

# Pemodelan Spasial Alternatif Tempat Evakuasi Sementara dan Jalur Evakuasi Bencana Tsunami di pesisir Desa Watukarung, Kabupaten Pacitan

Faiza Fikri Wibawa<sup>1</sup>, Bayu Argadyanto Prabawa<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Teknologi Yogyakarta, Yogyakarta

\* Email koresponden: [bayu.prabawa@staff.uty.ac.id](mailto:bayu.prabawa@staff.uty.ac.id).

Submitted: 2025-09-08 Revisions: 2025-09-18 Accepted: 2025-09-25 Published: 2025-09-25

©2025 Fakultas Geografi UGM dan Ikatan Geografi Indonesia (IGI)

©2025 by the authors. Majalah Geografi Indonesia.

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution(CC BY SA) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

**Abstrak** Pesisir Desa Watukarung menjadi salah satu kawasan rawan bencana tsunami yang memiliki nilai strategis sebagai destinasi wisata *geopark* sekaligus direncanakan sebagai Pangkalan Pendataran Ikan di Kabupaten Pacitan, sehingga upaya mitigasi bencana tsunami perlu dilakukan sebagai bagian perencanaan penataan ruang yang memperhatikan aspek kebencanaan dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk merencanakan rute evakuasi optimal dan menentukan alternatif tempat evakuasi sementara (TES) bencana tsunami dengan mempertimbangkan area aman terdekat, kapasitas, serta distribusi populasi di pesisir Desa Watukarung. Pemodelan spasial dilakukan dengan skenario *run-up* 29,2 meter untuk mengidentifikasi area bahaya dan area aman. Metode *Least Cost Distance* (LCD) digunakan untuk membuat jalur evakuasi optimal dan menghitung kebutuhan waktu atau waktu tempuh evakuasi, sementara distribusi populasi dihitung berdasarkan sensus kapasitas bangunan pelayanan umum dan observasi lapangan. Hasil pemodelan bahaya tsunami menunjukkan jarak genangan hingga 900 meter dari garis pantai seluas 170,66 Ha. Pemodelan area aman tsunami menunjukkan 2 lokasi TES dari Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Pacitan belum memenuhi kriteria area aman yang digunakan. Berdasarkan distribusi populasi dan jarak aman terhadap area bahaya tsunami, diusulkan sebanyak 8 lokasi TES alternatif menggantikan 2 lokasi dalam RTRW. Hasil pemodelan jalur evakuasi membentuk 16 jalur evakuasi, 5 di antaranya memenuhi waktu tempuh  $\leq 11$  menit, dan sebagian melintasi lahan pertanian untuk efisiensi waktu. Disarankan pengadaan *early warning system*, pembangunan akses evakuasi, diseminasi rencana mitigasi, dan simulasi rutin untuk meningkatkan keberhasilan evakuasi bencana tsunami di pesisir Desa Watukarung.

**Kata kunci:** bahaya tsunami; jalur evakuasi; pemodelan spasial; tempat evakuasi sementara

**Abstract** The coastal area of Watukarung Village is a region prone to tsunami disasters with strategic value as a geopark tourist destination and a planned Fish Landing Base in Pacitan Regency. Therefore, tsunami mitigation efforts are essential as part of spatial planning that considers disaster risk and sustainability. This study aimed to plan optimal evacuation routes and determine alternative temporary evacuation shelters (TES) for a tsunami disaster by considering the nearest safe areas, capacity, and population distribution along the coast of Watukarung Village. Spatial modeling was conducted using a 29.2-meter run-up scenario to identify hazard and safe zones. The Least Cost Distance (LCD) method was applied to generate optimal evacuation routes and calculate the required evacuation travel time, while population distribution was calculated based on a census of public service building capacity and field observations. The tsunami hazard modeling results showed an inundation distance of up to 900 meters from the coastline, covering an area of 170.66 hectares. The safe area modeling revealed that two TES locations from the Pacitan Regency Spatial Plan (RTRW) did not meet the safe area criteria used in this study. Based on population distribution and a safe distance from the tsunami hazard zone, eight alternative TES locations were proposed to replace the two locations in the RTRW. The evacuation route modeling resulted in 16 evacuation paths, five of which achieved a travel time of  $\leq 11$  minutes. Some of these paths traverse agricultural land for time efficiency. The study suggests that providing an early warning system, constructing evacuation access, disseminating the mitigation plan, and conducting regular simulations are necessary to enhance the success of tsunami disaster evacuations on the coast of Watukarung Village.

**Keywords:** tsunami hazard; evacuation route; spatial modelling; temporary evacuation site

## PENDAHULUAN

Desa Watukarung, Kecamatan Pringkuwu merupakan salah satu wilayah pesisir yang masuk dalam kawasan rawan bencana tsunami di Kabupaten Pacitan. Pantai Watukarung ditetapkan sebagai salah satu kawasan strategis pariwisata dengan tema pengembangan wisata *geopark* sekaligus direncanakan sebagai Pangkalan Pendataran Ikan di Kabupaten Pacitan (Pemerintah Kabupaten Pacitan, 2024). Sebagian wilayah ini termasuk dalam kawasan bentang

alam karst Gunung Sewu dan kawasan rawan bencana tsunami. Oleh karena itu, untuk meminimalkan dampak dan mendukung keberlanjutan fungsi kawasan strategis ini, aspek mitigasi tsunami perlu diupayakan. Seperti halnya jalur dan tempat evakuasi sementara menjadi bagian penting dalam mengurangi korban jiwa.

Kajian tentang pemodelan spasial dalam penentuan tempat evakuasi sementara dan rute evakuasi tsunami telah menjadi topik yang penting, seiring dengan berkembangnya

tingkat kerentanan pesisir terhadap bahaaya tsunami yang diakibatkan oleh meningkatnya populasi di wilayah pesisir (Ferreira *et al.*, 2025; Jumadi *et al.*, 2024). Kajian evakuasi tsunami menggunakan pemodelan spasial telah dikembangkan dengan berbagai pendekatan model, seperti pendekatan *agent based model* (Chen *et al.*, 2023; Flores & Lee, 2024; Mls *et al.*, 2023; Mostafizi *et al.*, 2017; Usman *et al.*, 2017), penggunaan *network* dan *least cost path analysis* yang mempertimbangkan ketersediaan jaringan jalan (Agustiana *et al.*, 2024; Dj *et al.*, 2004; Peroche *et al.*, 2014; Sutikno & Murakami, 2015), hingga model yang mempertimbangkan variabel lingkungan dan penggunaan data citra beresolusi tinggi (Danardono *et al.*, 2023; Fathianpour *et al.*, 2024; Marfai *et al.*, 2021; Ulinnuha & Jumadi, 2025).

Penelitian sebelumnya oleh (Anggarwati *et al.*, 2023) membandingkan metode *network analysis* dan *least cost distance* (LCD) untuk pemodelan jalur evakuasi tsunami di pesisir Gunungkidul. Hasilnya menunjukkan bahwa jalur evakuasi *network analysis* lebih mudah dipahami masyarakat karena sesuai dengan jalan eksisting, tetapi metode ini terbatas pada optimasi jalur melalui jaringan jalan yang ada tanpa mempertimbangkan medan alami. Sementara itu, (Sari *et al.*, 2020) berfokus pada penentuan titik evakuasi sementara (TES) menggunakan bangunan eksisting dan analisis jaringan jalan di pesisir Jember. Pendekatan tersebut efektif untuk daerah dengan infrastruktur memadai, tetapi kurang sesuai di wilayah yang minim bangunan aman dan didominasi topografi berbukit. Berbeda dengan kedua penelitian tersebut, studi ini berfokus pada wilayah berbukit di Desa Watukarung yang memanfaatkan bukit sebagai alternatif TES dan menerapkan pendekatan LCD untuk mengidentifikasi jalur evakuasi optimal. Tujuan penelitian ini adalah merencanakan rute evakuasi yang optimal di wilayah berbukit dengan mempertimbangkan lokasi aman terdekat serta memperhitungkan kapasitas dan distribusi populasi yang akan dievakuasi.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengkaji dan memetakan area bahaya, rute evakuasi, dan tempat evakuasi sementara (TES) bencana tsunami. Penelitian ini menggunakan beberapa teknik analisis seperti pemodelan spasial genangan tsunami dari (Berryman, 2006), perhitungan ketersediaan & kebutuhan waktu evakuasi (BMKG, 2012; Dewi, 2012a; Rashifah *et al.*, 2024), pemetaan sebaran populasi, dan penentuan tempat evakuasi sementara (TES) menggunakan beberapa syarat minimum (BNPB, 2012; FEMA, 2019), serta arahan jalur evakuasi menggunakan metode *Least Cost Path Distance Analysis* (Agustiana *et al.*, 2024; Dj *et al.*, 2004).

