



Analisis Kerentanan Tsunami Desa Talumolo Berbasis Sistem Informasi Geografis dan Parameter Multispektral untuk Mitigasi Bencana

Dicky Rahmansyah S. Tone^{a*}, Aang Panji Permana^b,

^{ab}Geology Engineering Study Program, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Indonesia

*email: dikyrahmansyah@gmail.com

ARTICLE INFO

Sejarah artikel:

Diterima : 23 September 2025

Direvisi : 14 Oktober 2025

Dipublish : 31 Desember 2025

Keywords: tsunami; kerentanan; sistem informasi geografis; weighted overlay analysis; Teluk Tomini;

How to cite this article: Tone, D. R. S., Permana, A. P. (2025). Analisis Kerentanan Tsunami Desa Talumolo Berbasis Sistem Informasi Geografis dan Parameter Multispektral untuk Mitigasi Bencana. *Journal of Applied Geoscience and Engineering*, 4(2), 193-205. <https://doi.org/10.34312/Jage.v4i2.38238>

ABSTRACT

The coastal area of Gorontalo City, particularly Talumolo Village, exhibits high tsunami vulnerability due to its location within the active tectonic setting of the Sangihe–Halmahera Arc, adjacent to Tomini Bay. This study aims to assess tsunami vulnerability in Talumolo and surrounding areas using a Geographic Information System (GIS) based on five parameters: elevation, slope, distance from rivers, distance from the coastline, and land cover. Data were obtained from the Geospatial Information Agency (BIG, 2019) and processed using ArcGIS 10.8 through a Weighted Overlay Analysis. Each parameter was classified into five vulnerability classes using a scoring system (1–9) and integrated with proportional weights: elevation (30%), slope (25%), distance from coastline (20%), distance from rivers (15%), and land cover (10%). The results identify five tsunami vulnerability classes: very high (215.4 ha; 23.7%), high (198.2 ha; 21.8%), moderate (370.0 ha; 40.7%), low (67.4 ha; 7.4%), and very low (58.9 ha; 6.4%). Very high vulnerability areas are concentrated along the coastal zones of Pohe, South Leato, and Bugis, characterized by elevations below 20 m and distances less than 500 m from the shoreline. Elevation and slope are the primary controlling factors, while dense settlement land cover amplifies potential impacts. The resulting vulnerability map provides an initial spatial framework to support tsunami mitigation planning, hazard zoning, evacuation route design, and coastal spatial management in Gorontalo City.

1. PENGANTAR

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko bencana geologi tertinggi di dunia, karena berada pada zona konvergensi tiga lempeng tektonik utama: Lempeng Eurasia di utara, Lempeng Indo–Australia di selatan, dan Lempeng Pasifik di timur. Interaksi kompleks ketiga lempeng ini menghasilkan sistem geologi aktif berupa palung laut dalam, busur vulkanik, zona subduksi, serta jaringan sesar besar yang tersebar di seluruh kepulauan Indonesia (Hamilton, 1979). Sebagai konsekuensinya, Indonesia termasuk wilayah yang paling sering mengalami gempa bumi dan tsunami berskala besar yang menimbulkan korban jiwa masif. Bencana tsunami Aceh pada 26 Desember 2004 yang menewaskan lebih dari 130.000 jiwa di Indonesia (Gersanandi *et al.*, 2013), dan tsunami Palu-Sulawesi pada 28 September 2018 yang menewaskan lebih dari 4.000 jiwa (Heidarzadeh *et al.*, 2019), menjadi pengingat nyata akan besarnya ancaman yang dihadapi oleh komunitas pesisir Indonesia. Fakta ini mendorong kebutuhan mendesak akan pemetaan kerentanan tsunami yang komprehensif dan berbasis data spasial sebagai fondasi perencanaan mitigasi bencana.

Penggunaan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam pemetaan kerentanan dan bahaya tsunami telah berkembang pesat dalam satu dekade terakhir. Pendekatan multi-kriteria berbasis SIG telah terbukti efektif dalam mengintegrasikan berbagai parameter fisik-geografis untuk

menghasilkan peta kerentanan tsunami yang komprehensif dan dapat dioperasionalkan dalam perencanaan mitigasi (Dall'Osso *et al.*, 2009; Biswas & Sil, 2023). Jumadi *et al.* (2025) menunjukkan bahwa metode *weighted overlay* dalam lingkungan SIG mampu mengintegrasikan data bahaya dan kerentanan secara terpadu untuk menghasilkan peta risiko tsunami yang aplikatif. Dalam skala Asia, penelitian Biswas dan Sil (2023) pada pantai timur India membuktikan bahwa kombinasi parameter elevasi, kelerengan, kepadatan penduduk, jarak dari pantai, tutupan lahan, dan akumulasi aliran melalui pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dapat mengklasifikasikan zona kerentanan secara akurat. Sinaga *et al.* (2014) dalam kajian serupa di wilayah pesisir Indonesia menerapkan kombinasi parameter yang hampir identik untuk menghasilkan peta kerentanan yang berguna bagi perencanaan tata ruang.

Kepulauan Sulawesi memiliki tatanan tektonik yang sangat kompleks akibat pertemuan tiga lempeng utama, yang menghasilkan empat sesar transkuren utama: Sesar Sorong–Matano, Sesar Palu-Koro, Sesar Walanae, dan Sesar Gorontalo (Watkinson & Hall, 2017 dalam Natawidjaja *et al.*, 2021). Sesar-sesar ini memiliki potensi seismik dan tsunami yang tinggi. Natawidjaja *et al.* (2021) mengkonfirmasi bahwa wilayah Gorontalo berada dalam zona pengaruh Sesar Gorontalo dan subduksi Sulawesi Utara, yang secara historis merupakan sumber gempa bumi bermagnitudo tinggi di kawasan Teluk Tomini. Bencana tsunami Palu 2018 yang dipicu oleh sesar Palu-Koro (Heidarzadeh *et al.*, 2019) menjadi preseden penting yang menunjukkan betapa cepatnya gempa pada sesar aktif di Sulawesi dapat menghasilkan tsunami destruktif, bahkan pada konfigurasi sesar dengan dominasi gerak mendatar (*strike-slip*).

Wilayah pesisir Gorontalo, khususnya Desa Talumolo yang terletak pada koordinat 0°31'17"LU dan 123°03'53"BT di Kecamatan Dumbo Raya, Kota Gorontalo, berada di dalam zona tektonik aktif yang dipengaruhi oleh sistem Busur Sangihe–Halmahera dan berbatasan langsung dengan Teluk Tomini. Morfologi wilayahnya didominasi oleh lereng landai hingga bergelombang dengan ketinggian rendah di dekat pantai, menjadikannya sangat rentan terhadap genangan tsunami. Kondisi ini diperparah oleh kepadatan permukiman yang tinggi di kawasan pesisir, yang menempatkan populasi manusia secara langsung dalam zona paparan bahaya tertinggi. Studi kerentanan tsunami di kawasan serupa di Indonesia, seperti yang dilakukan oleh Muzani *et al.* (2024) di Banten dan Akbar *et al.* (2020) di berbagai pesisir Sulawesi, mengkonfirmasi pola serupa di mana morfologi datar dan permukiman padat di dekat pantai merupakan kombinasi faktor paling berbahaya.

Berbagai penelitian terdahulu telah meletakkan kerangka metodologi yang kuat untuk pemetaan kerentanan tsunami berbasis SIG. Dall'Osso *et al.* (2009) mengembangkan model PTVA (*Potential Tsunami Vulnerability Area*) yang menjadi referensi penting dalam penilaian kerentanan bangunan terhadap tsunami. Sinaga *et al.* (2014) menerapkan pendekatan multi-parameter SIG pada pesisir Indonesia dengan membuktikan bahwa elevasi merupakan parameter dengan bobot tertinggi dalam analisis kerentanan. Gersanandi *et al.* (2013) mengkonfirmasi bahwa kerapatan penduduk dan pola penggunaan lahan permukiman merupakan determinan penting dalam menentukan tingkat kerugian akibat tsunami di pesisir Sumatera Barat. Isdianto *et al.* (2021) secara khusus mendokumentasikan peran sungai sebagai jalur penetrasi alami tsunami ke daratan yang mampu memperluas zona terdampak hingga beberapa kilometer dari garis pantai.

