

Pemetaan Tingkat Bahaya dan Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Tsunami di Kota Bengkulu

Fachri Muhammad Rasyid^{1,2*}, Amjad Muhammad³, Hafi Munirwan¹, dan Adnin Musadri Asbi^{1,2}

¹Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia; e-mail: fachri.rasyid@pwk.itera.ac.id

²Pusat Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami, Institut Teknologi Sumatera, Indonesia

³Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

ABSTRAK

Kota Bengkulu merupakan salah satu wilayah pesisir yang terletak pada jalur subduksi Sunda, sehingga memiliki potensi bahaya gempa bumi dan tsunami. Penelitian ini bertujuan memetakan tingkat bahaya tsunami dan zona keterpaparan spasial kawasan permukiman di Kota Bengkulu sebagai informasi dasar untuk mendukung mitigasi bencana berbasis spasial. Metode yang digunakan adalah pendekatan spasial-kuantitatif melalui analisis weighted overlay dengan mempertimbangkan empat parameter biofisik, yaitu ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai. Data utama diperoleh dari DEMNAS, peta garis pantai, jaringan sungai, jaringan jalan, serta data batimetri. Hasil analisis menunjukkan bahwa kawasan pesisir Kota Bengkulu memiliki konsentrasi kelas bahaya hingga sangat bahaya, terutama di sekitar Pantai Panjang, Kecamatan Ratu Agung, dan Kecamatan Ratu Samban. Sebaliknya, kawasan dengan tingkat bahaya relatif lebih rendah teridentifikasi di Kecamatan Sungai Serut dan Kecamatan Selebar. Analisis keterpaparan menunjukkan bahwa 22,22% luas kawasan permukiman berada pada kelas bahaya dan sangat bahaya, yang menunjukkan adanya konsentrasi keterpaparan spasial permukiman pada zona dengan tingkat bahaya relatif tinggi. Temuan tersebut memberikan informasi spasial mengenai lokasi permukiman yang perlu menjadi perhatian dalam pengendalian pemanfaatan ruang dan perencanaan mitigasi. Hasil pemetaan dapat digunakan sebagai informasi dasar untuk mendukung evaluasi tata ruang, penentuan kebutuhan kajian jalur dan fasilitas evakuasi, serta pengembangan strategi mitigasi kawasan pesisir, dengan penentuan intervensi teknis memerlukan analisis lanjutan mengenai aksesibilitas, kesesuaian penggunaan lahan, kapasitas evakuasi, dan kondisi sosial masyarakat.

Kata kunci: Tsunami, Keterpaparan Permukiman, Analisis Spasial, Mitigasi Bencana

ABSTRACT

Bengkulu City is a coastal area located along the Sunda subduction zone and is therefore exposed to significant earthquake and tsunami hazards. This study aims to map tsunami hazard levels and spatial exposure of settlements in Bengkulu City as a basis for spatially informed disaster mitigation strategies. A quantitative spatial approach was employed using overlay analysis based on four key parameters: elevation, slope, distance from the coastline, and distance from rivers. The primary datasets included DEMNAS, coastline data, river networks, road networks, and bathymetric data. The results indicate that most coastal areas of Bengkulu City fall within the high to very high hazard categories, with the highest concentrations occurring around Pantai Panjang, Ratu Agung District, and Ratu Samban District. In contrast, relatively safer settlement areas were identified in Sungai Serut and Selebar Districts, which are characterized by higher elevations and lower exposure to river channels. Overall, 22.22% of the settlement area is located within high and very high tsunami hazard zones, indicating substantial spatial exposure of settlements in coastal areas. These findings highlight the importance of integrating spatial hazard and settlement-exposure information into disaster risk-informed spatial planning. In practical terms, the resulting maps can serve as baseline spatial information to support adaptive spatial planning, the identification of areas requiring further evacuation-route and shelter assessment, and the strengthening of community-based mitigation strategies. Thus, the study contributes to the development of spatially informed tsunami mitigation planning in coastal areas of Indonesia.

Keywords: Tsunami, Settlement Exposure, Spatial Analysis, Disaster Mitigation

Citation: Rasyid, F. M., Muhammad, A., Munirwan, H., dan Asbi, A. M. (2026). Pemetaan Tingkat Bahaya dan Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Tsunami di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 855-869, doi:10.14710/jil.24.4.855-869

1. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan kawasan yang memiliki dinamika lingkungan yang kompleks dan rentan terhadap berbagai bencana alam, baik yang dipicu oleh proses hidrometeorologi maupun geologi. Salah satu bencana geologi yang memiliki potensi menimbulkan kerusakan besar adalah tsunami. Indonesia sebagai negara kepulauan yang berada pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, termasuk dalam kawasan *Pacific Ring of Fire* sehingga memiliki tingkat ancaman gempa bumi dan tsunami yang sangat tinggi. Kajian probabilistik nasional menunjukkan bahwa pantai barat Pulau Sumatera, termasuk Provinsi Bengkulu, merupakan salah satu wilayah dengan probabilitas tinggi mengalami tsunami dengan tinggi gelombang lebih dari 0,5 m hingga lebih dari 3 m pada berbagai periode ulang (*return period*) (Horspool et al., 2014). Kondisi tersebut menempatkan kawasan pesisir Bengkulu sebagai wilayah yang memerlukan perhatian khusus dalam upaya mitigasi bencana berbasis spasial.