## Lokasi Penelitian

Studi kasus berada di Desa Watukarung, Kecamatan Pringkuku, Kabupaten Pacitan. Wilayah ini mencakup kawasan pesisir Desa Watukarung yang terdiri dari bentuklahan landai hingga perbukitan karst yang curam. Kawasan pantai di sepanjang Desa Watukarung memiliki karakteristik morfologi gisik saku (*pocket beach*) dan membentuk teluk yang berpotensi mengalami dampak parah terhadap tsunami (Mustafa & Yudhicara, 2007; Purwanto *et al.*, 2008; Tisngati *et al.*, 2016).

## Pengumpulan Data

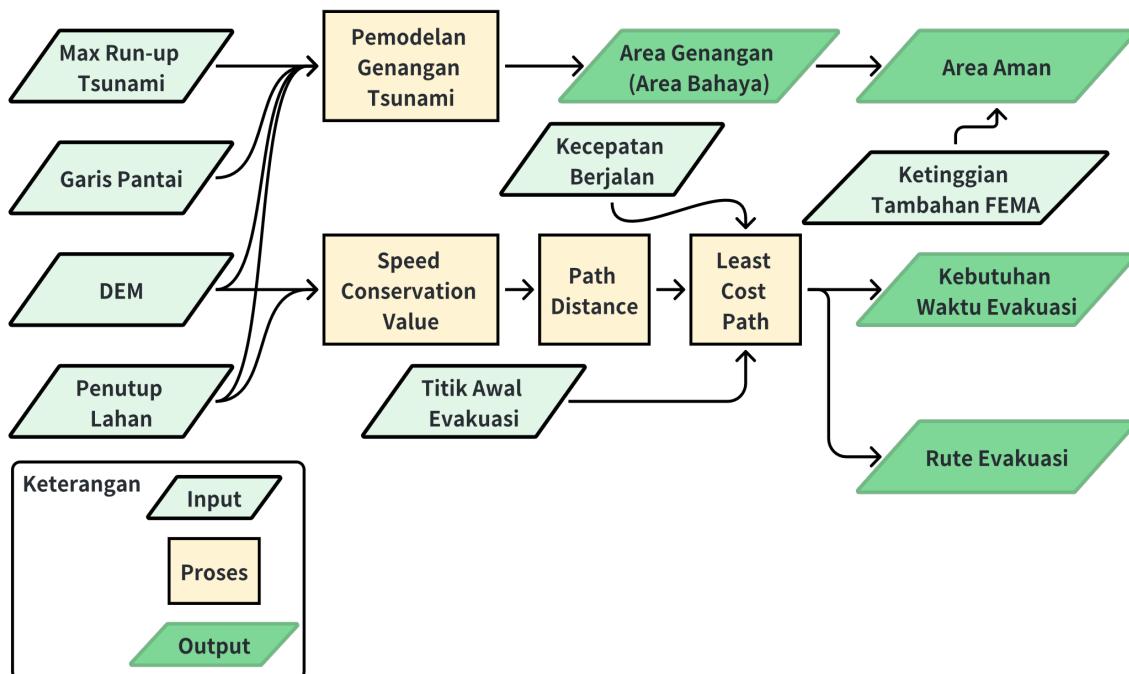
Data yang dibutuhkan mencakup data sekunder dan primer. Data sekunder mencakup data vektor dan raster, sedangkan data primer mencakup data tabular. Data penutup lahan diperoleh dari interpretasi digital foto udara ATR/BPN dan data sebaran orang yang akan dievakuasi, meliputi jumlah penduduk, pedagang, dan jumlah wisatawan di dalam area bahaya. Jumlah dan pola distribusi wisatawan diperoleh dari sensus kapasitas bangunan pelayanan umum yang dihitung berdasarkan jumlah tempat duduk, sedangkan jumlah wisatawan sisanya diasumsikan berada di gisik dihitung menggunakan peta penggunaan lahan detail serta hasil survei



**Gambar 1.** Peta Lokasi Penelitian

Tabel 1. Data Penelitian

No.	Data	Variabel	Sumber
1	Peta RBI skala 1:25.000	Batas administrasi dan garis pantai	BIG
2	Data DEM ( <i>Digital Elevation Model</i> )	Kemiringan lereng	BIG
3	Foto Udara	Tutupan/penggunaan lahan	ATR/BPN
4	Populasi yang akan dievakuasi	Distribusi dan jumlah pengungsi	Survei lapangan



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

atau observasi lapangan (Tabel 1). Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 2.

Tahap penelitian dimulai dengan pemodelan genangan tsunami menggunakan data DEM dan penutup lahan untuk mengidentifikasi area bahaya dan area aman. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Speed Conservation Value* (SCV) berdasarkan karakteristik penutup lahan dan medan untuk menganalisis kecepatan berjalan evakuasi. Menggunakan metode *Least Cost Path*, menghasilkan rute evakuasi optimal yang mempertimbangkan faktor topografi dan waktu tempuh evakuasi paling singkat. Distribusi populasi digunakan untuk mengestimasi jumlah dan sebaran orang yang akan dievakuasi, sehingga dapat ditentukan kebutuhan luas area evakuasi serta titik awal evakuasi. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi jalur dan tempat evakuasi tidak hanya melalui infrastruktur eksisting, tetapi juga memanfaatkan medan alami (bukit) sebagai alternatif TES dan jalur evakuasi dengan waktu tempuh paling singkat, sehingga lebih relevan untuk wilayah dengan topografi beragam seperti Desa Watukarung.

### Pemodelan Genangan Tsunami

Pemodelan inundasi tsunami digunakan untuk menghasilkan area bahaya tsunami dan area yang tidak berpotensi tergenang diklasifikasikan menjadi area aman tsunami. Pemodelan genangan dilakukan menggunakan skenario tsunami tertinggi yaitu 29,2 meter (Horspool *et al.*, 2013) dengan menerapkan metode perhitungan matematis yang dikembangkan oleh (Berryman, 2006) persamaan (1),

dengan memperhitungkan pengurangan ketinggian tsunami per meter jarak inundasi berdasarkan biaya jarak terhadap lereng dan koefisien kekasaran permukaan (Nugroho *et al.*, 2018).

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

Keterangan:  $H_{loss}$  = kehilangan ketinggian tsunami per 1 m jarak inundasi;  $n$  = koefisien kekasaran permukaan;  $H_0$  = ketinggian gelombang tsunami di garis pantai (m);  $S$  = besarnya lereng permukaan (derajat). Nilai kekasaran permukaan berdasarkan jenis penutup/penggunaan lahan ditunjukkan pada Tabel 2.

Syarat lokasi untuk pemilihan TES seperti yang dijelaskan dalam (BNPB, 2011) antara lain, berjarak >500 m dari bibir pantai dan mempertimbangkan aksesibilitas menuju TES. Ketinggian area aman disarankan untuk lebih tinggi 30% dari *run-up* tsunami, ditambah 3 meter (FEMA, 2019).

$$H_{min}VE = H_{Run-up} + 30\% (H_{Run-up}) + 3m \quad \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:  $H_{min}VE$  = ketinggian minimal TES;  $H_{Run-up}$  = ketinggian *run-up* tsunami.