Pendekatan *Weighted Overlay Analysis* dalam SIG merupakan salah satu metode paling banyak digunakan dalam pemetaan kerentanan tsunami karena kemampuannya mengintegrasikan parameter heterogen dengan bobot proporsional sesuai tingkat pengaruhnya (Probo Kusumo & Nustari, 2016; Jumadi *et al.*, 2025). Metode ini memungkinkan analisis kuantitatif yang transparan dan reproducible, serta mudah diinterpretasi oleh pemangku kebijakan yang tidak memiliki latar belakang teknis dalam geospasial. Peraturan Kepala BNPB Nomor 2 Tahun 2014 tentang pedoman penyusunan peta risiko bencana tsunami menetapkan standar nasional yang mengakui validitas pendekatan ini untuk keperluan perencanaan mitigasi di Indonesia.

Meskipun potensi bahaya tsunami di kawasan Teluk Tomini telah diakui dalam literatur ilmiah (Natawidjaja *et al.*, 2021), kajian kerentanan tsunami yang bersifat spasial dan kuantitatif di tingkat desa untuk wilayah Talumolo dan sekitarnya belum pernah dilakukan secara komprehensif. Ketiadaan peta kerentanan spasial menyebabkan sulitnya menentukan prioritas intervensi mitigasi, zona rawan bagi perencanaan tata ruang, dan desain jalur evakuasi yang efektif. Penelitian ini

dirancang untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan menghasilkan peta kerentanan tsunami berskala desa pertama untuk kawasan Talumolo menggunakan pendekatan *Weighted Overlay Analysis* berbasis lima parameter multispektral SIG.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) mengklasifikasikan dan memetakan tingkat kerentanan tsunami di Desa Talumolo dan sekitarnya berdasarkan parameter elevasi, kelerengan, jarak dari sungai, jarak dari pantai, dan tutupan lahan; (2) mengidentifikasi zona kerentanan tinggi dan sangat tinggi sebagai prioritas mitigasi; dan (3) menyediakan instrumen spasial berbasis bukti untuk mendukung perencanaan mitigasi bencana dan tata ruang wilayah pesisir Kota Gorontalo. Kebaruan penelitian ini terletak pada aplikasi pertama *Weighted Overlay Analysis* multispektral untuk wilayah Talumolo–Teluk Tomini, yang belum pernah dikaji secara spasial sebelumnya, sehingga menghasilkan kontribusi orisinal bagi pengetahuan tentang kerentanan tsunami kawasan pesisir Sulawesi bagian utara.

2. METODE

2.1 Lokasi dan Data Penelitian

Wilayah penelitian mencakup Desa Talumolo dan desa-desa di sekitarnya yang meliputi Pohe, Leato Utara, Leato Selatan, Bugis, Buata, dan Tanah Putih, yang secara administratif berada di Kecamatan Dumbo Raya, Kota Gorontalo. Secara geografis, wilayah ini terletak antara 0°29'–0°33' LU dan 122°58'–123°07' BT, berbatasan langsung dengan Teluk Tomini di sisi selatan. Total luas wilayah yang dianalisis adalah sekitar 909,9 hektar.

Seluruh data spasial yang digunakan bersumber dari Badan Informasi Geospasial (BIG) sebagai lembaga otoritatif penyedia data geospasial nasional Indonesia. Data utama meliputi: (1) Model Elevasi Digital (*Digital Elevation Model/DEM*) untuk menghasilkan peta elevasi dan kelerengan; (2) peta jaringan sungai untuk analisis jarak dari sungai; (3) peta garis pantai untuk pembuatan buffer jarak dari pantai; dan (4) peta penggunaan lahan dari interpretasi citra satelit multispektral BIG tahun 2019. Semua data menggunakan sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 51N. Data BIG dipilih karena memiliki akurasi spasial tinggi, konsistensi cakupan nasional, dan kesesuaian skala untuk analisis tingkat desa (BIG, 2019). Pengolahan data dilakukan menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.8, mencakup konversi format, reproyeksi, pemotongan wilayah studi, reklasifikasi parameter, pembobotan, dan pembuatan peta tematik.

2.2 Penentuan Parameter dan Sistem Skoring

Pemilihan lima parameter dalam penelitian ini didasarkan pada kajian literatur terkait pemetaan kerentanan tsunami berbasis SIG (Dall'Osso *et al.*, 2009; Sinaga *et al.*, 2014; Biswas & Sil, 2023) serta standar nasional BNPB (2014). Parameter dipilih atas dasar: (1) relevansi fisik terhadap mekanisme propagasi dan inundasi tsunami; (2) ketersediaan data spasial yang terverifikasi; dan (3) kemampuan operasionalisasi dalam platform SIG. Setiap parameter direklasifikasi ke dalam lima kelas kerentanan dengan rentang skor 1 (sangat rendah) hingga 9 (sangat tinggi). Sistem skoring ini mengacu pada penelitian Probo Kusumo dan Nustari (2016) yang telah divalidasi untuk kondisi pesisir Indonesia, dengan penyesuaian pada parameter tutupan lahan berdasarkan interpretasi citra BIG (2019).

Elevasi dan kelerengan berfungsi sebagai parameter topografi utama yang menentukan hambatan fisik terhadap propagasi gelombang tsunami. Wilayah dengan elevasi rendah dan lereng landai tidak memiliki penghalang alami yang memadai, sehingga potensi genangan lebih besar (Biswas & Sil, 2023; Sinaga *et al.*, 2014). Jarak dari pantai merupakan faktor eksposur primer yang menentukan intensitas paparan langsung terhadap hempasan gelombang, mengingat energi gelombang berkurang secara gradual seiring bertambahnya jarak dari sumber (Muzani *et al.*, 2024). Jarak dari sungai mencerminkan potensi perambatan tsunami melalui alur sungai ke daratan, sebagaimana dikonfirmasi oleh Isdianto *et al.* (2021) bahwa sungai berfungsi sebagai jalur penetrasi alami tsunami hingga beberapa kilometer ke pedalaman. Tutupan lahan mengindikasikan tingkat eksposur manusia dan infrastruktur; permukiman padat dikategorikan paling rentan karena tidak memiliki kapasitas redaman energi gelombang yang dimiliki vegetasi alami seperti *mangrove* (Chen *et al.*, 2023).

Tabel 1. Klasifikasi Parameter Elevasi dan Skor Kerentanan (Probo Kusumo & Nustari, 2016)

No	Elevasi (m)	Keterangan Kerentanan	Skor
1	0 – 20	Sangat Tinggi	9
2	21 – 50	Tinggi	7
3	51 – 100	Sedang	5
4	101 – 300	Rendah	3
5	> 300	Sangat Rendah	1

Tabel 2. Klasifikasi Parameter Kelerengan dan Skor Kerentanan (Departemen Kehutanan, 1986)

Kelas	Kemiringan (%)	Morfologi	Skor	Tingkat Kerentanan
I	0 – 8	Datar	5	Sangat Tinggi
II	8 – 15	Landai	4	Tinggi
III	15 – 25	Agak Curam	3	Sedang
IV	25 – 45	Curam	2	Rendah
V	> 45	Sangat Curam	1	Sangat Rendah

Tabel 3. Klasifikasi Parameter Jarak dari Pantai dan Skor Kerentanan (Probo Kusumo & Nustari, 2016)