Kota Bengkulu merupakan ibu kota Provinsi Bengkulu yang memiliki luas daratan sekitar 151,7 km² dan wilayah laut seluas 387,6 km². Secara geografis, kota ini berbatasan dengan Samudra Hindia di bagian barat, Kabupaten Bengkulu Tengah di bagian utara dan timur, serta Kabupaten Seluma di bagian selatan. Posisi tersebut menyebabkan Kota Bengkulu memiliki garis pantai yang panjang dan berhadapan langsung dengan Samudra Hindia sehingga rentan terhadap abrasi maupun ancaman tsunami. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kota Bengkulu, jumlah penduduk pada tahun 2024 mencapai 397.321 jiwa yang sebagian besar terkonsentrasi pada kawasan perkotaan dan pesisir (Badan Pusat Statistik Kota Bengkulu, 2025). Konsentrasi aktivitas penduduk pada kawasan pantai berpotensi meningkatkan besarnya dampak apabila terjadi tsunami. Selain dipengaruhi oleh aktivitas tektonik, karakteristik biofisik wilayah pesisir, seperti topografi, morfologi pantai, dan pola pemanfaatan ruang, juga menentukan tingkat bahaya suatu kawasan terhadap bencana. Penelitian Asbi et al. (2026) menunjukkan bahwa tingkat bahaya wilayah pesisir terhadap gelombang ekstrem dan abrasi sangat dipengaruhi oleh karakteristik fisik pantai serta perkembangan penggunaan lahan, sehingga pendekatan spasial menjadi instrumen penting dalam mendukung pengelolaan kawasan pesisir yang berkelanjutan.

Kajian mengenai bencana tsunami di Kota Bengkulu juga ditunjukkan oleh berbagai penelitian terdahulu. Santius (2015) menunjukkan bahwa skenario tsunami dengan tinggi gelombang sekitar 20 meter berpotensi menyebabkan sekitar 20% wilayah Kota Bengkulu berada pada kategori risiko tinggi. Selain itu, hasil pemetaan berbasis parameter elevasi, kemiringan lereng, jarak dari garis pantai, jarak dari sungai, dan penggunaan lahan menunjukkan bahwa sebagian besar kawasan pesisir Kota Bengkulu berada

pada tingkat kerawanan sedang hingga tinggi. Kondisi tersebut diperkuat oleh data Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) yang dipublikasikan BNPB melalui InaRISK, yang menempatkan Kota Bengkulu pada kategori risiko tinggi dengan skor 170 dan peringkat ke-168 dari 496 kabupaten/kota di Indonesia, di mana ancaman dominannya adalah gempa bumi dan tsunami (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2024). Catatan sejarah juga menunjukkan bahwa wilayah Bengkulu pernah mengalami gempa bumi besar pada tahun 2000 dan 2007 yang berpotensi memicu tsunami (Strunz et al., 2011). Selain mekanisme subduksi, penelitian Brune et al. (2010) mengungkapkan bahwa longsoran bawah laut (*submarine landslides*) di zona *Sunda Arc* juga berpotensi menjadi sumber pembangkit tsunami sehingga memperbesar kompleksitas ancaman di wilayah ini.

Pada skala internasional, pemetaan bahaya dan risiko tsunami telah berkembang pesat melalui pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG), pemodelan numerik, serta analisis spasial multikriteria. Penelitian di Jepang oleh Suppasri et al. (2013) dan Makau oleh Li et al. (2018), misalnya, menunjukkan bahwa integrasi berbagai parameter biofisik mampu meningkatkan akurasi identifikasi wilayah terdampak tsunami. Di Indonesia, berbagai penelitian juga telah mengembangkan analisis jalur evakuasi, lokasi tempat evakuasi sementara, serta strategi mitigasi berbasis SIG di Aceh, Palu, dan pesisir Pulau Jawa (Løvholt et al., 2014; Ningtyas et al., 2022; Putra & Chernovita, 2020; Yuzal et al., 2017). Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut berfokus pada pemodelan genangan, simulasi evakuasi, atau penilaian risiko yang mengintegrasikan komponen bahaya, kerentanan, dan kapasitas, sedangkan kajian yang secara khusus mengintegrasikan tingkat bahaya biofisik dengan keterpaparan kawasan permukiman pada skala administrasi kota masih relatif terbatas.

Di sisi lain, penelitian mengenai Kota Bengkulu masih didominasi oleh pemetaan kerawanan atau simulasi tsunami pada lokasi tertentu, sementara kajian yang secara khusus mengintegrasikan parameter biofisik utama dengan distribusi spasial kawasan permukiman pada skala administrasi kota masih relatif terbatas. Selain itu, sebagian penelitian terdahulu lebih menekankan aspek risiko tanpa membedakan secara tegas antara komponen bahaya (*hazard*) dan keterpaparan (*exposure*). Padahal, informasi mengenai sebaran bahaya tsunami berbasis indikator biofisik yang dikombinasikan dengan distribusi kawasan permukiman sangat penting sebagai dasar penyusunan kebijakan mitigasi, khususnya dalam mendukung pengendalian pemanfaatan ruang di kawasan pesisir. Kondisi tersebut menunjukkan masih adanya kesenjangan penelitian (*research gap*), yaitu belum tersedianya kajian yang secara komprehensif memetakan tingkat bahaya tsunami berbasis parameter biofisik sekaligus mengintegrasikannya dengan distribusi spasial

kawasan permukiman untuk menghasilkan informasi keterpaparan pada skala Kota Bengkulu.