**Tabel 2.** Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan per Jenis Penutup/Penggunaan Lahan

Jenis	Nilai Koefisien
Badan Air	0,007
Rawa	0,015
Empang	0,007
Tambak	0,010
Pasir/Bukit Pasir	0,018
Semak/Belukar	0,040
Padang Rumput	0,020
Hutan	0,070
Kebun/Perkebunan	0,035
Tegalan/Ladang	0,030
Sawah	0,020
Lahan Pertanian	0,025
Pemukiman/Lahan Terbangun	0,050
Mangrove	0,060

Sumber: (Nugroho *et al.*, 2018)

### Analisis Penentuan Tempat Evakuasi Sementara (TES) dan Jalur Evakuasi

Estimasi jumlah dan sebaran populasi (wisatawan dan pedagang) yang akan dievakuasi dilakukan dengan sensus kapasitas bangunan pelayanan publik. Estimasi populasi berupa kapasitas bangunan pelayanan umum (warung makan/restoran, hotel/homestay/villa, tempat ibadah, parkir, toilet umum, gazebo, dan instansi pemerintahan) yang dihitung berdasarkan jumlah tempat duduk, sedangkan jumlah wisatawan sisanya diasumsikan berada di gisik dihitung menggunakan peta penggunaan lahan detail serta survei atau observasi lapangan. Hasil sensus kemudian dipetakan dengan mengelompokkan jumlah & sebaran populasi dalam grid hexagon berukuran jari-jari lingkar dalam 10 meter, di mana setiap hexagon merepresentasikan jumlah orang di area tersebut. Bentuk hexagon efektif untuk pemetaan sebaran populasi karena sifat-sifatnya yang sesuai untuk representasi data spasial dibandingkan dengan bentuk lainnya (Apte *et al.*, 2012; Beresnev *et al.*, 2022).

Ketersediaan waktu evakuasi adalah waktu yang tersedia untuk melakukan evakuasi, dimulai dari peringatan evakuasi oleh *stakeholder* terkait sampai pada saat gelombang pertama tsunami datang. Acuan waktu tiba tsunami yang digunakan adalah 29 menit dari BMKG (Rashifah *et al.*, 2024). Adapun persamaan untuk menghitung ketersediaan waktu evakuasi di wilayah kajian adalah sebagai berikut (Dewi, 2012b).

$$ET = ETA - ToNW - RT \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan: **ET**= waktu jeda untuk evakuasi; **ETA**= waktu kedatangan tsunami; **ToNW**= waktu yang dibutuhkan untuk peringatan terjadi tsunami setelah gempa; **RT**= waktu reaksi atau respons masyarakat untuk memutuskan melakukan evakuasi.

Estimasi kebutuhan waktu evakuasi menggunakan metode *Least Cost Distance* (LCD) yang mengacu pada pendekatan *anisotropic model*. Metode ini menghitung jalur paling efisien menuju tempat aman dengan mempertimbangkan baik tutupan lahan maupun arah lereng, artinya metode ini memperhitungkan apakah perjalanan

dilakukan menanjak atau menurun. Metode ini menggunakan perhitungan jarak jalur yang mempertimbangkan variasi medan tiga dimensi untuk menentukan bagaimana lereng dan tutupan lahan memengaruhi biaya (waktu) perjalanan melintasi lanskap, sehingga memberikan perkiraan waktu perjalanan evakuasi yang lebih realistik (Wood *et al.*, 2018). Biaya perjalanan diklasifikasikan sebagai *Speed Conservation Value* (SCV), di mana setiap nilai menunjukkan persentase kecepatan dasar yang diperlukan untuk melewati sel tersebut, dengan mempertimbangkan karakteristik penutup lahan dan kemiringannya (Wood *et al.*, 2016). Nilai SCV ini diperoleh berdasarkan klasifikasi penutup/penggunaan lahan dan kemiringan lereng, seperti ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

$$\text{Kecepatan berjalan } \left(\frac{\text{km}}{\text{jam}}\right) = 6e^{-3,5 \times \text{abs}(\text{slope}+0,05)} \dots\dots\dots(4)$$

Pemodelan ini memperkirakan waktu yang dibutuhkan seseorang dengan berjalan kaki keluar dari zona bahaya menuju zona aman, sedangkan zona aman menjadi titik awal dalam *anisotropic model*, sehingga nilai kemiringan lereng harus dibalik. Artinya, kemiringan yang awalnya positif (naik) diubah menjadi negatif (turun), begitu pula sebaliknya (Rosaji, 2017).

$$W = 0,000166666 \times \left( \text{EXP} \left( 3,5 \times \left( \text{ABS} \left( \text{TAN} \left( \text{RADIAN} \left( \text{slope\_deg} \right) \right) + 0,05 \right) \right) \right) \right) \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan : **WW** = waktu yang digunakan untuk melewati 1 m; **slope\_deg** = kemiringan lereng dalam derajat.

Model LCD menggunakan *path distance tool* di ArcGIS untuk menghitung arah perjalanan. Model simulasi ini mempertimbangkan peta bahaya tsunami untuk memperkirakan jalur evakuasi yang memungkinkan untuk dilewati pengungsi (Wood *et al.*, 2016). Kemudian untuk membuat jalur evakuasi digunakan *cost path tool* atau *least cost path* dengan 3 (tiga) input data yaitu *cost surface raster*, *cost backlink raster*, dan titik awal evakuasi. *Backlink raster* berisikan nilai 0 – 8 yang menentukan arah sepanjang jalur

**Tabel 3.** Nilai SCV berdasarkan kelas tutupan lahan

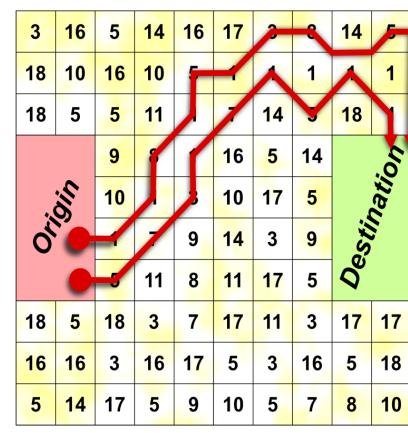
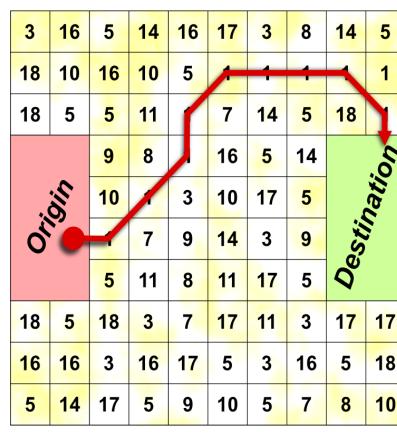
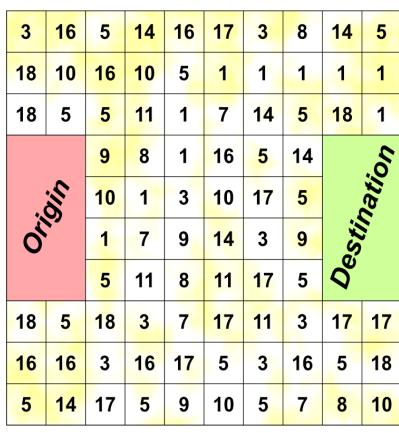
Kelas Penutup/Penggunaan Lahan	Speed Conservation Value (SCV)
Badan Air	0
Bangunan dan Pagar	0
Jalan Beraspal	1
Rumput	0,9091
Tanah Berbatu kerikil (gravel)	0,0991
Semak kerapatan rendah	0,8333
Semak kerapatan tinggi	0,6667
Tanah Berlumpur	0,5556
Pasir/ Pantai Pasir	0,5556

Sumber: (Schmidlein &amp; Wood, 2015) dengan modifikasi

**Tabel 4.** Nilai SCV berdasarkan kemiringan lereng

Kemiringan Lereng (derajat)	Kecepatan Berjalan (m/detik)	SCV
-10	1,1	1,5
-5	1,5	1,1
-2,75 (ideal)	1,7	1
5	1	1,6
10	0,8	2,2

Sumber: (Gabel et al., 2024) dengan modifikasi

**Gambar 3.** Ilustrasi cara kerja least cost path

Sumber: (Modifikasi dari Rudnick et al., 2012)

biaya akumulatif terendah dari sel pertama ke sumbernya (ESRI, 2021). *Backlink raster* digunakan untuk merekonstruksi jalur biaya terendah dari titik awal ke tujuan (area aman). Ilustrasi cara kerja *least cost path* ditunjukkan pada Gambar 3.