No	Jarak dari Pantai (m)	Keterangan Kerentanan	Skor
1	0 – 500	Sangat Tinggi	9
2	500 – 1.000	Tinggi	7
3	1.000 – 1.500	Sedang	5
4	1.500 – 3.000	Rendah	3
5	> 3.000	Sangat Rendah	1

Tabel 4. Klasifikasi Parameter Jarak dari Sungai dan Skor Kerentanan (Probo Kusumo & Nustari, 2016)

No	Jarak dari Sungai (m)	Keterangan Kerentanan	Skor
1	0 – 100	Sangat Tinggi	9
2	100 – 200	Tinggi	7
3	200 – 300	Sedang	5
4	300 – 500	Rendah	3
5	> 500	Sangat Rendah	1

Tabel 5. Klasifikasi Parameter Tutupan Lahan dan Skor Kerentanan (Interpretasi Citra BIG, 2019)

No	Jenis Tutupan Lahan	Keterangan Kerentanan	Skor
1	Permukiman padat	Sangat Tinggi	9
2	Sawah/lahan pertanian irigasi	Tinggi	7
3	Pertanian lahan kering campur	Sedang	5
4	Belukar/Semak	Rendah	3
5	Hutan atau lahan tidak terbangun	Sangat Rendah	1

2.3 Pembobotan Parameter dan Justifikasi

Pembobotan parameter dilakukan untuk menentukan kontribusi relatif setiap parameter terhadap indeks kerentanan akhir. Penentuan bobot didasarkan pada tiga pertimbangan: (1) kajian literatur empiris tentang faktor penentu kerentanan tsunami yang paling signifikan (Sinaga *et al.*, 2014; Biswas & Sil, 2023); (2) adaptasi dari penelitian Probo Kusumo dan Nustari (2016) yang telah divalidasi untuk kondisi pesisir Indonesia; dan (3) karakteristik spesifik wilayah Teluk Tomini yang didominasi oleh ancaman inundasi langsung dari laut.

Elevasi mendapat bobot tertinggi (30%) karena merupakan faktor pengontrol utama jangkauan genangan tsunami; temuan konsisten dari berbagai studi global menunjukkan bahwa elevasi

merupakan *predictor* tunggal terkuat dalam kerentanan inundasi (Dall'Osso *et al.*, 2009; Biswas & Sil, 2023). Kelerengan memperoleh bobot 25% sebagai parameter topografi komplementer yang menentukan kecepatan aliran dan kemampuan drainase pascagenangan. Jarak dari pantai mendapat bobot 20% mengingat perannya sebagai indikator langsung zona paparan primer gelombang (Muzani *et al.*, 2024). Jarak dari sungai diberi bobot 15% berdasarkan kajian Isdianto *et al.* (2021) yang mendokumentasikan peran sungai sebagai amplifikator penetrasi tsunami ke daratan. Tutupan lahan mendapat bobot 10% sebagai faktor eksposur yang mengkarakterisasi tingkat kerapuhan fisik terhadap kerusakan (Gersanandi *et al.*, 2013). Rincian pembobotan disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Bobot Parameter dalam *Weighted Overlay Analysis* (Adaptasi dari Probo Kusumo & Nustari, 2016; Biswas & Sil, 2023)

No	Parameter	Bobot (%)	Dasar Justifikasi
1	Elevasi	30	Faktor pengontrol jangkauan inundasi tsunami (Dall'Osso <i>et al.</i> , 2009; Sinaga <i>et al.</i> , 2014)
2	Kelerengan	25	Parameter topografi komplementer penentuan kecepatan aliran (BNPB, 2014)
3	Jarak dari Pantai	20	Indikator zona paparan primer gelombang (Muzani <i>et al.</i> , 2024)
4	Jarak dari Sungai	15	Jalur penetrasi tsunami ke daratan (Isdianto <i>et al.</i> , 2021)
5	Tutupan Lahan	10	Faktor eksposur kerusakan infrastruktur (Gersanandi <i>et al.</i> , 2013)

2.4 Proses Analisis *Weighted Overlay*

Tahapan analisis *Weighted Overlay* dalam ArcGIS 10.8 dilaksanakan sebagai berikut: (1) setiap peta parameter raster direklasifikasi menggunakan fungsi *Reclassify* berdasarkan tabel skor yang telah ditetapkan (Tabel 1–5); (2) nilai skor setiap parameter dikalikan dengan bobot proporsionalnya menggunakan fungsi *Raster Calculator*; (3) seluruh hasil perkalian dijumlahkan piksel demi piksel untuk menghasilkan *raster* indeks kerentanan akhir; (4) nilai indeks akhir diklasifikasikan ulang ke dalam lima kelas kerentanan menggunakan metode *Natural Breaks (Jenks)* yang meminimalkan varians intra-kelas; dan (5) peta kerentanan terpadu divisualisasikan dengan skema warna lima kelas dari hijau (sangat rendah) hingga merah (sangat tinggi). Alur analisis ini mengikuti panduan metodologis BNPB (2014) dan pendekatan yang dikembangkan oleh Sinaga *et al.* (2014) untuk pemetaan kerentanan tsunami pesisir Indonesia.

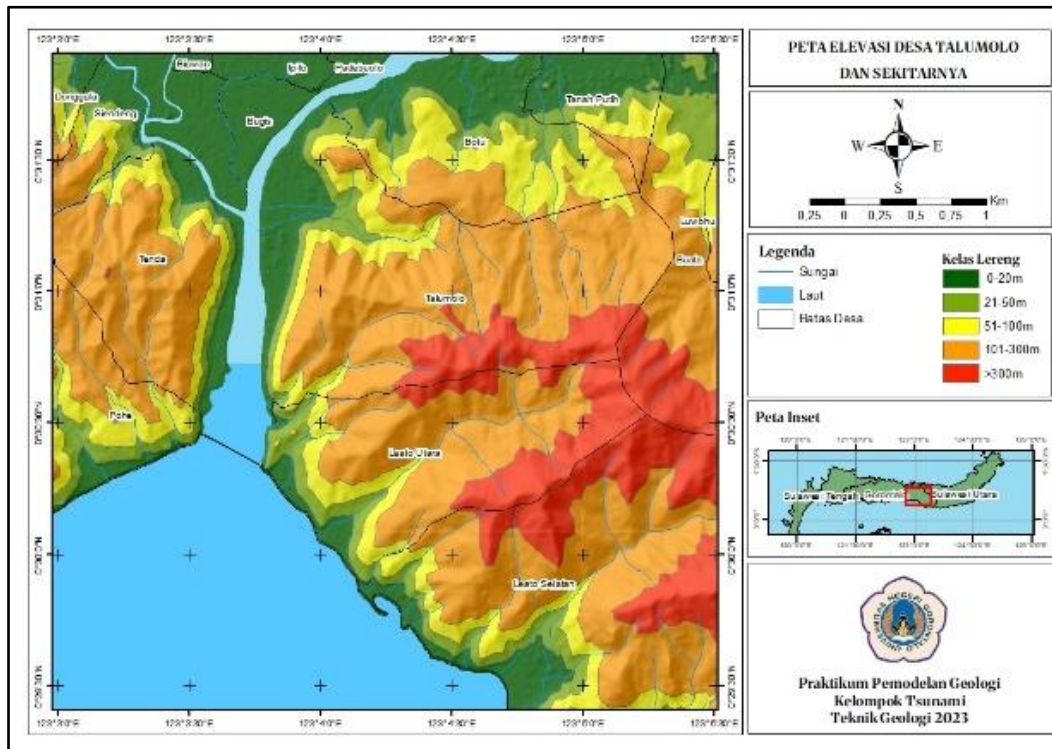
3. HASIL DAN DISKUSI

Analisis spasial dilakukan secara bertahap terhadap kelima parameter, yang masing-masing menghasilkan peta tematik tersendiri sebelum diintegrasikan melalui *Weighted Overlay Analysis*. Setiap parameter disajikan secara deskriptif-kuantitatif dengan mengacu pada distribusi spasial dan luas kelas kerentanan yang teridentifikasi.

