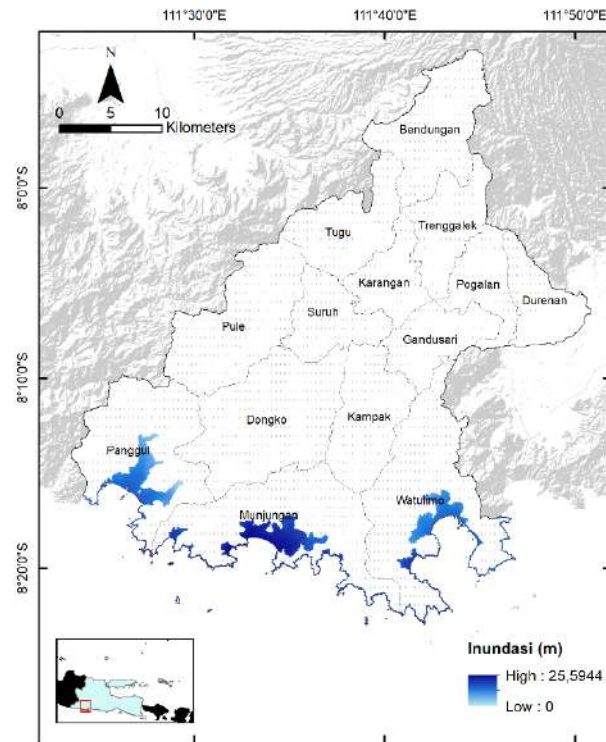
Peta Distribusi Genangan Tsunami

Peta genangan tsunami di wilayah Kabupaten Trenggalek (Gambar 7) merupakan hasil perhitungan matematis yang memodelkan kehilangan ketinggian tsunami (Hloss) akibat gesekan permukaan dan pengaruh topografi. Hasil pemodelan ini memberikan gambaran penting mengenai pola distribusi genangan serta potensi risiko tsunami di setiap wilayah. Secara umum, hasil pemodelan menunjukkan bahwa daerah yang berpotensi terdampak tsunami berada di sepanjang pesisir Kecamatan Watulimo, Panggul, dan Munjungan. Genangan tsunami tertinggi ditemukan di Teluk Sumbreng, Kecamatan Munjungan, dengan tinggi mencapai 25,59 meter. Kondisi ini disebabkan oleh kemiringan topografi yang landai di sekitar Teluk Sumbreng, didominasi oleh permukiman, persawahan, dan tambak yang memberikan nilai koefisien kekasaran permukaan yang relatif rendah sehingga memungkinkan run-up tsunami yang tinggi.

Sebaliknya, pada pantai yang memiliki kontur terjal, gelombang tsunami cenderung tidak menjalar jauh ke daratan karena energi gelombang tertahan dan dipantulkan kembali oleh tebing pantai (Subarjo et al., 2016; Budiman et al., 2024). Wilayah dengan topografi curam atau tutupan lahan berhutan memiliki kemampuan lebih efektif dalam meredam energi gelombang, sehingga jangkauan dan luas genangan tsunami di area tersebut lebih terbatas. Hal ini selaras dengan teori yang menyatakan bahwa faktor fisik seperti kemiringan lereng dan koefisien kekasaran permukaan merupakan elemen kunci dalam mengendalikan luas serta kedalaman inundasi tsunami.

Selain itu, jarak jangkauan genangan tsunami di Kabupaten Trenggalek dapat mencapai hingga 5,9 kilometer ke arah darat, dengan jangkauan terjauh berada di Kecamatan Panggul. Kondisi ini dipengaruhi oleh dominasi vegetasi pantai yang tidak terlalu lebat di wilayah tersebut, yang mengurangi nilai kekasaran permukaan sehingga tsunami dapat menjalar lebih jauh. Faktor lain yang mempercepat perambatan gelombang tsunami adalah keberadaan Sungai Slorok, yang berfungsi sebagai media penyebaran genangan. Ketika daya tampung sungai tidak mampu menampung volume air yang meningkat akibat tsunami, daerah sekitar bantaran sungai akan tergenang. Meningkatnya debit air dapat menyebabkan luapan yang memperluas jangkauan genangan di wilayah sekitar sungai, sehingga sungai dapat berperan layaknya “jalur tol” bagi perambatan tsunami, memungkinkan air menjalar dengan cepat dan lebih jauh ke daratan (Huda dan Jumadi, 2023).