Kajian mengenai bahaya tsunami pada dasarnya tidak dapat dipisahkan dari karakteristik biofisik wilayah. Penelitian Rasyid et al. (2021) menunjukkan bahwa kemampuan lahan yang dipengaruhi oleh faktor ketinggian, kelerengan, dan kondisi fisik wilayah memiliki hubungan erat dengan tingkat kerentanan terhadap bencana. Prinsip tersebut juga relevan dalam analisis bahaya tsunami karena elevasi, kemiringan lereng, kedekatan terhadap garis pantai, serta kedekatan terhadap aliran sungai merupakan faktor yang memengaruhi kemampuan gelombang tsunami menjalar ke daratan. Di sisi lain, pengelolaan kawasan pesisir juga memerlukan kesesuaian antara karakteristik biofisik dengan arah pemanfaatan ruang. Rasyid (2026) menyatakan bahwa evaluasi kesesuaian penggunaan lahan terhadap rencana tata ruang merupakan instrumen penting untuk mengendalikan perkembangan kawasan sesuai daya dukung lingkungannya. Dengan demikian, informasi tingkat bahaya tsunami dapat menjadi salah satu dasar dalam mendukung pengendalian pemanfaatan ruang pada kawasan pesisir yang memiliki tingkat ancaman tinggi.

Upaya mitigasi tsunami juga perlu diintegrasikan ke dalam kebijakan penataan ruang. Utami (2021) menjelaskan bahwa integrasi informasi bahaya tsunami ke dalam RTRW dan RDTR merupakan instrumen penting dalam mengurangi potensi kerugian akibat bencana. Sejalan dengan itu, Veni (2019) menegaskan bahwa kebijakan penggunaan lahan berbasis tingkat bahaya merupakan salah satu pendekatan yang efektif dalam mengendalikan perkembangan kawasan permukiman di wilayah pesisir rawan tsunami. Selain pendekatan struktural, pengurangan dampak tsunami juga memerlukan penguatan kapasitas masyarakat. Penelitian Rasyid et al. (2026) menunjukkan bahwa pengetahuan lokal (*indigenous knowledge*) masyarakat pesisir mampu meningkatkan kesiapsiagaan dan kapasitas adaptif masyarakat dalam menghadapi ancaman tsunami, hal ini didukung juga dengan penelitian Zalmansyah et al. (2022). Oleh karena itu, informasi spasial mengenai tingkat bahaya dan keterpaparan yang dihasilkan dalam penelitian ini diharapkan dapat menjadi salah satu komponen pendukung dalam penyusunan strategi mitigasi yang mengintegrasikan aspek biofisik, tata ruang, dan kapasitas masyarakat. Sejalan dengan agenda pembangunan berkelanjutan, penguatan ketangguhan wilayah pesisir terhadap bencana juga merupakan bagian dari implementasi Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*), khususnya dalam mewujudkan kota dan permukiman yang tangguh, inklusif, dan berkelanjutan (Mirsal et al., 2026).

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan memetakan tingkat bahaya tsunami di Kota Bengkulu berdasarkan empat indikator biofisik, yaitu elevasi, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai, serta menganalisis keterpaparan spasial

kawasan permukiman berdasarkan luas permukiman pada setiap kelas bahaya. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi analisis bahaya tsunami berbasis empat indikator biofisik dengan distribusi spasial kawasan permukiman pada skala administrasi Kota Bengkulu, sehingga menghasilkan informasi keterpaparan spasial yang lebih operasional untuk mendukung pengendalian pemanfaatan ruang di kawasan pesisir. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi dasar bagi penyusunan strategi mitigasi bencana berbasis tata ruang serta menjadi referensi bagi penelitian lanjutan yang mengintegrasikan aspek bahaya, kerentanan sosial, kapasitas masyarakat, dan pemodelan genangan tsunami secara lebih komprehensif.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan spasial-kuantitatif untuk memetakan tingkat bahaya tsunami dan keterpaparan spasial kawasan permukiman di Kota Bengkulu. Analisis bahaya dilakukan dengan metode tumpang susun (*overlay*) berbobot terhadap empat parameter biofisik, yaitu ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai. Keempat parameter tersebut dipilih karena karakteristik topografi dan kedekatan suatu wilayah terhadap sumber atau jalur penetrasi air laut berpengaruh terhadap potensi tsunami mencapai daratan (Birkmann & Welle, 2015; Li et al., 2018).