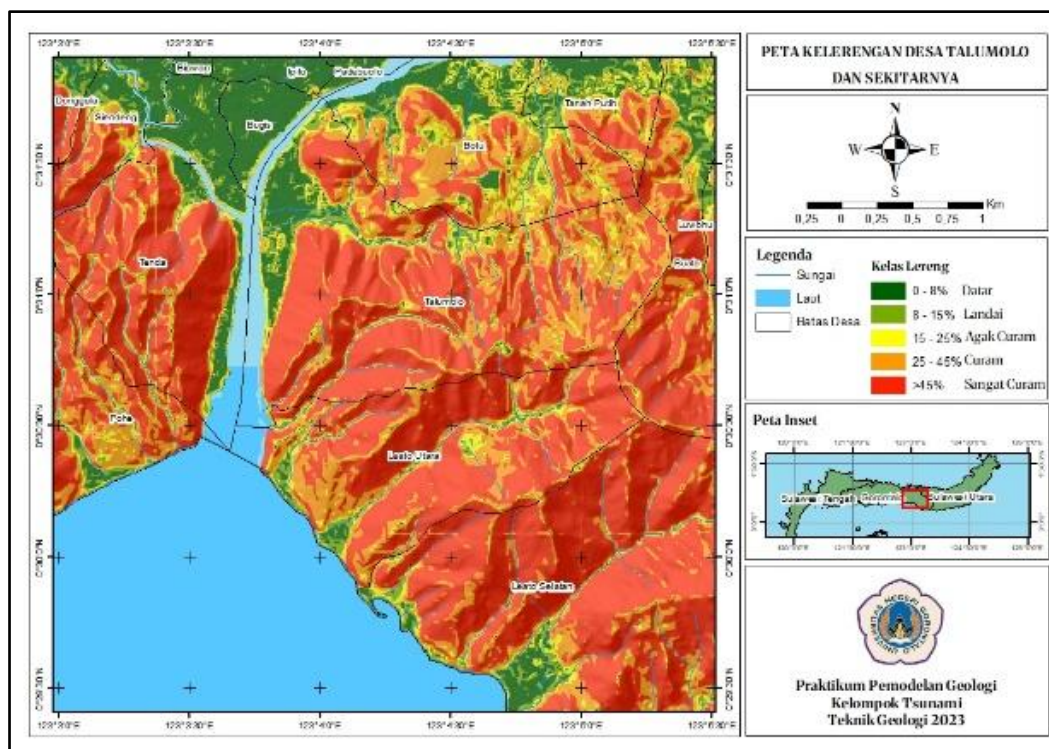
3.1 Hasil Analisis Parameter Elevasi

Klasifikasi elevasi (Gambar 3) menunjukkan bahwa wilayah pesisir Talumolo didominasi oleh ketinggian 0–50 meter di atas permukaan laut (dpl). Area dengan elevasi 0–20 m (kelas sangat rentan, skor 9) meliputi hampir seluruh kawasan pesisir Pohe, Leato Selatan, dan sebagian Talumolo, dengan perkiraan luasan sekitar 312 hektar atau 34,3% dari total wilayah penelitian. Area dengan elevasi 21–50 m (kelas tinggi, skor 7) tersebar di zona transisi antara dataran rendah dan kaki perbukitan, mencakup sekitar 187 hektar (20,6%). Wilayah dengan elevasi 51–100 m (kelas sedang, skor 5) mencakup sekitar 156 hektar (17,1%), sedangkan area dengan elevasi di atas

100 m, yang meliputi wilayah Buata dan Tanah Putih, hanya mencakup sekitar 255 hektar (28,0%) dan termasuk dalam kelas rendah hingga sangat rendah. Distribusi ini mengkonfirmasi dominasi zona dataran rendah pesisir yang secara inheren memiliki kerentanan topografi tinggi terhadap inundasi tsunami.



Gambar 3. Peta Klasifikasi Elevasi Desa Talumolo dan Sekitarnya



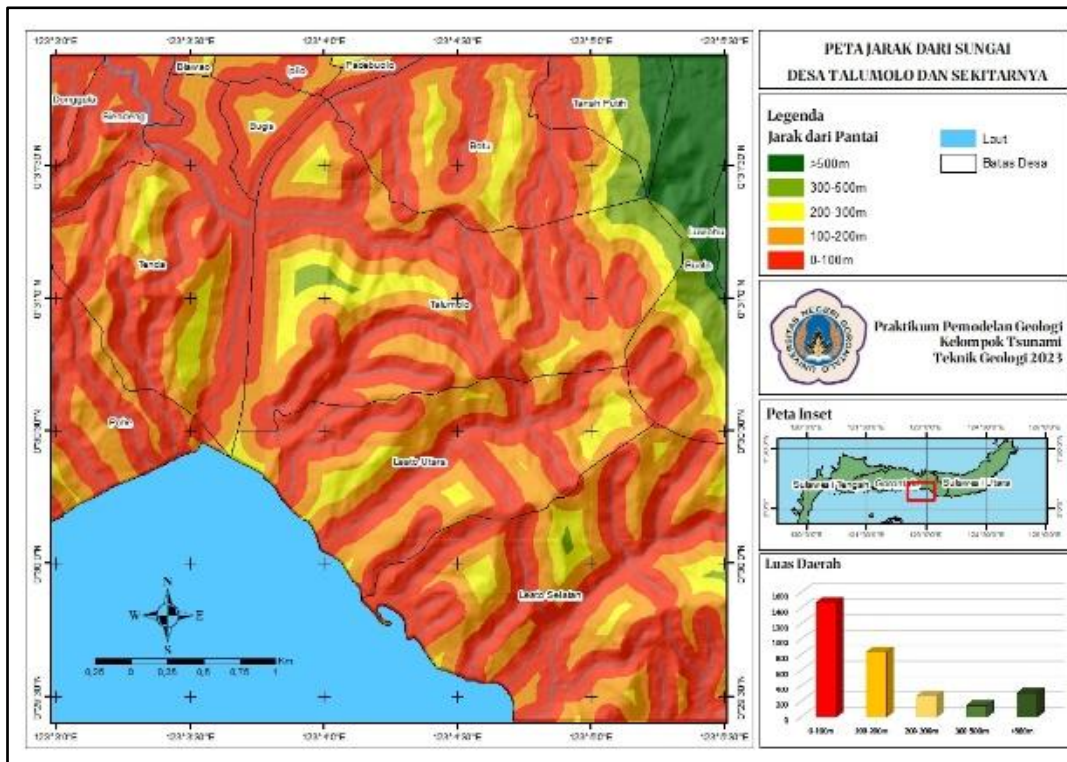
Gambar 4. Peta Klasifikasi Kelerengan Desa Talumolo dan Sekitarnya