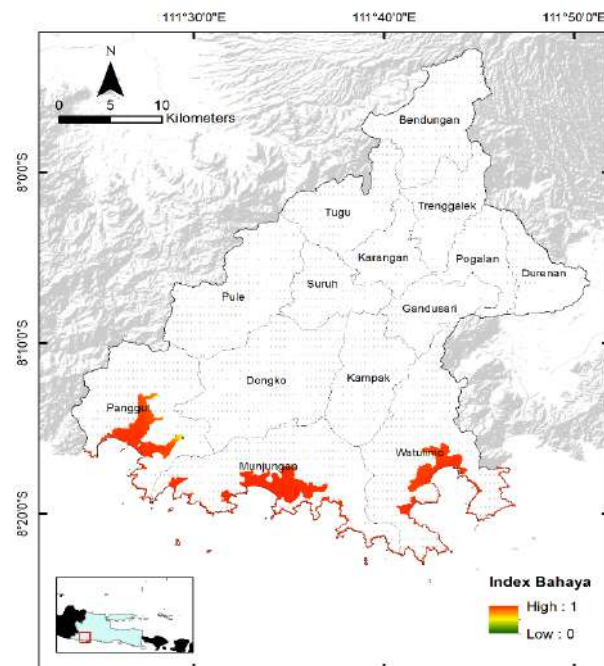
Umumnya, daerah teluk lebih landai dibandingkan daerah tanjung yang didominasi pantai bertebing terjal. Daerah teluk biasanya dijadikan lokasi pemukiman serta aktivitas ekonomi seperti tambak dan persawahan, sehingga karakteristik tanah yang landai dan kondisi tutupan lahan ini turut mempengaruhi tinggi run-up dan luas inundasi tsunami. Hasil pemodelan inundasi menegaskan kembali bahwa faktor fisik seperti kemiringan lereng dan koefisien kekasaran permukaan memegang peranan penting dalam meredam atau memperluas jangkauan serta kedalaman genangan tsunami di daratan pesisir Kabupaten Trenggalek.



Gambar 7. Peta genangan tsunami Kabupaten Trenggalek

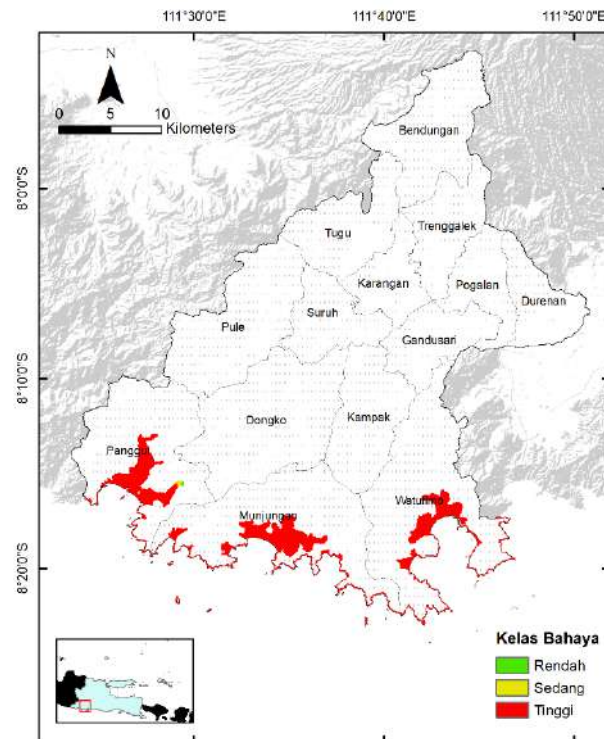
Peta Indeks dan Kelas Bahaya Tsunami

Peta indeks bahaya tsunami dihasilkan dengan menggunakan metode fuzzy dapat dilihat pada gambar 8. Peta indeks bahaya tsunami tersebut menunjukkan rentang nilai indeks bahaya dari 0 hingga 1, di mana nilai yang mendekati 1 mengindikasikan tingkat bahaya yang paling tinggi. Peta indeks bahaya ini kemudian diklasifikasikan ke dalam tiga kelas bahaya yaitu rendah, sedang, dan tinggi.