Dalam penelitian ini, istilah bahaya (*hazard*) digunakan secara khusus untuk menggambarkan tingkat potensi suatu wilayah terdampak tsunami berdasarkan karakteristik biofisiknya. Penelitian tidak dimaksudkan untuk mengukur kerentanan (*vulnerability*) maupun risiko (*risk*), karena kedua konsep tersebut memerlukan analisis tambahan mengenai kondisi sosial, ekonomi, kapasitas masyarakat, serta probabilitas dan konsekuensi bencana. Selanjutnya, keterpaparan (*exposure*) dalam penelitian ini dibatasi pada keberadaan dan luas kawasan permukiman yang berada pada masing-masing kelas bahaya, sehingga belum merepresentasikan jumlah penduduk, kepadatan bangunan, nilai aset, maupun karakteristik sosial-ekonomi masyarakat.

2.1. Kebutuhan Data

Data yang digunakan dalam penelitian meliputi data batas administrasi Kota Bengkulu, DEMNAS, garis pantai, jaringan sungai, jaringan jalan, batimetri, dan kawasan permukiman. Data spasial diperoleh dari Ina-Geoportal dan sumber data resmi terkait. DEMNAS digunakan sebagai sumber utama untuk menghasilkan informasi ketinggian dan kelerengan, sedangkan data garis pantai dan jaringan sungai digunakan untuk menghasilkan parameter jarak dari garis pantai dan jarak dari sungai. Data kawasan permukiman digunakan pada tahap analisis keterpaparan spasial. Tabel 1 menunjukkan jenis data, sumber data, serta fungsi masing-masing data dalam tahapan analisis penelitian.

Tabel 1. Bahan dan Data

No	Bahan dan Data	Sumber
1	Data SHP Wilayah Kota Bengkulu	Ina-Geoportal
2	Data DEMNAS	Ina-Geoportal
3	Data SHP Garis Pantai	Ina-Geoportal
4	Data SHP Sungai Kota Bengkulu	Ina-Geoportal
5	Data SHP Jalan Kota Bengkulu	Ina-Geoportal
6	Data Batrimetri Nasional	Ina-Geoportal
7	Data SHP Kawasan Permukiman	Ina-Geoportal

Sumber: Peneliti, 2025

Data spasial yang digunakan terlebih dahulu diseragamkan melalui proses pra pengolahan, meliputi penyamaan sistem koordinat, pemotongan (*clip*) berdasarkan batas administrasi Kota Bengkulu, serta penyesuaian resolusi dan format data raster sebelum dilakukan analisis lebih lanjut. Pengolahan data spasial dilakukan menggunakan ArcGIS 10.8. Tahapan pra pengolahan ini dilakukan untuk memastikan setiap parameter memiliki referensi spasial yang konsisten sehingga dapat ditumpangsusunkan dalam proses analisis bahaya.

Parameter dan indikator yang digunakan dalam pemetaan bahaya tsunami disajikan pada Tabel 2. Parameter tersebut terdiri atas ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai.

Tabel 2. Parameter dan Indikator

No	Parameter	Indikator
1	Kemiringan/Kelerengan	a. Kelas Kemiringan lahan b. Sebaran kelas kemiringan lahan
2	Ketinggian	a. Kelas ketinggian lahan b. Sebaran kelas ketinggian lahan
3	Jarak dari garis pantai	a. kelas jarak dari garis pantai b. Sebaran kelas jarak garis pantai
4	Jarak dari sungai	a. Kelas jarak dari sungai b. Sebaran kelas jarak dari sungai

Sumber: Modifikasi dari Faiqoh et al. (2013)

Pemetaan bahaya tsunami dilakukan dengan memberikan skor 1–5 pada setiap kelas parameter. Skor 5 menunjukkan kondisi yang secara relatif lebih mendukung potensi terdampak tsunami, sedangkan skor 1 menunjukkan kondisi yang relatif lebih rendah potensinya. Penentuan skor dan bobot mengacu pada modifikasi metode Faiqoh et al. (2013), dengan mempertimbangkan karakteristik fisik masing-masing parameter terhadap potensi penetrasi tsunami ke wilayah daratan.

Tabel 3 memperlihatkan klasifikasi, skor, dan bobot yang digunakan dalam pemetaan bahaya tsunami.

Pembobotan dilakukan dengan mempertimbangkan pengaruh relatif setiap parameter terhadap potensi bahaya tsunami. Jarak dari garis pantai dan ketinggian diberikan bobot masing-masing 30% karena keduanya memiliki hubungan langsung dengan kemungkinan gelombang tsunami mencapai dan menjalar ke daratan.

Kelerengan diberikan bobot 25% karena karakteristik topografi memengaruhi kemampuan gelombang untuk menjalar ke wilayah daratan, sedangkan jarak dari sungai diberikan bobot 15% karena alur sungai dapat menjadi salah satu jalur penetrasi massa air tsunami ke wilayah daratan. Dengan demikian, jumlah keseluruhan bobot adalah 100%.