3.2 Hasil Analisis Parameter Kelerengan

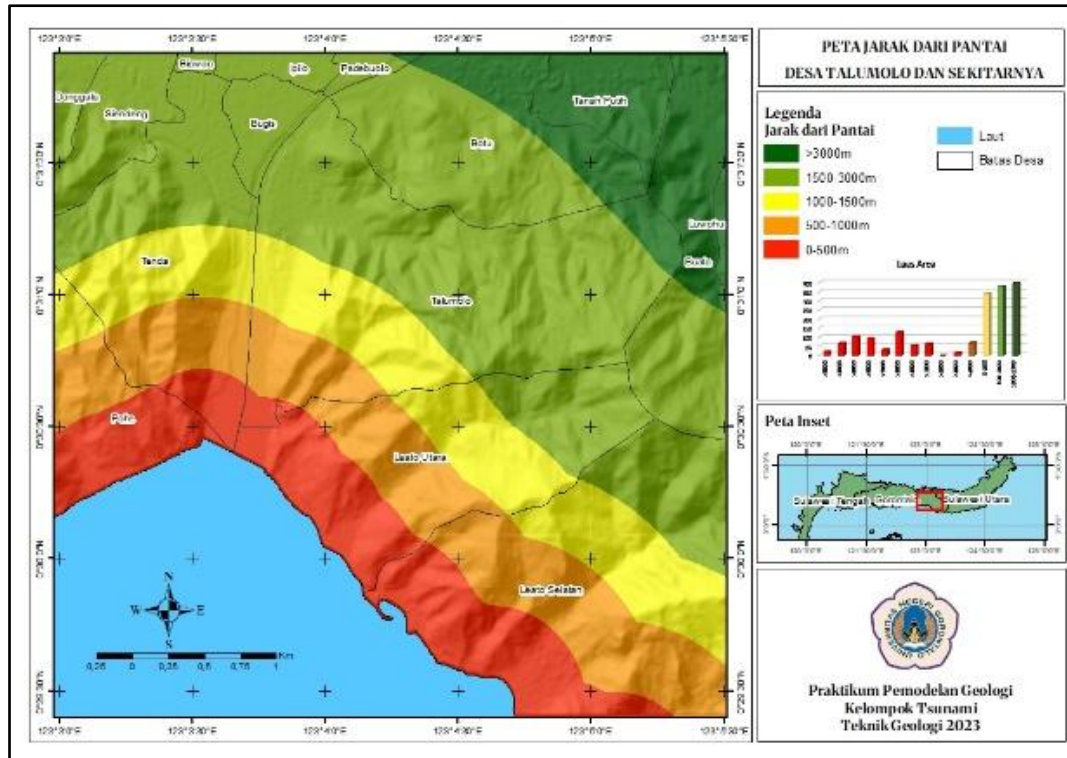
Hasil analisis kelerengan (Gambar 4) mengungkapkan bahwa sekitar 58% wilayah penelitian memiliki kemiringan lereng 0–8% (kelas datar, skor 5), yang tersebar di kawasan pesisir Pohe, Talumolo, dan Leato Utara. Area dengan kelerengan 8–15% (kelas landai, skor 4) mencakup sekitar 21% wilayah di zona transisi antara dataran rendah dan perbukitan. Lereng dengan kemiringan 15–25% (kelas agak curam, skor 3) menempati sekitar 12% wilayah, sedangkan area dengan kelerengan di atas 25% yang tergolong curam hingga sangat curam hanya mencakup sekitar 9% wilayah, terpusat di perbukitan utara dan timur Talumolo. Dominasi kelerengan datar dan landai di kawasan pesisir menunjukkan tidak adanya hambatan topografi alami yang memadai untuk mengurangi kecepatan dan energi gelombang tsunami saat memasuki daratan, sesuai dengan pernyataan BNPB (2014).

3.3 Hasil Analisis Parameter Jarak dari Sungai

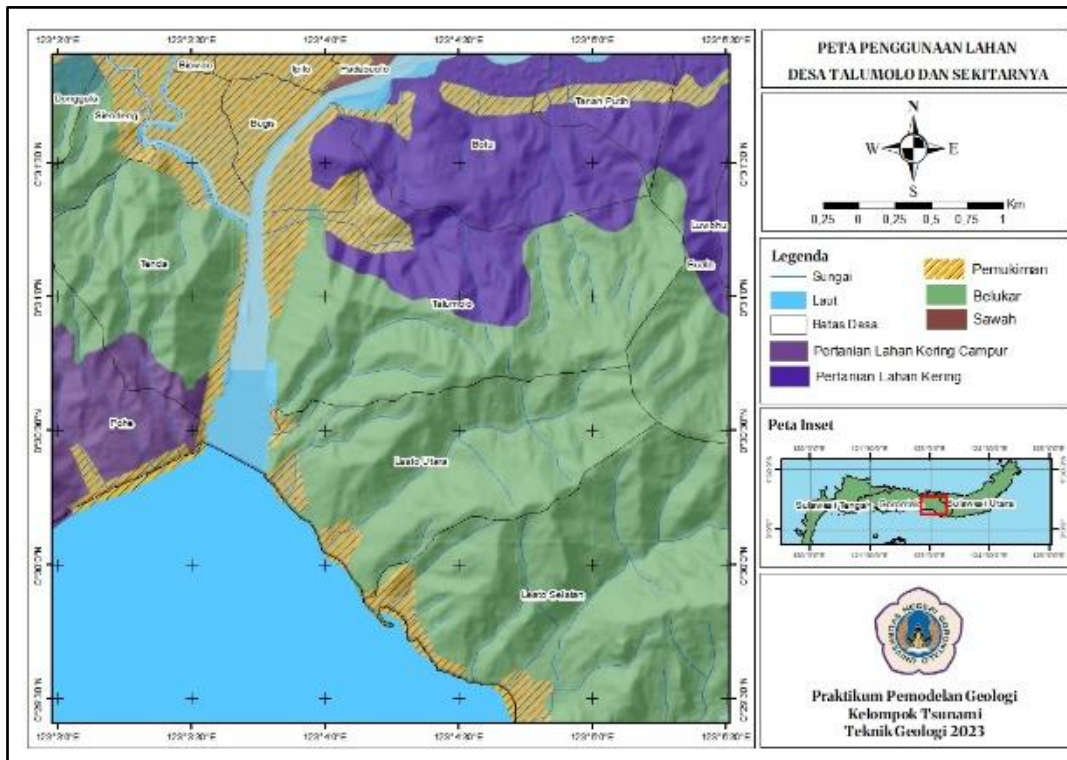
Analisis jarak dari sungai (Gambar 5) mengidentifikasi bahwa sekitar 18% wilayah penelitian berada dalam jarak 0–100 m dari sungai (kelas sangat rentan, skor 9), meliputi area tepi sungai di Talumolo dan Bugis. Wilayah dengan jarak 100–200 m dari sungai (kelas tinggi, skor 7) mencakup sekitar 14% area. Area dengan jarak 200–300 m (kelas sedang, skor 5) mencakup sekitar 11% wilayah, sementara area yang berjarak lebih dari 500 m dari sungai, yang termasuk kelas sangat rendah, mencakup sekitar 38% wilayah penelitian. Keberadaan sungai-sungai kecil yang bermuara langsung ke Teluk Tomini menjadikan sekitar 32% wilayah Talumolo rentan terhadap amplifikasi dampak tsunami melalui mekanisme jalur sungai (Isdianto *et al.*, 2021).



Gambar 5. Peta Klasifikasi Jarak dari Sungai Desa Talumolo dan Sekitarnya



Gambar 6. Peta Klasifikasi Jarak dari Pantai Desa Talumolo dan Sekitarnya



Gambar 7. Peta Tutupan Lahan Desa Talumolo dan Sekitarnya

3.4 Hasil Analisis Parameter Jarak dari Pantai

Parameter jarak dari pantai (Gambar 6) mengungkapkan pola spasial yang paling jelas dan terstruktur di antara semua parameter. Zona dengan jarak 0–500 m dari garis pantai (kelas sangat rentan, skor 9) membentuk pita pesisir memanjang yang mencakup sekitar 22% dari total area penelitian, meliputi seluruh kawasan pesisir Pohe, Leato Selatan, dan sebagian Talumolo. Zona