Gambar 8. Peta indeks bahaya tsunami Kabupaten Trenggalek

Peta kelas bahaya tsunami menunjukkan bahwa wilayah pesisir Kabupaten Trenggalek (Gambar 9) memiliki potensi bahaya tsunami dengan rentang kelas rendah hingga tinggi, yang didominasi oleh kelas tinggi. Hal ini terlihat dengan dominasi area berwarna merah pada peta bahaya di wilayah pesisir. Klasifikasi kelas bahaya ini didukung oleh berbagai penelitian yang mengidentifikasi potensi bahaya tsunami di wilayah selatan Jawa Timur (Ulinnuha et al., 2025; Usman et al., 2021; Irawan et al., 2024; Benazir et al., 2024) termasuk hasil analisis yang tertuang dalam dokumen kajian risiko bencana di Jawa Timur (BNPB, 2021) Jawa Timur (BNPB, 2021).



Gambar 9. Peta kelas bahaya tsunami Kabupaten Trenggalek

Tabulasi Luas Area Bahaya

Luas area bahaya berdasarkan hasil analisis tabulasi spasial di Kabupaten Trenggalek dapat dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan pada tabel 3, kecamatan yang memiliki area bahaya tinggi paling luas adalah Kecamatan Munjungan (2.270,79 ha), Kecamatan Watulimo (1.560,24 ha), dan Kecamatan Panggul (1.680,66 ha). Desa dengan luas bahaya tertinggi di Kecamatan Watulimo adalah Desa Karanggandu dengan total luas 731,07 ha. Sementara itu, desa dengan luas bahaya tertinggi di Kecamatan Munjungan adalah Desa Tawing (508,32 ha) dan di Kecamatan Panggul adalah Desa Nglebeng (561,15 ha).

Tabel 3. Tabulasi kelas bahaya per kecamatan, Kabupaten Trenggalek

Kabupaten / Kecamatan	Kelas Bahaya (Ha)				Kesimpulan Administrasi
	Rendah	Sedang	Tinggi	Total	
Trenggalek	10,26	30,24	5.511,69	5.552,19	Tinggi
Bendungan	0	0	0	0	Rendah
Dongko	0	0	0	0	Rendah
Durenan	0	0	0	0	Rendah
Gandusari	0	0	0	0	Rendah
Kampak	0	0	0	0	Rendah
Karangan	0	0	0	0	Rendah
Munjungan	0	0	2.270,79	2.270,79	Tinggi
Panggul	10,26	30,24	1.680,66	1.721,16	Tinggi
Pogalan	0	0	0	0	Rendah
Pule	0	0	0	0	Rendah
Suruh	0	0	0	0	Rendah
Trenggalek	0	0	0	0	Rendah
Tugu	0	0	0	0	Rendah
Watulimo	0	0	1.560,24	1.560,24	Tinggi

Kondisi ini menunjukkan perlunya perencanaan mitigasi berbasis spasial yang lebih spesifik di wilayah dengan tingkat bahaya tinggi. Pemerintah daerah bersama instansi terkait perlu menetapkan zona rawan bencana sebagai dasar dalam penyusunan tata ruang, pembangunan infrastruktur, dan strategi evakuasi. Selain itu, peningkatan kapasitas masyarakat melalui edukasi kebencanaan dan simulasi evakuasi di kecamatan Panggul, Munjungan dan Watulimo menjadi langkah penting untuk mengurangi risiko korban jiwa apabila bencana tsunami benar-benar terjadi..

KESIMPULAN

Analisis spasial terhadap potensi bahaya tsunami di Kabupaten Trenggalek menunjukkan bahwa faktor topografi dan karakteristik tutupan lahan sangat mempengaruhi tingkat resiko genangan. Pemodelan distribusi genangan memperlihatkan bahwa Kecamatan Watulimo (1.560,24 ha), Panggul(1.680,66 ha), dan Munjungan (2.270,79 ha) merupakan wilayah dengan potensi genangan paling luas. Hal ini dikonfirmasi oleh peta indeks dan kelas bahaya tsunami yang menunjukkan dominasi kelas bahaya tinggi di wilayah pesisir, khususnya pada desa-desa seperti Karanggandu (731,07 ha), Tawing (508,32 ha), dan Nglebeng (561,15 ha). Hasil ini menegaskan bahwa kombinasi faktor lereng landai dan kekasaran rendah merupakan indikator utama dalam menentukan tingkat kerentanan terhadap tsunami..