Terdapat dua lokasi evakuasi di Desa Watukarung yang telah ditetapkan dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Pacitan, yang selanjutnya disebut Tempat Evakuasi Sementara (TES) RTRW. Lokasi tersebut merupakan bukit alami dengan vegetasi tinggi yang berfungsi sebagai titik kumpul evakuasi. Penelitian ini menggunakan dua skenario evakuasi: skenario pertama menuju TES RTRW dan skenario kedua menuju area aman terdekat. Skenario ini dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian lokasi TES RTRW terhadap hasil model inundasi tsunami dan apakah terdapat alternatif TES lain di luar lokasi evakuasi yang telah ditetapkan.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Model Genangan dan Area Aman Bencana Tsunami di Pesisir Desa Watukarung

Hasil pemodelan *run-up* dengan skenario 29,2 meter (Horspool et al., 2013) menghasilkan jarak genangan hingga 900 meter dari garis pantai. Terdapat tiga dusun yang terdampak yaitu Dusun Ketro, Dusun Gumulharjo, dan Dusun Kenul. Luas area genangan mencapai 170,66 hektare. Area yang paling luas terkena tsunami yaitu area perkebunan dan persawahan seluas 74,96 hektare, kemudian di Dusun Ketro seluas 71,07 hektare dan Dusun Kenul hanya sebagian kecil yang terendam genangan tsunami seluas 1,08 hektare, sedangkan seluruh pulau terendam sepenuhnya (Tabel 5). Area yang mengalami genangan cukup parah memiliki beberapa kondisi tertentu seperti bentuklahan yang datar,

elevasi yang lebih rendah daripada *run-up*, minim penghalang gelombang laut, dan berada di sekitar badan air utamanya sungai (Gambar 4). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Amri *et al.*, 2023) yang mengidentifikasi wilayah pesisir Watukarung sebagai zona kerentanan tinggi akibat morfologi pantai yang datar dan elevasi rendah.

Perhitungan tinggi minimum TES menghasilkan nilai 40,96 mdpl atau dibulatkan menjadi 41 mdpl. Tinggi minimum ini adalah tinggi minimum permukaan tanah yang diperoleh dari perhitungan raster data DEM. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa area aman berada di atas bukit yang belum seluruhnya terdapat akses jalan untuk menuju ke lokasi tersebut. Gambar 5 menunjukkan salah satu TES RTRW (titik kumpul) yang tidak memenuhi persyaratan ketinggian sebagai area aman. TES RTRW walaupun berada di luar area bahaya, tetapi belum memenuhi persyaratan ketinggian yang direkomendasikan yaitu 41 mdpl. Temuan ini mempertegas kelemahan implementasi kebijakan dan infrastruktur kesiapsiagaan bencana di Desa Watukarung dari penelitian Wahyudi *et al.* (2023).

### Ketersediaan dan Kebutuhan Waktu Evakuasi Tsunami di Pesisir Desa Watukarung

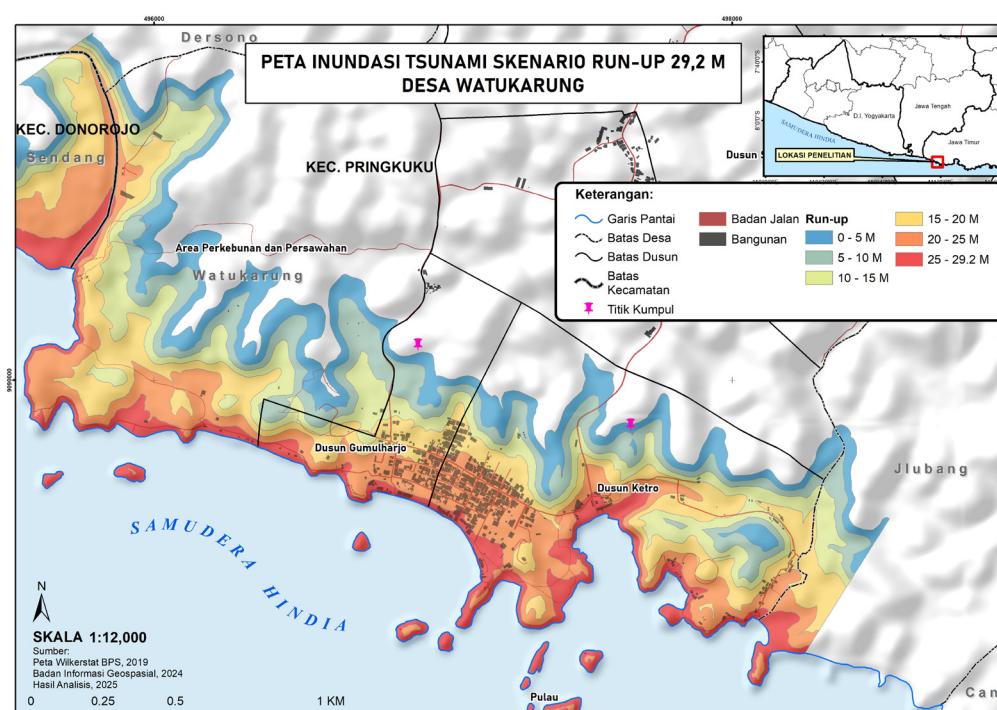
Ketersediaan waktu menentukan keberhasilan evakuasi bencana, dikarenakan semakin banyak waktu yang tersedia maka masih terdapat kesempatan untuk melakukan evakuasi. Waktu tiba tsunami di Kabupaten Pacitan untuk mencapai daratan dalam 29 menit dan peringatan terjadinya tsunami setelah gempa oleh instansi terkait yaitu 8 menit serta reaksi dari masyarakat untuk melakukan evakuasi diasumsikan 10 menit (Gambar 6). Waktu yang tersedia untuk melakukan evakuasi tersisa 11 menit dan waktu tersebut belum termasuk persiapan masyarakat dalam melakukan evakuasi seperti menyelamatkan harta benda dan keluarga.

Analisis kebutuhan waktu (waktu tempuh) menunjukkan bahwa kedua skenario ini tidak dapat menjangkau seluruh masyarakat di sekitar gisik karena membutuhkan waktu lebih dari 11 menit. Area di bagian barat bahkan membutuhkan waktu 60 menit untuk mencapai TES RTRW (Gambar 7). Kemudian untuk area skenario menuju area aman

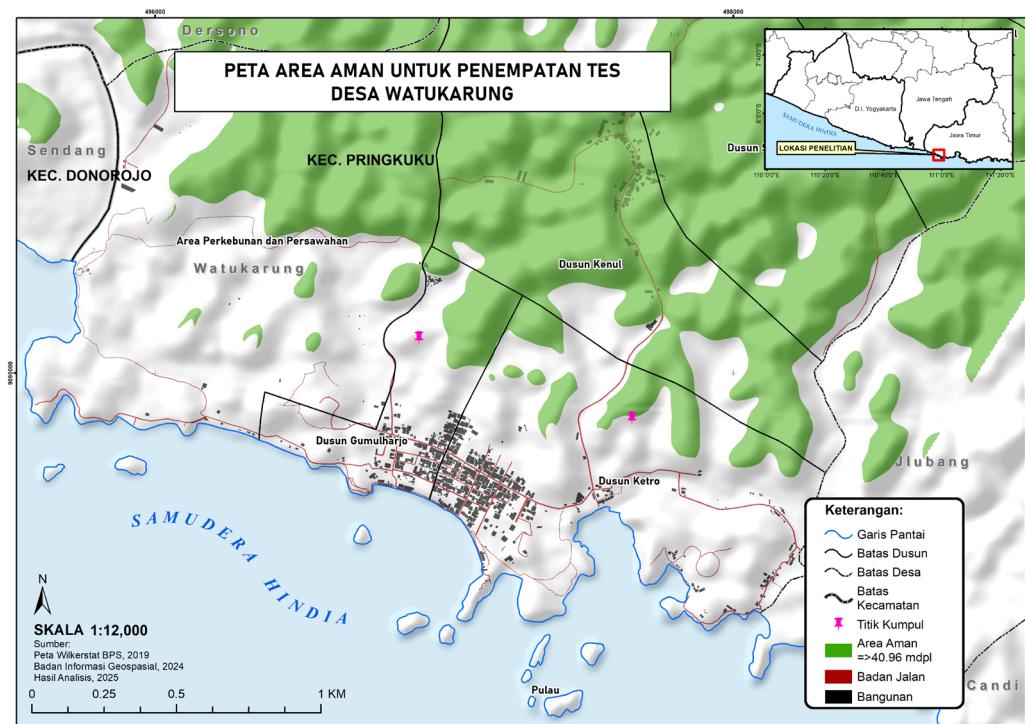
**Tabel 5.** Luas Area Tergenang Berdasarkan Pemodelan Run-up 29,2 meter