Tabel 3. Skor dan Bobot Parameter Bahaya Tsunami

Parameter	Kelas/Indikator	Skor	Bobot (%)
Jarak dari garis pantai (m)	0–500	5	30
	501–1.000	4	
	1.001–1.500	3	
	1.501–3.000	2	
	>3.000	1	
Ketinggian (m)	<10	5	30
	11–25	4	
	26–50	3	
	51–100	2	
	>100	1	
Kelerengan (%)	0–2	5	25
	3–5	4	
	6–15	3	
	16–40	2	
	>40	1	
Jarak dari sungai (m)	0–100	5	15
	101–200	4	
	201–300	3	
	301–500	2	
	>500	1	

Sumber: Modifikasi dari Faiqoh et al. (2013)

2.2. Metode Analisis

Pengolahan parameter ketinggian dan kelerengan dilakukan dengan mengekstraksi data DEMNAS menggunakan perangkat lunak ArcGIS 10.8. Data DEMNAS terlebih dahulu diproses untuk memperoleh informasi ketinggian, kemudian digunakan untuk menghasilkan data kelerengan menggunakan *Spatial Analyst Tools–Surface Analysis–Slope*. Proses reclassify selanjutnya dilakukan untuk mengelompokkan nilai ketinggian dan kelerengan berdasarkan kelas yang telah ditentukan pada Tabel 3.

Parameter jarak dari garis pantai dan jarak dari sungai diperoleh melalui analisis jarak menggunakan data vektor garis pantai dan jaringan sungai. Analisis *Euclidean Distance* digunakan untuk menghasilkan distribusi jarak setiap lokasi terhadap garis pantai dan sungai. Hasil tersebut kemudian direklasifikasi ke dalam lima kelas berdasarkan interval pada Tabel 3. Hasil pengolahan masing-masing parameter menghasilkan empat peta tematik, yaitu peta ketinggian, peta kelerengan, peta jarak dari garis pantai, dan peta jarak dari sungai. Keempat peta tersebut kemudian ditumpangsusunkan menggunakan metode *weighted overlay* untuk memperoleh peta bahaya tsunami.

Untuk mengevaluasi kewajaran hasil pemetaan, dilakukan validasi spasial melalui perbandingan dengan informasi bahaya tsunami yang telah tersedia, khususnya peta atau informasi kebencanaan yang diterbitkan oleh BNPB serta hasil penelitian terdahulu di Kota Bengkulu, termasuk oleh Santius (2015).

Validasi dilakukan dengan membandingkan pola distribusi kelas bahaya yang dihasilkan penelitian ini dengan lokasi yang diidentifikasi sebagai wilayah terdampak atau memiliki potensi bahaya tsunami pada sumber pembanding. Validasi difokuskan pada kesesuaian pola spasial, terutama kecenderungan kelas bahaya dan sangat bahaya berada di wilayah pesisir, serta kesesuaian lokasi dengan hasil kajian terdahulu. Pendekatan ini digunakan sebagai bentuk *cross-validation* berbasis data sekunder karena penelitian ini tidak melakukan simulasi numerik genangan tsunami maupun pengukuran lapangan terhadap tinggi genangan historis.

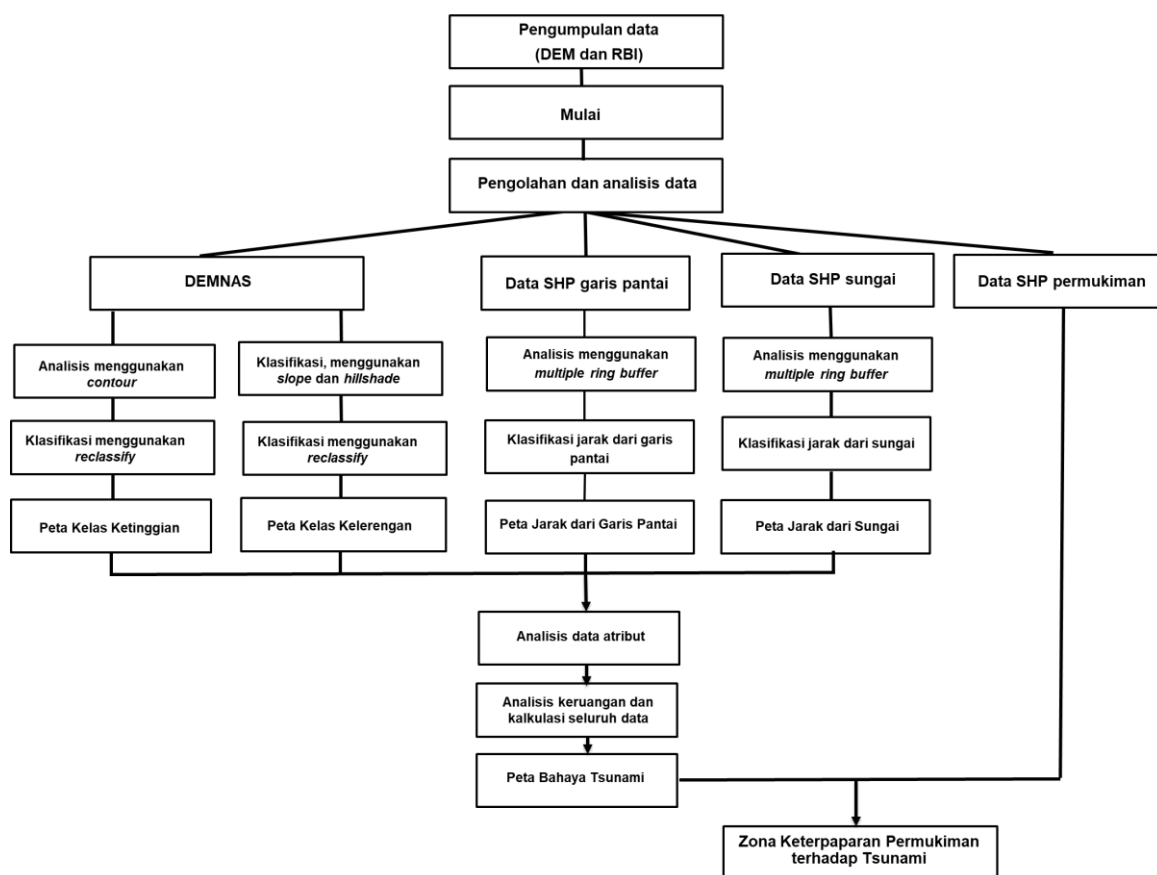
Proses validasi tersebut tidak dimaksudkan sebagai pengukuran akurasi absolut peta bahaya, tetapi sebagai evaluasi konsistensi spasial hasil pemodelan dengan informasi pembanding. Keterbatasan ini menjadi dasar untuk merekomendasikan penelitian lanjutan berupa validasi lapangan dan pemodelan numerik genangan tsunami berdasarkan berbagai skenario sumber gempa dan tinggi gelombang.