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Badan Informasi Geospasial (BIG), Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB), serta Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) atas bantuan data yang diberikan sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

PERNYATAAN KONTRIBUSI PENULIS

Penulis menyatakan bahwa kontribusi setiap penulis terhadap pembuatan karya tulis ini adalah Muhamad Rakif Panguale sebagai kontributor utama dan korespondensi, Moh. Saiful Rahman Hamka, Syafril Mayu Dinata, Santi Febrianti, Aisyah Nur Nabila, Ryzka Arsalia, dan N.A.A. Dinda Agustina sebagai anggota. Penulis telah melampirkan surat pernyataan deklarasi penulis.

PERNYATAAN KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis telah menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan dengan pihak manapun terkait penerbitan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anjeli, N., Sugara, A., Anggoro, A., & Suci, A. N. N. F. N. (2025). Pemodelan tingkat bahaya bencana tsunami dengan menggunakan sistem informasi geografis di Pulau Enggano, Bengkulu Utara. *Majalah Ilmiah Globe*, 27(1), 23–36. <https://jurnal.big.go.id/GL/article/view/219>
- Anugrah, S. D., Zaim, Y., Rizal, Y., Aswan, & Istiyanati. (2015). A preliminary study of a paleotsunami deposit along the south coast of East Java: Pacitan–Banyuwangi. <https://doi.org/10.1063/1.4915251>
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2019). *Katalog tsunami Indonesia per-wilayah tahun 416–2018*. Pusat Gempabumi dan Tsunami Kedeputian Bidang Geofisika.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2021). *Dokumen kajian risiko bencana nasional Provinsi Jawa Timur 2022–2026*. Kedeputian Bidang Sistem dan Strategi Direktorat Pemetaan dan Evaluasi Risiko Bencana.
- Benazir, Triatmadja, R., Yuwono, N., Rahardjo, A. P., Kuswandi, Triatmodjo, B., & Nizam. (2024). Investigating the tsunami-mitigating properties of vegetated coastal areas in Pacitan Bay, Indonesia: A synergistic approach of numerical modelling and field observations. *Journal of Earth System Science*, 133(1), 37. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02242-7>
- Budiman, M. J., Sutoyo, & Syafiudin, M. F. (2024). Pemetaan kerentanan bahaya tsunami dengan pemodelan inundansi (Studi kasus: Kabupaten Bantul). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, 9(2), 157–166. <https://doi.org/10.29244/jsil.9.2.157-166>
- Dewatama, E., & Ekaputra. (2021). Tsunami hazard mapping and loss estimation in Yogyakarta International Airport area. *Built Environment Studies*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.22146/best.v2i1.535>
- Fachri, H. T., Malik, Y., & Murtianto, H. (2022). Pemetaan tingkat bahaya bencana tsunami menggunakan sistem informasi geografis di pesisir Kota Bengkulu. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*, 10(2), 166–178. <https://doi.org/10.23887/jjpg.v10i2.43541>
- Hall, S., Pettersson, J., Meservy, W., Harris, R., Agustinawati, D., Olson, J., & McFarlane, A. (2017). Awareness of tsunami natural warning signs and