Nama Wilayah						
Run-up	Area Perkebunan dan Persawahan	Dusun Gumulharjo	Dusun Kenul	Dusun Ketro	Pulau	Total
0 - 5 M	16,55	1,83	0,88	9,30	-	28,56
5 - 10 M	14,18	3,06	0,20	9,48	-	26,92
10 - 15 M	14,94	2,64	-	10,15	-	27,74
15 - 20 M	13,20	5,00	-	14,26	-	32,46
20 - 25 M	11,38	5,44	-	18,29	0,37	35,48
25 - 29,2 M	4,70	2,03	-	9,59	3,18	19,51
<b>Total</b>	<b>74,96</b>	<b>20,00</b>	<b>1,08</b>	<b>71,07</b>	<b>3,56</b>	<b>170,66</b>

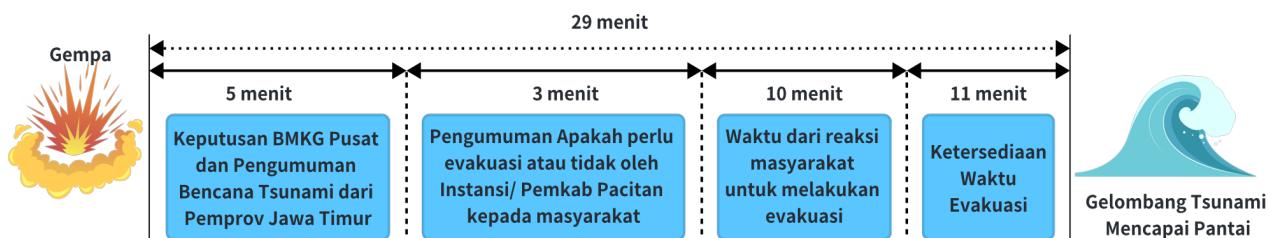
Sumber: Hasil Analisis Data (2025)



**Gambar 4.** Peta Inundasi Tsunami Skenario *Run-up* 29,2 Meter



Gambar 5. Peta Area Aman untuk Penempatan TES Desa Watukarung



Gambar 6. Ilustrasi Estimasi Ketersediaan Waktu untuk Evakuasi Bencana Tsunami di Desa Watukarung

membutuhkan waktu 5-25 menit (Gambar 8). Sebagian masyarakat yang berada di sekitar pantai tidak akan memiliki waktu yang cukup untuk evakuasi. Kemudian terdapat area di Dusun Ketro yang berada di sisi timur memiliki kebutuhan waktu evakuasi yang lama dan jauh dari area aman, sehingga perlu diarahkan menuju area aman di lokasi di luar Desa Watukarung. Alternatif tempat evakuasi lain menjadi penting untuk dapat mengakomodasi waktu evakuasi yang sangat terbatas tersebut.

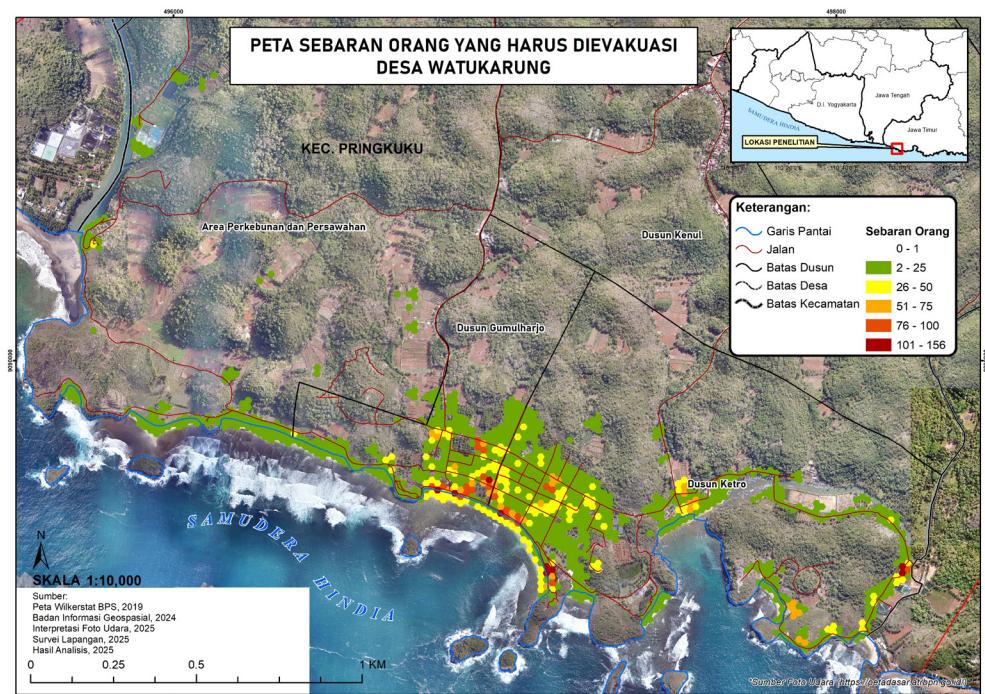
#### Sebaran Populasi yang dievakuasi di Pesisir Desa Watukarung

Hasil perhitungan populasi melalui sensus kapasitas bangunan pelayanan yang ada di Pesisir Desa Watukarung sebanyak  $\pm 3.428$  orang dan masyarakat di kawasan terdampak yaitu di Dusun Ketro dan Gumulharjo sebanyak  $\pm 782$  orang, selebihnya yaitu wisatawan yang berada di gisik berjumlah  $\pm 439$  orang, sehingga menghasilkan populasi yang harus dievakuasi di pesisir Desa Watukarung sebanyak  $\pm 4.649$  orang. Penduduk yang dievakuasi ini merupakan jumlah maksimal kapasitas yang dapat ditampung bangunan pelayanan yang berada di pesisir beserta masyarakat lokal. Sebaran populasi masyarakat yang berada di lokasi Pantai Watukarung ditunjukkan pada Gambar 9. Sebaran populasi yang tidak merata dan terkosentrasi di zona bahaya berpotensi