Tahap akhir dalam penelitian ini adalah analisis keterpaparan permukiman. Analisis keterpaparan dilakukan dengan menumpang-susunkan peta bahaya tsunami dengan peta kawasan permukiman. Tahapan ini bertujuan mengidentifikasi luas kawasan permukiman yang berada pada setiap kelas bahaya, mulai dari sangat aman hingga sangat bahaya. Dengan

demikian, keterpaparan yang dimaksud dalam penelitian ini merupakan keterpaparan spasial kawasan permukiman, bukan keterpaparan penduduk secara individual. Pendekatan ini sejalan dengan metode yang digunakan dalam penelitian mengenai bencana tsunami di lokasi lainnya (Arrisaldi et al., 2025; Fuad et al., 2025; Strunz et al., 2011).

Luas kawasan permukiman pada masing-masing kelas bahaya dihitung menggunakan fungsi *Calculate Geometry* pada ArcGIS 10.8. Persentase keterpaparan dihitung dengan membandingkan luas permukiman pada setiap kelas bahaya terhadap total luas kawasan permukiman. Pendekatan ini menghasilkan informasi mengenai distribusi spasial kawasan permukiman berdasarkan tingkat bahaya tsunami. Namun, karena tidak memasukkan data jumlah penduduk, kepadatan bangunan, nilai aset, maupun karakteristik sosial-ekonomi, hasil analisis tidak digunakan untuk menyimpulkan tingkat kerentanan sosial atau risiko masyarakat terhadap tsunami. Hasil analisis ini secara khusus merepresentasikan keterpaparan spasial kawasan permukiman terhadap kelas bahaya tsunami. Berikut diagram alir mengenai proses analisis yang dilakukan pada penelitian ini.

Gambar 1 memperlihatkan tahapan penelitian yang dimulai dari pengumpulan dan pra pengolahan data, pembentukan parameter biofisik, proses skoring dan pembobotan, analisis *weighted overlay*, hingga analisis keterpaparan kawasan permukiman.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menghasilkan beberapa informasi spasial yang meliputi peta ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, jarak dari sungai, tingkat bahaya tsunami, kawasan permukiman, serta zona keterpaparan spasial permukiman terhadap bahaya tsunami. Seluruh analisis dilakukan menggunakan ArcGIS 10.8 melalui proses klasifikasi, *buffering*, *overlay*, serta pembobotan terhadap empat parameter biofisik, yaitu ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai. Hasil analisis parameter individual tidak hanya digunakan untuk menggambarkan kondisi biofisik Kota Bengkulu, tetapi juga menjadi dasar untuk memahami kontribusi relatif setiap parameter dalam pembentukan tingkat bahaya tsunami. Dalam pendekatan *weighted overlay*, setiap parameter terlebih dahulu diklasifikasikan ke dalam kelas dan diberikan skor sesuai tingkat kontribusinya terhadap bahaya tsunami. Selanjutnya, masing-masing parameter diberikan bobot berdasarkan tingkat kepentingannya, kemudian diintegrasikan melalui proses *overlay* untuk memperoleh indeks bahaya komposit. Dengan demikian, luas masing-masing kelas parameter tidak secara langsung menunjukkan besarnya kontribusi parameter terhadap hasil akhir, karena kontribusi tersebut juga ditentukan oleh skor dan bobot yang digunakan dalam model.

3.1. Ketinggian

Analisis ini bertujuan untuk mengekstrak data DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) menggunakan *tool create filled contours*, dengan tujuan memperoleh informasi elevasi pada area tertentu berdasarkan interval kontur yang sudah ditentukan. Proses dimulai dengan pengambilan data raster DEMNAS, kemudian dibuat kontur yang dipenuhi (*filled contours*) untuk setiap rentang. Setelah kontur poligonal ini terbentuk, dilakukan klasifikasi area menurut kelas-kelas elevasi berdasarkan interval yang telah ditentukan.