- intended evacuation behaviors in Java, Indonesia. *Natural Hazards*, 89(1), 473–496.
- Huda, M. B., & Jumadi. (2023). Analisis bahaya tsunami dan penentuan jalur evakuasi menggunakan sistem informasi geografis di wilayah pesisir (Studi kasus: Kecamatan Pacitan Kabupaten Pacitan) [Skripsi, Universitas Muhammadiyah Surakarta].
- Irawan, L. Y., Islam, S. N., Sumarmi, Ardiansyah, Z. F., Dani, F. A., Fadhlurahman, I., Religi, M. D., Sari, R. R. A., & 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>
- 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 (Switzerland)*, 17(6). <https://doi.org/10.3390/su17062564>
- Marsh, C. B., Harder, P., & Pomeroy, J. W. (2023). Validation of FABDEM, a global bare-earth elevation model, against UAV-lidar derived elevation in a complex forested mountain catchment. *Environmental Research Communications*, 5(3). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acc56d>
- Nugianto, N. (2024). Pemetaan area terdampak tsunami menggunakan sistem informasi geografis di pesisir Kabupaten Kebumen [Skripsi, Institut Pertanian Bogor].
- Osama, N., Shao, Z., & Freeshah, M. (2023). The FABDEM outperforms the global DEMs in representing bare terrain heights. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 89(10), 613–624. <https://doi.org/10.14358/PERS.23-00026R2>
- Paramita, P., Wiguna, S., Shabrina, F. Z., & Sartimbul, A. (2021). Pemetaan bahaya tsunami wilayah Kabupaten Serang bagian barat menggunakan sistem informasi geografis. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(3), 233–241. <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i3.37228>
- Pronk, M., Hooijer, A., Eilander, D., Haag, A., de Jong, T., Voudoukas, M., Vernimmen, R., Ledoux, H., & Eleveld, M. (2024). DeltaDTM: A global coastal digital terrain model. *Scientific Data*, 11(1), 1–18. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03091-9>
- Pusat Gempa Nasional. (2017). *Peta sumber dan bahaya gempa Indonesia tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- Putri, A. M., Saputra, A., & Wibowo, A. A. (2024). Study of tsunami source as preparation for tsunami modeling in Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1314(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1314/1/012126>
- Rakuasa, H., & Salakory, D. M. (2022). Pemodelan spasial bahaya tsunami dan keterpaparannya terhadap permukiman di Kota Ambon. *Jurnal Sains Informasi Geografi*, 5(1), 31–37. <https://doi.org/10.31314/j>
- Sarah, R., Awaluddin, R., & Hadi, F. (2024). Analisis bahaya bencana tsunami di Kota Cilegon menggunakan sistem informasi geografis. *Jurnal Geodesi Undip*, 13(1), 58–64.

- Setyaningsih, D. P., Sutiono, H. E. C. P., Paramanandi, A. R. G., Khasanah, E. U., Wahyuni, T., Jati, B. A. E. K., Al Akbar, M. F., Widyatmanti, W., & Wibowo, T. W. (2023). Tsunami hazard modeling in the coastal area of Kulon Progo Regency. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 19(2), 184. <https://doi.org/10.30536/ijreses.2022.v19.a3822>
- Steinritz, V., Pena-Castellnou, S., Marliyani, G. I., & Reichert, 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). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/851/1/012007>
- Subardjo, P., & Ario, R. (2016). Uji kerawanan terhadap tsunami dengan sistem informasi geografis (SIG) di pesisir Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Yogyakarta. *Jurnal Kelautan Tropis*, 18(2), 82–97. <https://doi.org/10.14710/jkt.v18i2.519>
- Sudaryatno, S., Sumantyo, J. T. S., Purwanto, T. H., Al Akbar, M. F., Gita, A. R., & Shalih, O. (2024). Analysis and geovisualization of tsunami hazard and evacuation routes in the Opak-Progo coastal area. *Forum Geografi*, 38(2), 257–265. <https://doi.org/10.23917/FORGEO.V38I2.5436>
- Sugandhi, N., Supriatna, Kusratmoko, E., & Rakuasa, H. (2023). Spatial modelling of tsunami hazards and their exposure to settlements in Ambon City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1173(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1173/1/012013>
- Surindar, A. B., & Nurhadi. (2021). Community preparedness for tsunami hazard in Galur District, Kulon Progo Regency, Special Region of Yogyakarta. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 884(1), 012038.
- Ulinuha, R. R., & Jumadi. (2025). 3D modelling of tsunami disaster in Pacitan Regency, East Java, using ArcGIS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1462(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1462/1/012014>
- Usman, F., Hariyani, S., & Shoimah, F. (2021). Perencanaan partisipatif tanggap darurat bencana tsunami di pesisir selatan Watulimo, Trenggalek. *Tataloka*, 23(1), 138–150. <https://doi.org/10.14710/tataloka.23.1.138-150>
- Wiyono, R. U. A., Pujiyanto, A., & Hidayah, E. (2024). Tsunami risk mapping in Tempurejo District, Jember Regency based on BNPB criteria using TOPSIS method. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1347(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1347/1/012057>