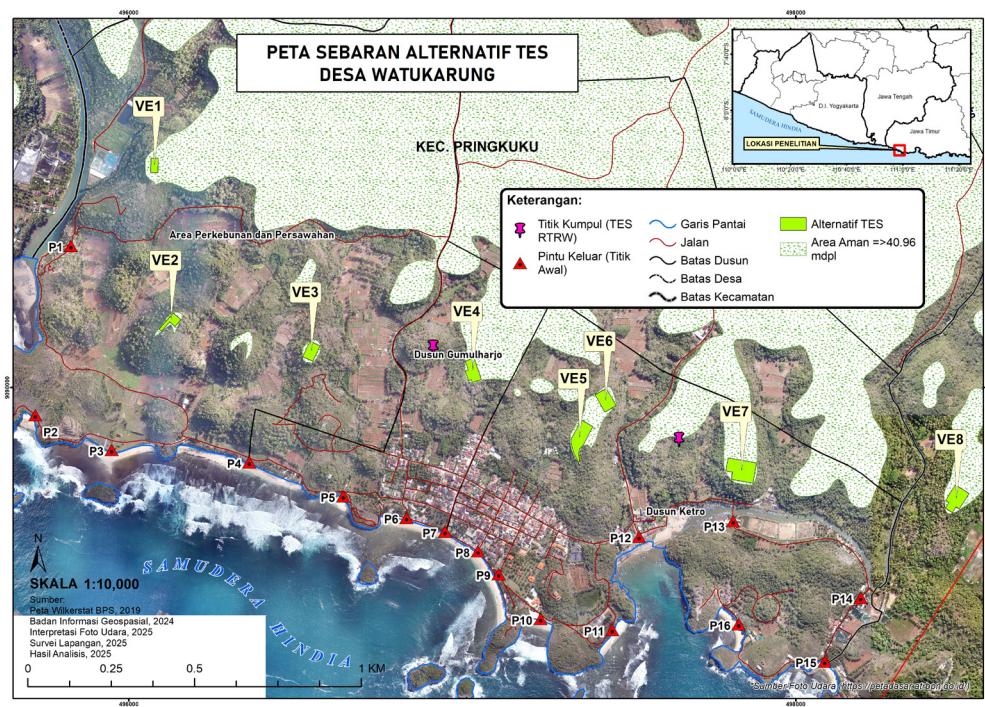
mengakibatkan kegagalan proses evakuasi, Tisngati *et al.* (2016) menemukan rendahnya kesadaran dan pemahaman tentang respon bencana pada masyarakat Desa Watukarung, sehingga upaya peningkatan kapasitas masyarakat melalui pendidikan bencana menjadi penting (Rini & Susanto, 2017). Sayogi & Demartoto (2018) juga menekankan bahwa aktivitas pariwisata yang masif akan meningkatkan jumlah populasi yang rentan terhadap bencana tsunami.

#### Alternatif Tempat Evakuasi Sementara dan Jalur Evakuasi Tsunami di Pesisir Desa Watukarung

Berdasarkan analisis kebutuhan waktu bahwa waktu untuk menuju ke tempat evakuasi melebihi ketersediaan waktu, sehingga perlu penambahan tempat evakuasi baru untuk memangkas waktu evakuasi. Alternatif penambahan tempat evakuasi baru yaitu dengan memanfaatkan area aman sebagai tempat penampungan sementara (TES), menjadi salah satu solusi dari ketidaksesuaian lokasi TES yang ditetapkan dalam RTRW Kabupaten Pacitan. Beberapa alternatif lokasi TES yang ideal dapat diperoleh berdasarkan analisis yang dilakukan (Gambar 10). Alternatif lokasi TES yang diperoleh berada pada topografi bukit-bukit karst, topografi ini juga direkomendasikan oleh Marfai *et al.* (2021). Luas tempat evakuasi sementara yang dibutuhkan tiap orang adalah  $0,97 \text{ m}^2$  atau  $1 \text{ m}^2$  dan luas efektif yang dapat ditampung diasumsikan



Gambar 9. Peta sebaran orang yang harus dievakuasi



Gambar 10. Peta Sebaran Alternatif TES

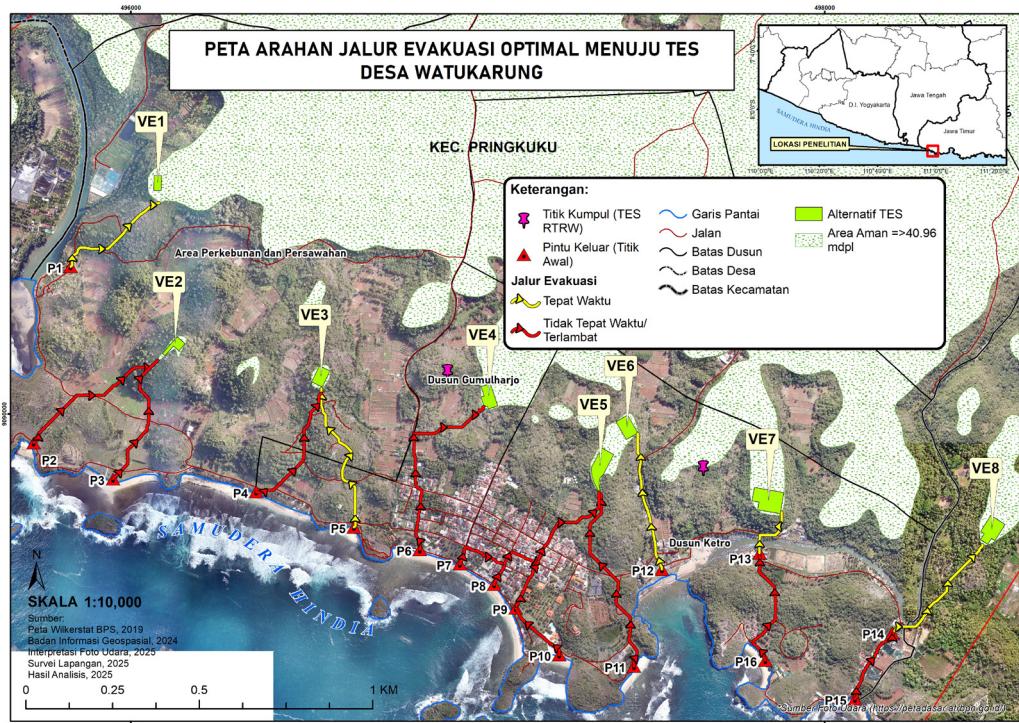
Tabel 6. Rekapitulasi Estimasi Kapasitas tiap Alternatif TES

TES	Luas (m <sup>2</sup> )	Kebutuhan Luas 1 orang (m <sup>2</sup> )	Kapasitas (orang)	80% Kapasitas (orang)
VE1	954,22	0,97	984	787
VE2	1.196	0,97	1.233	986
VE3	1.724,12	0,97	1.777	1.422
VE4	2.204,33	0,97	2.273	1.818
VE5	3.686,7	0,97	3.801	3.041
VE6	2.310,54	0,97	2.382	1.906
VE7	4.903,02	0,97	5.055	4.044
VE8	3.197,79	0,97	3.297	2.637

80%. Luas seluruh alternatif TES yang diusulkan (Tabel 6) dapat menampung seluruh orang yang berada di kawasan pesisir Desa Watukarung dan masih bisa diperluas lagi apabila diperlukan.

Gambar 11 menunjukkan hasil model jalur evakuasi dengan waktu tersingkat, berdasarkan biaya terendah terhadap kemiringan lereng, tutupan lahan/penggunaan lahan, dan kecepatan berjalan, selanjutnya Tabel 7 menunjukkan lama dan ketepatan waktu tempuh evakuasi dari titik awal menuju alternatif TES sebagai area aman yang diusulkan. Beberapa TES yang tidak dilalui oleh jalur evakuasi dianggap tidak

diperlukan, sebab jumlah TES yang sudah mencukupi. Analisis *least cost path* menunjukkan bahwa dari 16 jalur evakuasi, hanya terdapat 5 jalur yang tepat waktu yaitu P1-VE1; P5-VE3; P12-VE6; P13-VE7; & P14-VE8, sedangkan selain jalur yang disebutkan di atas terlambat atau melebihi waktu yang tersedia (>11 menit). Jalur yang dihasilkan dari pemodelan ini melintasi beberapa tutupan lahan tertentu yang masih bisa ditoleransi untuk dapat dilalui dengan berjalan kaki. Seperti area pertanian sawah tada hujan, rumput, semak, dan perkebunan.