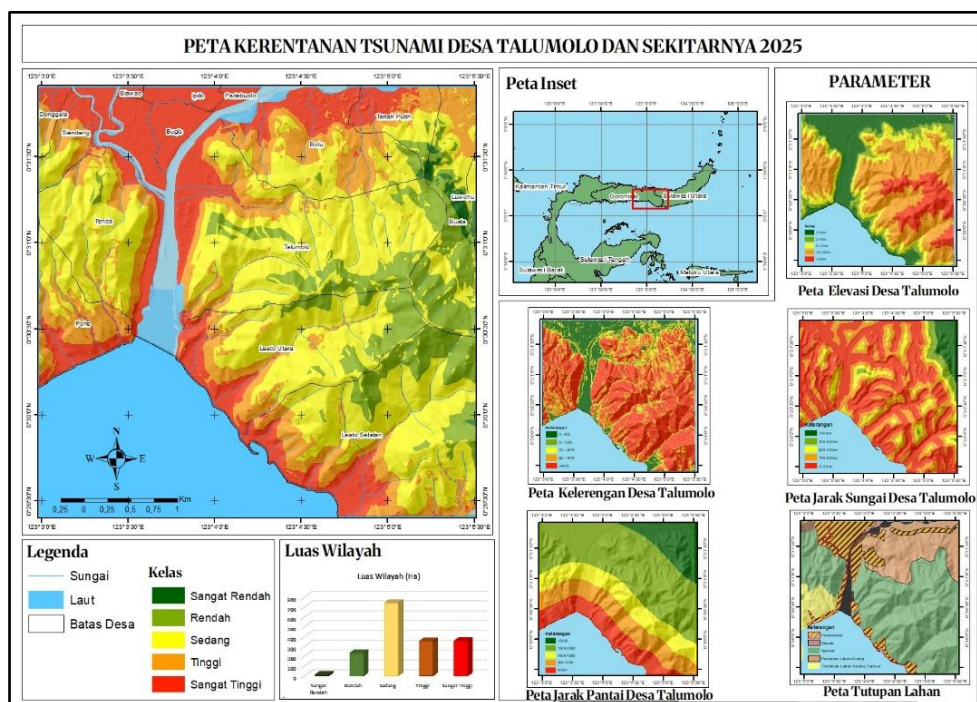
500–1.000 m (kelas tinggi, skor 7) mencakup sekitar 18% wilayah, sedangkan zona 1.000–1.500 m (kelas sedang) mencakup sekitar 15%. Area yang berjarak lebih dari 1.500 m dari pantai, dengan kerentanan rendah hingga sangat rendah, mencakup sekitar 45% wilayah. Pola pita linier sejajar garis pantai yang teridentifikasi ini konsisten dengan temuan Muzani *et al.* (2024) dan Biswas & Sil (2023) yang menegaskan bahwa jarak dari pantai merupakan salah satu *predictor* terkuat dalam menentukan intensitas dampak tsunami terhadap permukiman pesisir.

3.5 Hasil Analisis Parameter Tutupan Lahan

Berdasarkan data BIG (2019), penggunaan lahan di wilayah penelitian terdiri atas: permukiman padat (skor 9) yang mendominasi kawasan pesisir Pohe, Talumolo, dan Leato Selatan mencakup sekitar 31% total area; pertanian lahan kering campur (skor 5) mencakup sekitar 28%; belukar/semak (skor 3) mencakup sekitar 22%; serta vegetasi lebat/hutan (skor 1) di wilayah perbukitan mencakup sekitar 19% (Gambar 7). Distribusi tutupan lahan ini menunjukkan bahwa hampir sepertiga wilayah penelitian berupa permukiman padat yang langsung terpapar risiko kerusakan fisik akibat gelombang tsunami. Kondisi ini diperparah oleh minimnya vegetasi pelindung pantai, khususnya *mangrove*, di sepanjang garis pantai Talumolo; padahal telah dibuktikan bahwa hutan mangrove dengan lebar 100 m mampu mereduksi tinggi gelombang tsunami sebesar 13–66% (Chen *et al.*, 2023).

3.6 Peta Kerentanan Tsunami Terpadu dan Distribusi Kelas

Integrasi kelima parameter melalui *Weighted Overlay Analysis* menghasilkan peta kerentanan tsunami terpadu (Gambar 8) yang mencerminkan distribusi spasial risiko inundasi di seluruh wilayah penelitian. Tabel 7 merangkum distribusi luas dan persentase setiap kelas kerentanan.



Gambar 8. Peta Kerentanan Tsunami Terpadu Desa Talumolo dan Sekitarnya

Tabel 7. Distribusi Luas Area per Kelas Kerentanan Tsunami Desa Talumolo dan Sekitarnya

No	Kelas Kerentanan	Wilayah Utama	Luas (Ha)	Persentase (%)
1	Sangat Tinggi	Pohe, Leato Selatan, Bugis	215,4	23,7
2	Tinggi	Talumolo, Leato Utara	198,2	21,8
3	Sedang	Area tengah dan timur	370,0	40,7
4	Rendah	Perbukitan Utara–Timur	67,4	7,4
5	Sangat Rendah	Buata, Tanah Putih	58,9	6,4

Total	909,9	100,0
-------	-------	-------

Kelas kerentanan sedang mendominasi wilayah penelitian dengan 370,0 hektar (40,7%), tersebar di area tengah dan timur yang berada pada zona transisi antara dataran rendah dan perbukitan. Secara kumulatif, kelas tinggi dan sangat tinggi mencakup 413,6 hektar atau 45,5% dari total area. Hal ini menunjukkan bahwa hampir setengah wilayah Talumolo dan sekitarnya berada dalam kategori kerentanan tinggi terhadap inundasi tsunami, dengan wilayah pesisir Pohe, Leato Selatan, dan Bugis sebagai zona prioritas mitigasi utama. Kelas rendah dan sangat rendah bersama-sama hanya mencakup 126,3 hektar (13,8%), sebagian besar terletak di perbukitan bagian utara dan timur dengan elevasi di atas 100 m dpl.

3.7 Dominasi Faktor Topografi dalam Menentukan Pola Kerentanan

Temuan utama penelitian ini mengkonfirmasi bahwa elevasi dan kelerengan merupakan dua faktor topografi yang paling determinan dalam mengontrol distribusi spasial kerentanan tsunami di wilayah Talumolo. Area pesisir dengan elevasi di bawah 20 meter dan kelerengan di bawah 8% secara konsisten menunjukkan nilai indeks kerentanan tertinggi dalam analisis *Weighted Overlay*. Ini sejalan dengan konsensus ilmiah yang didokumentasikan oleh Biswas dan Sil (2023) bahwa elevasi merupakan *predictor* tunggal terkuat dalam kerentanan inundasi tsunami, karena energi gelombang terkonsentrasi pada area dengan hambatan topografi minimal saat memasuki perairan dangkal dan daratan. Dall'Osso *et al.* (2009) dalam model PTVA-nya juga menetapkan elevasi sebagai variabel kunci dalam menentukan tingkat kerentanan bangunan terhadap dampak hidrodinamik tsunami.

Pola gradien kerentanan topografi yang teridentifikasi di Talumolo menurun dari pesisir selatan menuju perbukitan utara dan timur merupakan karakteristik universal kawasan pesisir datar yang berhadapan langsung dengan laut terbuka (Muzani *et al.*, 2024). Wilayah Pohe, Leato Selatan, dan Bugis yang memiliki kombinasi elevasi sangat rendah (<20 m) dan kelerengan datar (0–8%) membentuk zona kerentanan tertinggi seluas 215,4 hektar. Identifikasi spasial zona ini secara kuantitatif memberikan basis ilmiah yang kuat untuk penetapan batas zonasi rawan bencana dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kota Gorontalo. Gradien kerentanan ini juga memberikan landasan untuk desain jalur evakuasi yang mengarahkan masyarakat ke perbukitan di utara dan timur yang memiliki elevasi di atas 100 m dpl dan merupakan zona aman secara topografi.

3.8 Peran Jarak dari Pantai sebagai Faktor Eksposur Primer

Parameter jarak dari pantai menghasilkan pola spasial yang paling terstruktur di antara semua parameter, membentuk zona konsentris yang semakin aman seiring bertambahnya jarak dari garis pantai. Pita kerentanan sangat tinggi (0–500 m dari pantai) yang membentang sejajar garis pantai Talumolo mencerminkan karakter khas kawasan pesisir datar tanpa penghalang alami antara permukiman dan laut terbuka Teluk Tomini. Temuan ini konsisten dengan studi Muzani *et al.* (2024) di pesisir Banten dan Akbar *et al.* (2020) di pesisir Sulawesi, yang sama-sama mengidentifikasi zona 0–500 m dari pantai sebagai zona paparan tsunami tertinggi.