Tabel 4. Kelas Ketinggian

No	Kelas	Luas (ha)	Persentase (%)
1	<10 m	8.858,84	59,87
2	10-25 m	4.537,92	30,67
3	25-50 m	1.303,20	8,81
4	50-100 m	96,93	0,66

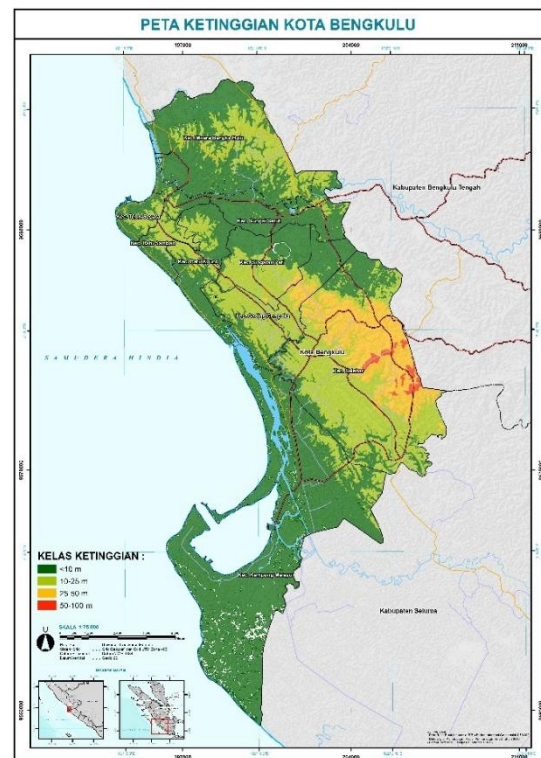
Sumber: Peneliti, 2025

Berdasarkan Tabel 4, sebagian besar wilayah Kota Bengkulu berada pada elevasi rendah. Kelas ketinggian <10 m memiliki luas 8.858,84 ha atau 59,87% dari wilayah penelitian, sedangkan kelas 10–25 m mencakup 4.537,92 ha atau 30,67%. Dengan demikian, sekitar 90% wilayah Kota Bengkulu berada pada elevasi kurang dari 25 m.

Kondisi tersebut menjadi faktor penting dalam analisis bahaya tsunami, karena elevasi merupakan salah satu karakteristik topografi yang memengaruhi kemampuan gelombang tsunami untuk menjangkau daratan. Wilayah dengan elevasi lebih rendah secara

umum memiliki peluang penetrasi genangan yang lebih besar dibandingkan wilayah dengan elevasi lebih tinggi. Dalam penelitian ini, hubungan tersebut direpresentasikan melalui pemberian skor pada parameter ketinggian, di mana kelas elevasi yang lebih rendah memperoleh skor bahaya yang lebih tinggi.

Distribusi spasial kelas ketinggian Kota Bengkulu ditunjukkan pada Gambar 2. Pola pada gambar tersebut memperlihatkan bahwa kawasan dengan elevasi rendah terutama tersebar pada wilayah dataran pesisir dan bagian kota yang relatif dekat dengan garis pantai. Informasi ketinggian ini selanjutnya digunakan sebagai salah satu parameter dalam pembentukan indeks bahaya tsunami.



Gambar 2. Peta Ketinggian Kota Bengkulu

3.2. Kelerengan

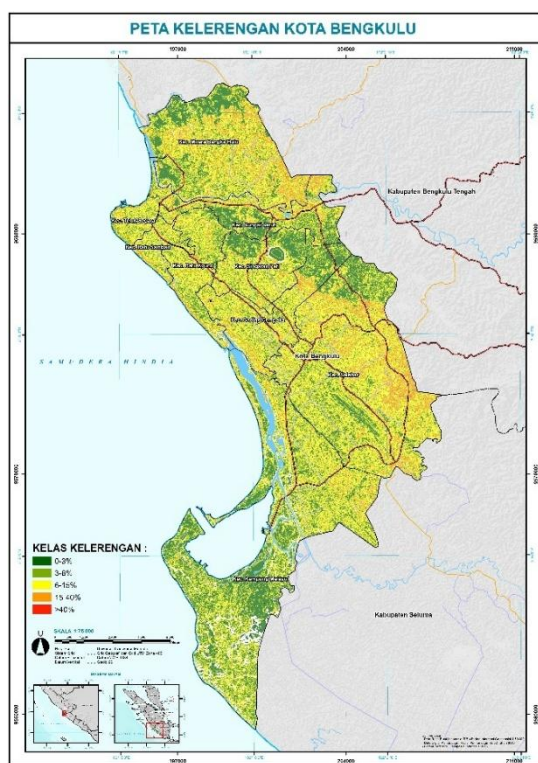
Analisis ini bertujuan untuk mengekstraksi data *Digital Elevation Model Nasional* (DEMNAS) dengan memanfaatkan fungsi *classify* guna menghasilkan informasi spasial mengenai tingkat kelerengan (lereng) pada wilayah penelitian. Proses klasifikasi dilakukan terhadap nilai elevasi dari data DEMNAS untuk mengidentifikasi variasi kemiringan lereng, yang kemudian dipetakan ke dalam bentuk peta kelerengan.