Gambar 11. Peta alternatif jalur evakuasi dan tempat evakuasi sementara

Tabel 7. Waktu Tempuh Evakuasi dari Titik Awal Menuju Area Aman

Titik Awal	Nama TES	Jarak (meter)	Waktu Tempuh (menit)	Kecepatan Rata-Rata (meter/detik)	Keterangan
P1	VE1	353	7	0,84	Tepat Waktu
P2	VE2	439	20	0,37	Terlambat
P3	VE2	417	16	0,43	Terlambat
P4	VE3	386	14	0,46	Terlambat
P5	VE3	470	11	0,71	Tepat Waktu
P6	VE4	597	14	0,71	Terlambat
P7	VE5	619	16	0,64	Terlambat
P8	VE5	503	14	0,60	Terlambat
P9	VE5	461	15	0,51	Terlambat
P10	VE5	658	20	0,55	Terlambat
P11	VE5	577	19	0,51	Terlambat
P12	VE6	415	11	0,63	Tepat Waktu
P13	VE7	178	10	0,30	Tepat Waktu
P14	VE8	390	8	0,81	Tepat Waktu
P15	VE8	631	13	0,81	Terlambat
P16	VE7	550	21	0,44	Terlambat

Sumber: Hasil Analisis Data (2025)

Penelitian ini memiliki keterbatasan pada penggunaan data ketinggian dengan resolusi menengah, serta asumsi kecepatan evakuasi yang seragam dan belum melalui simulasi evakuasi di lapangan, namun hasil ini dapat memberikan dasar yang penting dalam perencanaan evakuasi yang lebih realistik. Pengembangan penelitian selanjutnya dapat dilakukan dengan mempertimbangkan perilaku evakuasi dari berbagai elemen risiko dengan pendekatan berbasis agen (*agent-based model*) (Mls *et al.*, 2023). Rekomendasi pengembangan lebih lanjut terkait rencana evakuasi tsunami di pesisir Watukarung antara lain pembangunan jalur perlu memperhatikan berbagai kondisi, seperti pembangunan tangga naik bagi jalur yang menuju ke atas bukit, peningkatan pemahaman dan kapasitas masyarakat, serta adanya kolaborasi antar *stakeholder* dalam implementasi kebijakan mitigasi bencana.

## KESIMPULAN

Hasil pemodelan *run-up* 29,2 meter menghasilkan jarak genangan hingga 900 meter dari garis pantai seluas 170,66 Ha. Wilayah terdampak meliputi perkebunan & persawahan (74,96 Ha), Dusun Kenul (1,08 Ha), Dusun Ketro (71,07 Ha), dan Dusun Gumulharjo (20 Ha). Hasil penentuan area aman menunjukkan bahwa dua TES dalam RTRW Kabupaten Pacitan belum memenuhi kriteria area aman tsunami, karena jarak tempuh yang digunakan untuk mencapai TES RTRW melebihi standar waktu evakuasi. Hasil model area aman memberikan alternatif 8 lokasi TES potensial dengan yang telah mencukupi jumlah populasi. Model jalur evakuasi menunjukkan 5 jalur alternatif evakuasi yang memenuhi waktu tempuh evakuasi  $\leq$  11 menit, dengan adanya jalur evakuasi yang harus melalui lahan pertanian/ perkebunan karena waktu tempuh lebih singkat dibandingkan melalui jalan eksisting. Diperlukan adanya *early warning system* yang aktif dan berfungsi, pembangunan akses jalur evakuasi yang memadai dengan penanda jelas, serta diseminasi rencana mitigasi bencana melalui diskusi, papan informasi, dan simulasi rutin, serta perlu dilakukan pembangunan fasilitas pada lokasi titik evakuasi supaya mendukung proses mitigasi bencana tsunami di pesisir Watukarung dapat terlaksana dengan maksimal. Terdapat beberapa keterbatasan pada penelitian ini, seperti kualitas dan resolusi data DEM yang kurang tinggi, model jalur evakuasi yang belum divalidasi melalui simulasi evakuasi nyata di lapangan, dan masih menggunakan asumsi kecepatan evakuasi yang seragam tanpa mempertimbangkan kondisi fisik dan perilaku pergerakan pengungsi. Rekomendasi untuk penelitian selanjutnya mencakup penggunaan *agent-based modelling* untuk menyimulasikan perilaku pergerakan evakuasi yang lebih realistik dan memperhitungkan pengungsi yang berhasil dievakuasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Universitas Teknologi Yogyakarta yang telah mendukung penuh secara akademik, serta seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian/ penyusunan artikel ini. Penelitian ini tidak didanai oleh sumber pendanaan eksternal.

## KONTRIBUSI PENULIS

**Penulis Pertama** mendesain metode penelitian, analisis data, dan membuat naskah publikasi; **Penulis Kedua** mendesain analisis data, meninjau naskah, dan memodifikasi naskah publikasi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Agustiana, E., Costrada, A. N., Aminah, N. S., & Djamil, M. (2024). Tsunami Evacuation Route Mapping Based on Modified Dijkstra's Algorithm in Batu Karas Beach, Pangandaran. *2nd International Conference on Software Engineering and Information Technology (ICoSEIT)*, 262–268. <https://doi.org/10.1109/icoseit60086.2024.10497502>
- Amri, I., Hikmasari, B. S., Nababan, C. A., Wijayanti, D. A., Ruslanjari, D., & Giyarsih, S. R. (2023). Tsunami Susceptibility Assessment Using Spatial Multi-Criteria Evaluation in Watukarung, Pacitan. *Jurnal Geografi*, 15(2), 195. Retrieved from <https://jurnal.unimed.ac.id/2012/index.php/geo/article/view/41767>
- Anggarwati, A. N. N. H., Mardiatno, D., & Mei, E. T. W. (2023). Evaluasi Pemodelan Jalur Evakuasi Tsunami Wilayah Kepesisiran Pantai Krakal dan Pantai Slili Gunungkidul. *Buletin Oseanografi Marina*, 12(1), 98–108. <https://doi.org/10.14710/buloma.v12i1.46458>
- Apte, M., Agarwadkar, Y., Azmi, S., & Inamdar, A. B. (2012). Understanding grids and effectiveness of hexagonal grid in spatial domain. *International Journal of Computer Applications*, 1(February), 25–27.
- Beresnev, A., Semenov, A., & Panidi, E. (2022). Hexagonal Grids Applied To Clustering Locations in Web Maps. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43(B4-2022), 435–440. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B4-2022-435-2022>
- Berryman, K. (2006). *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*. Lower Hutt, New Zealand.
- BMKG. (2012). *Pedoman Pelayanan Peringatan Dini Tsunami InaTEWS Edisi Kedua* (Vol. 2). Jakarta: BMKG.
- BNPB. (2011). *Panduan Nasional Pengkajian Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta.
- BNPB. (2012). *Menuju Indonesia Tangguh Menghadapi Tsunami : Masterplan Pengurangan Risiko Bencana Tsunami*. Jakarta: BNPB.
- Chen, C., Koll, C., Wang, H., & Lindell, M. K. (2023). An interdisciplinary agent-based evacuation model : integrating the natural environment , built environment , and social system for community preparedness and resilience. *Natural Hazards and Earth System Science*, 733–749.
- Danardono, Wibowo, A. A., Sari, D. N., Priyono, K. D., & Dewi, E. S. M. (2023). Tsunami Hazard Mapping based on Coastal System Analysis Using High-Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery (Case Study in Kukup Coastal Area, Gunungkidul Regency, Indonesia). *Geographia Technica*, 18(2), 51–67. [https://doi.org/10.21163/GT\\_2023.182.04](https://doi.org/10.21163/GT_2023.182.04)
- Dewi, R. S. (2012a). A-Gis Based Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, 2(2), 108–139. <https://doi.org/10.5595/idrim.2012.0023>
- Dewi, R. S. (2012b). A-Gis Based Approach of an Evacuation Model for Tsunami Risk Reduction. *Journal of Integrated Disaster Risk Management*, 2(2), 108–139. <https://doi.org/10.5595/idrim.2012.0023>
- Dj, K., Suriamihardja, D. A., & Davey, P. J. (2004). Tsunami Evacuation Planning as a tool for Tsunami Risk Reduction : A case study in Palu Bay, Central Sulawesi Kurniawan. *International Journal of Engineering and Science Applications (IJEScA)*, 7(1).
- ESRI. (2021). An overview of the Distance toolset. Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-distance-tools.htm>
- Fathiampour, A., Evans, B., Babaeian Jelodar, M., & Wilkinson, S. (2024). Environmental factors in tsunami evacuation simulation: topography, traffic jam, human behaviour. *Natural Hazards*, 120(14), 12797–12815. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06714-x>