Implikasi kritis dari temuan ini adalah bahwa seluruh permukiman yang berada dalam jarak 500 meter dari garis pantai Talumolo mencakup sebagian besar wilayah pesisir Pohe dan Leato Selatan secara inheren berada dalam zona risiko tinggi. Tanpa adanya penghalang fisik berupa vegetasi pantai tebal, tanggul, atau infrastruktur pelindung, komunitas ini akan menerima terjangan gelombang tsunami hampir tanpa hambatan. Chen *et al.* (2023) membuktikan secara eksperimental bahwa hutan *mangrove* dengan lebar 100 meter mampu mereduksi tinggi gelombang tsunami sebesar 13–66%, dan reduksi ini meningkat hingga 50–99% untuk lebar hutan 500 meter. Ketiadaan vegetasi *mangrove* yang memadai di sepanjang garis pantai Talumolo saat ini (berdasarkan data tutupan lahan BIG 2019) menjadikan zona 0–500 m ini sebagai prioritas rehabilitasi vegetasi pantai dalam program mitigasi jangka panjang.

3.9 Peran Sungai sebagai Jalur Penetrasi Tsunami ke Daratan

Keberadaan sungai-sungai kecil yang bermuara langsung ke Teluk Tomini memberikan dimensi risiko spasial tambahan yang sering diabaikan dalam perencanaan mitigasi. Sekitar 32% wilayah Talumolo dan Bugis berada dalam radius 200 meter dari sungai, yang berdasarkan sistem

skoring penelitian ini termasuk dalam kelas sangat tinggi hingga tinggi. Isdianto *et al.* (2021) mendokumentasikan fenomena penetrasi tsunami melalui jalur sungai dalam konteks beberapa wilayah pesisir Indonesia, di mana gelombang tsunami yang masuk melalui muara sungai dapat merambat hingga beberapa kilometer ke pedalaman, jauh melampaui zona inundasi langsung dari pantai. Goda dan Song (2019) juga mengkonfirmasi bahwa resolusi data topografi yang digunakan dalam pemodelan tsunami harus mempertimbangkan keberadaan jaringan sungai untuk menghasilkan estimasi inundasi yang akurat.

Identifikasi wilayah permukiman yang berada dalam radius 200 meter dari sungai sebagaimana yang ditemukan di sepanjang aliran sungai Talumolo dan Bugis memiliki implikasi langsung bagi perencanaan evakuasi. Jalur evakuasi di kawasan ini tidak seharusnya mengikuti koridor sepanjang sungai, melainkan harus mengarah tegak lurus dari sungai menuju area yang lebih tinggi secara elevasi. Selain itu, zona penyangga (*buffer zone*) minimal 100 meter di sepanjang alur sungai yang bermuara ke laut perlu dipertimbangkan sebagai kawasan yang tidak boleh dikembangkan untuk permukiman baru, sebagai langkah proaktif pengurangan risiko bencana berbasis tata ruang.

3.10 Tutupan Lahan sebagai Faktor Amplifikasi Dampak

Tutupan lahan permukiman padat yang mendominasi kawasan pesisir Talumolo (sekitar 31% dari total area) berperan sebagai faktor yang secara signifikan mengamplifikasi dampak fisik tsunami terhadap jiwa dan infrastruktur. Berbeda dari parameter topografi yang menentukan jangkauan dan kedalaman inundasi, tutupan lahan menentukan seberapa besar kerusakan yang terjadi pada area yang tergenang. Gersanandi *et al.* (2013) mengkonfirmasi bahwa kerapatan penduduk dan dominasi penggunaan lahan permukiman merupakan determinan utama tingkat kerugian yang ditimbulkan oleh tsunami di pesisir Sumatera Barat. Temuan yang sama dikonfirmasi oleh Biswas dan Sil (2023) di pantai timur India, di mana area permukiman padat dengan elevasi rendah secara konsisten menghasilkan nilai kerentanan tertinggi.

Dari perspektif mitigasi, konversi tutupan lahan dari permukiman padat menjadi vegetasi pelindung atau taman penyangga di zona 0–500 meter dari pantai merupakan strategi paling efektif secara jangka panjang. Rehabilitasi *mangrove* yang telah terbukti secara ilmiah memberikan proteksi signifikan terhadap gelombang tsunami (Chen *et al.*, 2023) dapat dimulai dari kawasan pesisir Pohe dan Leato Selatan. Untuk permukiman yang sudah ada, penguatan kapasitas bangunan terhadap gaya hidrodinamik tsunami, dikombinasikan dengan pemasangan sistem peringatan dini dan pelatihan evakuasi rutin, merupakan langkah mitigasi non-struktural yang paling kritis dan dapat segera diimplementasikan.

3.11 Perbandingan dengan Studi Sejenis di Pesisir Indonesia dan Implikasi Regional

Distribusi kelas kerentanan di wilayah Talumolo memperlihatkan keserupaan pola dengan hasil studi tsunami *vulnerability mapping* di berbagai pesisir Indonesia. Gersanandi *et al.* (2013) menemukan dominasi kerentanan tinggi di zona pesisir datar berpermukiman padat di Sumatera Barat, dengan pola gradien serupa yang menurun dari pantai menuju pedalaman. Muzani *et al.* (2024) dalam kajiannya di pesisir Banten mengidentifikasi bahwa 45% wilayah pesisir yang dikaji termasuk dalam kategori kerentanan tinggi dan sangat tinggi, proporsi yang hampir identik dengan temuan penelitian ini (45,5%). Akbar *et al.* (2020) dalam kajian kerentanan tsunami di beberapa wilayah pesisir Sulawesi juga mengkonfirmasi dominasi pola kerentanan tinggi di kawasan pesisir datar yang berdekatan dengan zona tektonik aktif. Konsistensi temuan ini memperkuat validitas metodologi *Weighted Overlay Analysis* berbasis parameter multispektral yang diterapkan dalam penelitian ini.

Dalam konteks regional, wilayah Teluk Tomini memiliki karakteristik seismotektonik yang serupa dengan Teluk Palu sebelum bencana 2018 keduanya merupakan teluk semi-tertutup yang berbatasan dengan sesar aktif dan dikelilingi permukiman padat. Natawidjaja *et al.* (2021) mengkonfirmasi potensi seismik tinggi di wilayah Gorontalo akibat pengaruh Sesar Gorontalo dan subduksi Sulawesi Utara. Dengan 45,5% wilayah Talumolo termasuk kategori kerentanan tinggi dan sangat tinggi, dan mengingat konfigurasi tektonik Teluk Tomini yang berpotensi menghasilkan tsunami lokal dengan waktu tiba sangat singkat (kemungkinan di bawah 30 menit), perencanaan

respons bencana yang efektif memerlukan integrasi peta kerentanan ini ke dalam sistem peringatan dini dan prosedur evakuasi yang sudah dilatihkan secara berkala kepada masyarakat pesisir.