- FEMA. (2019). FEMA P646, Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis Third Edition. In *Federal Emergency Management Agency*. California.
- Ferreira, M. A., Liveira, C. S., & Fransisco, R. (2025). Tsunami risk mitigation: the role of evacuation routes, preparedness and urban planning. *Natural Hazard*, 121, 6719–6751.
- Flores, C., & Lee, H. S. (2024). Understanding Tsunami Evacuation via a Social Force Model While Considering Stress Levels Using Agent-Based Modelling. *Sustainability*, 16(4307), 1–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/su16104307>
- Gabel, L. L. S., Allan, J. C., & O'Brien, F. E. (2024). *Vertical Structures And Other Tsunami Evacuation Improvement Options In Seaside And Cannon Beach, Clatsop County, Oregon*. State of Oregon.
- Horspool, N., Pranantyo, I. R., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D., Kongko, W., Cipta, A., Bustamam, Anugrah, S. D., & Thio, H. K. (2013). *Kajian Nasional Bahaya Tsunami untuk Indonesia*.
- 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(116), 46–53.
- 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>
- Mls, K., Kořínek, M., Štekerová, K., Tučník, P., Bureš, V., Čech, P., Husáková, M., Mikulecký, P., Nacházel, T., Ponce, D., Zanker, M., Babič, F., & Triantafyllou, I. (2023). Agent-based models of human response to natural hazards: systematic review of tsunami evacuation. *Natural Hazards*, 115(3), 1887–1908. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05643-x>
- Mostafizi, A., Wang, H., Cox, D., Cramer, L. A., & Dong, S. (2017). Agent-based tsunami evacuation modeling of unplanned network disruptions for evidence-driven resource allocation and retrofitting strategies. *Natural Hazards*, 88(3), 1347–1372. <https://doi.org/10.1007/s11069-017-2927-y>
- Mustafa, Moch. A., & Yudhicara, Y. (2007). Karakteristik Pantai Dan Resiko Tsunami Di Kawasan Pantai Selatan Yogyakarta. *Jurnal Geologi Kelautan*, 5(3), 159–167. <https://doi.org/10.32693/jgk.5.3.2007.143>
- Nugroho, P. C., Pinuji, A. H. S. E., Iriansyah, Nugraha, A., S., G. Y., Ichawana, A. N., Wiguna, S., Syauqi, A. W. A., Shabrina, R. E. R. F. Z., Septian, T. U. H. R. T., & A., A. (2018). Modul Teknis Penyusunan Kajian Risiko Bencana Tsunami. *Direktorat Pengurangan Risiko Bencana Badan Nasional Penanggulangan Bencana*, 1–95.
- Pemerintah Kabupaten Pacitan. *Peraturan Daerah Kabupaten Pacitan Nomor 1 Tahun 2024.* , (2024).
- Peroche, M., Leone, F., & Gutton, R. (2014). An accessibility graph-based model to optimize tsunami evacuation sites and routes in Martinique , France. *Advances in Geosciences*, 18, 1–8. <https://doi.org/10.5194/adgeo-38-1-2014>
- Purwanto, H. S., Isjudarto, A., R.A., L. T., & Kusumayudha, S. B. (2008). Mewaspada! Morfologi Teluk Sebagai Zona Bahaya Tsunami. *Jurnal Ilmiah MTG*, 1(1).
- Rashifah, N., Makalew, A. D. N., & Zain, A. F. M. (2024). Pengembangan Potensi Wisata dan Kesesuaian Lahan Wisata terhadap Resiko Tsunami di Kawasan Teluk Pacitan. *Jurnal Lanskap Indonesia*, 16(2), 217–223. <https://doi.org/10.29244/jli.v16i2.54696>
- Rini, D. S., & Susanto, H. P. (2017). Disaster Coaching (Dis-Co) Sebagai Upaya Peningkatan Tanggap Bencana Di Desa Watukarung Menuju Desa Tangguh. *Journal of Social Empowerment*, 02(4), 173–179.
- Rosaji, F. S. C. (2017). *Pemanfaatan Teknologi Unmanned Aerial Vehicle (UAV) untuk Perencanaan Evakuasi Tsunami di Kawasan Wisata Pantai (Studi Kasus: Pantai Pulang Syawal dan Sekitarnya, Kabupaten Gunungkidul)*. Universitas Gadjah Aada.
- Rudnick, D. A., Ryan, S. J., Beier, P., Cushman, S. A., Dieffenbach, F., Epps, C. W., Gerber, L. R., Hartter, J., Jenness, J. S., Kintsch, J., Merenlender, A. M., Perkl, R. M., Preziosi, D. V., & Trombulak, S. C. (2012). The role of landscape connectivity in planning and implementing conservation and restoration priorities. *Issues in Ecology*, (16), 1–23.
- Sari, I. C., Wijaya, I. N. S., & Usman, F. (2020). Penentuan Titik Evakuasi Dan Arah Jalan Evakuasi Desa-Desa Di Sepanjang Pesisir Kabupaten Jember. *Planning for Urban Region and Environment*, 9(3), 121–132.
- Sayogi, K. W., & Demartoto, A. (2018). Pengembangan Pariwisata Bahari (Studi Deskriptif Pada Pelaku Pengembangan Pariwisata Bahari Pantai Watukarung Desa Watukarung Kecamatan Pringkuwu Kabupaten Pacitan). *Journal of Development and Social Change*, 1(1), 9. <https://doi.org/10.20961/jodasc.v1i1.20728>
- Schmidlein, M. C., & Wood, N. J. (2015). Sensitivity of tsunami evacuation modeling to direction and land cover assumptions. *Applied Geography*, 56, 154–163. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.11.014>
- Sutikno, S., & Murakami, K. (2015). Application of Spatial and Network Analysis to Evaluate Shelter Plan for Tsunami Evacuation. *Civil Engineering Dimension*, 17(2), 88–94. <https://doi.org/10.9744/CED.17.2.88-94>
- Tisngati, U., Meifiani, N. I., & Susanto, H. P. (2016). Ancaman Gempa dan Tsunami di Desa Watukarung. *Journal of Social Empowerment*, 01(April).
- Ulinnuha, R. R., & Jumadi. (2025). 3D modelling of tsunami disaster in Pacitan Regency , East Java , using Arcgis 3D modelling of tsunami disaster in Pacitan Regency , East Java , using Arcgis. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 1462. Surakarta. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1462/1/012014>
- Usman, F., Murakami, K., Wicaksono, A. D., & Setiawan, E. (2017). Application of Agent-Based Model Simulation for Tsunami Evacuation in Pacitan , Indonesia. *MATEC Web of Conferences* 97, 01064. <https://doi.org/https://doi.org/10.1051/MATECCONF/20179701064>
- Wahyudi, D., Manurung, D. H., Fardhani, E. D., Wulandari, B. G. C., & Nursalim, I. (2023a). Kebijakan Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana Tsunami Di Wilayah Pesisir (Studi Kasus Desa Watukarung, Kecamatan Pringkuwu, Kabupaten Pacitan). *SeNSosio Unram*, 4(1), 109–124. Mataram: Universitas Mataram. Retrieved from <https://repository.uir.ac.id/8549/>
- Wahyudi, D., Manurung, D. H., Fardhani, E. D., Wulandari, B. G. C., & Nursalim, I. (2023b). Kebijakan Penyelenggaraan Penanggulangan Bencana Tsunami Di Wilayah Pesisir (Studi Kasus Desa Watukarung, Kecamatan Pringkuwu, Kabupaten Pacitan). *SeNSosio Unram*, 4(1), 109–124. Mataram: Universitas Mataram.
- Wood, N., Jones, J., Peters, J., & Richards, K. (2018). Pedestrian Evacuation Modeling to Reduce Vehicle Use For Distant Tsunami Evacuations in Hawai'i. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 28, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.03.009>
- Wood, N., Jones, J., Schmidlein, M., Schelling, J., & Frazier, T. (2016). Pedestrian flow-path modeling to support tsunami evacuation and disaster relief planning in the U.S. Pacific Northwest. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 18, 41–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.05.010>