3.12 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui untuk memberikan konteks yang tepat bagi interpretasi hasilnya. Pertama, resolusi spasial data DEM yang digunakan (DEM BIG skala 1:50.000) mungkin tidak menangkap variasi mikrotopografi yang signifikan di kawasan pesisir. Penelitian Goda dan Song (2019) menunjukkan bahwa resolusi data topografi berpengaruh signifikan terhadap akurasi estimasi inundasi tsunami; data DEM beresolusi lebih tinggi (misalnya 1–5 m dari LiDAR) akan menghasilkan delineasi zona inundasi yang lebih presisi. Kedua, pembobotan parameter dalam *Weighted Overlay Analysis* mengandung unsur penilaian ahli (*expert judgment*) yang bersifat semi-subjektif. Pendekatan *Analytic Hierarchy Process* (AHP) yang digunakan oleh Biswas dan Sil (2023) dapat memberikan nilai bobot yang lebih tervalidasi secara matematis melalui uji konsistensi rasio. Ketiga, penelitian ini tidak menyertakan pemodelan numerik *run-up* dan inundasi tsunami yang akan menghasilkan estimasi ketinggian gelombang dan jangkauan genangan yang lebih akurat untuk skenario bahaya spesifik. Keempat, data tutupan lahan yang digunakan adalah data tahun 2019 yang mungkin sudah mengalami perubahan, terutama di kawasan pesisir yang umumnya dinamis. Penelitian lanjutan yang mengintegrasikan data terkini, DEM beresolusi tinggi, serta pemodelan numerik tsunami berbasis data batimetri Teluk Tomini diperlukan untuk menghasilkan analisis risiko yang lebih komprehensif.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menghasilkan peta kerentanan tsunami pertama untuk wilayah Desa Talumolo dan sekitarnya menggunakan *Weighted Overlay Analysis* berbasis lima parameter multispektral SIG. Lima kelas kerentanan berhasil diidentifikasi dan dipetakan secara spasial dengan distribusi sebagai berikut: kelas sangat tinggi (215,4 ha; 23,7%), tinggi (198,2 ha; 21,8%), sedang (370,0 ha; 40,7%), rendah (67,4 ha; 7,4%), dan sangat rendah (58,9 ha; 6,4%). Secara kumulatif, 45,5% dari total wilayah penelitian tergolong dalam kategori kerentanan tinggi dan sangat tinggi, mengindikasikan kondisi risiko yang memerlukan respons kebijakan mitigasi yang terencana dan segera.

Tiga temuan utama dapat disimpulkan dari penelitian ini. Pertama, elevasi dan kelerengan terbukti sebagai faktor topografi paling determinan; kombinasi elevasi di bawah 20meter dan kelerengan datar (<8%) di kawasan pesisir Pohe, Leato Selatan, dan Bugis menghasilkan zona kerentanan tertinggi yang harus menjadi prioritas utama dalam perencanaan mitigasi. Kedua, jarak dari pantai membentuk pola kerentanan linier yang paling terstruktur; zona 0–500meter dari garis pantai merupakan area paparan tsunami langsung yang seluruhnya masuk dalam kategori sangat rentan. Ketiga, keberadaan sungai yang bermuara ke Teluk Tomini memberikan risiko penetrasi tsunami tambahan ke daratan, dan permukiman dalam radius 200meter dari sungai perlu mendapat perhatian khusus dalam rencana evakuasi dan pengendalian tata ruang.

Peta kerentanan tsunami yang dihasilkan merupakan kontribusi ilmiah orisinal yang dapat segera dimanfaatkan oleh pemerintah Kota Gorontalo untuk: (1) menetapkan zona rawan dalam dokumen RTRW dan Rencana Penanggulangan Bencana Daerah (RPBD); (2) merancang jalur dan lokasi evakuasi vertikal yang berbasis bukti spasial; (3) mengendalikan perluasan permukiman di zona kerentanan tinggi; dan (4) memprioritaskan program rehabilitasi vegetasi pantai di sepanjang garis pantai Pohe dan Leato Selatan. Penelitian lanjutan yang mengintegrasikan DEM beresolusi tinggi dari LiDAR, pemodelan *run-up* tsunami berbasis data batimetri Teluk Tomini, serta validasi lapangan perlu dilakukan untuk meningkatkan presisi estimasi inundasi sebagai basis perencanaan mitigasi yang lebih komprehensif.

5. REFERENSI

- Akbar, M. R., Arifin, Y. F., & Fahmi, M. (2020). Pemetaan kerentanan tsunami di beberapa wilayah pesisir Sulawesi menggunakan pendekatan SIG multikriteria. *Jurnal Ilmu Kebencanaan Indonesia*, 7(1), 15–28.
- Badan Informasi Geospasial (BIG). (2019). *Peta Tutupan Lahan Nasional Skala 1:50.000 Tahun 2019*. Cibinong: Badan Informasi Geospasial.

- Badan Informasi Geospasial (BIG). (2023). Informasi Geospasial Dasar Wilayah Sulawesi: Lembar Tilamuta dan Sekitarnya. Cibinong: Pusat Pemetaan Rupabumi dan Toponim, BIG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2014). Peraturan Kepala BNPB Nomor 2 Tahun 2014 tentang Pedoman Penyusunan Peta Risiko Bencana Tsunami. Jakarta: BNPB.
- Bachri, S., Brahmantyo, B., & Djamal, D. (1993). Peta Geologi Lembar Tilamuta, Sulawesi. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Kementerian ESDM.
- Biswas, S., & Sil, A. (2023). Tsunami vulnerability assessment and multi-criteria decision making analysis of eastern coast of India using GIS-based tools. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 27(3), 1270–1287. <https://doi.org/10.1007/s12205-023-1493-y>
- Brahmantyo, B. (2010). Fisiografi dan Geomorfologi Regional Pulau Sulawesi. Bandung: ITB Press.
- Caira, S., & Pearson, G. (1999). Tectonic Evolution of Sulawesi. Dalam Hall, R. & Blundell, D. (Eds.), *Tectonic Evolution of Southeast Asia* (hlm. 79–99). London: Geological Society of London.
- Chen, C., Peng, C., Yan, H., *et al.* (2023). Experimental study on the mitigation effect of mangroves during tsunami wave propagation. *Acta Oceanologica Sinica*, 42, 124–137. <https://doi.org/10.1007/s13131-023-2161-2>
- 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.
- Departemen Kehutanan. (1986). Pedoman Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah. Jakarta: Direktorat Jenderal Reboisasi dan Rehabilitasi Lahan.
- Gersanandi, P., Subardjo, P., & Anugroho, D. S. (2013). Analisa spasial kerentanan bencana tsunami di kabupaten dan kota pesisir Provinsi Sumatera Barat. *Jurnal Oseanografi*, 2(3), 232–237.
- Goda, K., & Song, J. (2019). Influence of elevation data resolution on tsunami loss estimation and insurance rate-making. *Frontiers in Earth Science*, 7, 246. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00246>
- Hall, R. (2009). *Geology of Indonesia*. Royal Holloway University of London.
- Hamilton, W. (1979). *Tectonics of the Indonesian Region*. U.S. Geological Survey Professional Paper 1078. Washington D.C.: United States Government Printing Office.
- Heidarzadeh, M., Muhari, A., & Wijanarto, A. B. (2019). Insights on the source of the 28 September 2018 Sulawesi tsunami, Indonesia based on spectral analyses and numerical simulations. *Pure and Applied Geophysics*, 176(1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2059-9>
- Isdianto, A., Kurniasari, D., Subagiyo, A., Haykal, M. F., & Supriyadi. (2021). Pemetaan kerentanan tsunami untuk mendukung ketahanan wilayah pesisir. *Jurnal Permukiman*, 16(2), 90–100.
- Jumadi, J., Danardono, D., Priyono, K. D., *et al.* (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>
- Muzani, M., Fitriani, R., & Amri, Y. (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>
- Natawidjaja, D. H., Daryono, M. R., Prasetyo, R. A., *et al.* (2021). Nowcasting earthquakes in Sulawesi Island, Indonesia. *Geoscience Letters*, 8, 30. <https://doi.org/10.1186/s40562-021-00197-5>
- Probo Kusumo, A., & Nustari, E. (2016). Zonasi tingkat kerawanan banjir berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) pada DAS Ciduirian, Kabupaten Serang, Provinsi Banten. *Jurnal Geografi Gea*, 16(1), 27–40.
- Sinaga, T. P., Wijayanto, B., & Kuswardani, A. (2014). Integration of spatial analysis for tsunami inundation and impact assessment. *Open Journal of Geology*, 4(7), 326–337. <https://doi.org/10.4236/ojg.2014.47025>