Tabel 5. Kelas Kelerengan

No	Kelas	Luas (ha)	Persentase (%)
1	0-3%	2.927,07	20,25
2	3-6%	2.908,54	20,12
3	6-15%	7.227,63	50,00
4	15-40%	1.378,66	9,54
5	>40%	12,14	0,08

Sumber: Peneliti, 2025

Tabel 5 menunjukkan bahwa kelas kelerengan 6–15% merupakan kelas yang paling dominan, dengan luas 7.227,63 ha atau 50,00% wilayah Kota Bengkulu. Selanjutnya, kelas 0–3% dan 3–6% masing-masing mencakup 20,25% dan 20,12% wilayah. Dalam konteks bahaya tsunami, kelerengan digunakan sebagai indikator karakteristik topografi yang memengaruhi pola penetrasi gelombang dan genangan ke arah daratan. Wilayah dengan permukaan relatif landai cenderung memungkinkan genangan bergerak lebih jauh ke daratan dibandingkan wilayah dengan perubahan elevasi yang lebih cepat. Oleh karena itu, kelas kelerengan yang lebih rendah memperoleh skor bahaya yang lebih tinggi dalam proses *weighted overlay*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kelerengan memiliki kontribusi penting terhadap pembentukan indeks bahaya, meskipun kontribusinya dalam model penelitian ini berada di bawah parameter ketinggian dan jarak dari garis pantai. Distribusi spasial kelas kelerengan Kota Bengkulu dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta Kelerengan Kota Bengkulu

3.3. Jarak dari Garis Pantai

Analisis ini dilakukan dengan memanfaatkan *tool multi ring buffer* untuk menghasilkan peta zonasi jarak terhadap garis pantai berdasarkan interval tertentu. Melalui penggunaan *tool* tersebut, wilayah studi diklasifikasikan ke dalam beberapa kelas jarak yang terukur secara spasial dari garis pantai, seperti zona 0–500 m, 500–1000 m, dan seterusnya. Hasil analisis ini berupa peta kelas jarak yang menggambarkan distribusi spasial wilayah berdasarkan kedekatannya terhadap garis pantai. Informasi ini penting untuk berbagai kepentingan,

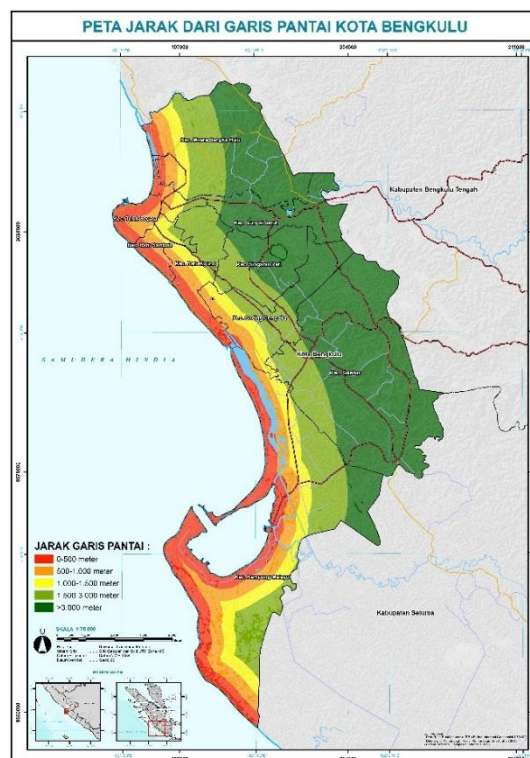
seperti penilaian kerentanan kawasan pesisir, pengelolaan wilayah pantai, serta sebagai dasar dalam perencanaan tata ruang berbasis mitigasi bencana.

Tabel 6. Kelas Jarak dari Garis Pantai

No	Kelas	Luas (ha)	Persentase (%)
1	0-500 m	2.005,86	13,32
2	500-1.000 m	1.586,59	10,54
3	1.000-1.500 m	1.442,25	9,58
4	1.500-3.000 m	3.424,19	22,74
5	>3.000 m	6.597,20	43,82

Sumber: Peneliti, 2025

Berdasarkan Tabel 6, wilayah Kota Bengkulu didominasi oleh kelas jarak >3.000 m dari garis pantai dengan luas 6.597,20 ha atau 43,82%. Sementara itu, wilayah yang berjarak 0–500 m dari garis pantai mencakup 2.005,86 ha atau 13,32%. Jarak dari garis pantai merupakan parameter dengan salah satu bobot terbesar dalam model bahaya tsunami. Hal ini didasarkan pada prinsip bahwa semakin dekat suatu lokasi dengan sumber gelombang di laut, semakin kecil jarak yang harus ditempuh gelombang untuk mencapai daratan. Dalam skema skoring penelitian ini, wilayah yang berada lebih dekat dengan garis pantai memperoleh skor bahaya lebih tinggi, sedangkan wilayah yang semakin jauh memperoleh skor lebih rendah. Meskipun luas wilayah pada kelas 0–500 m relatif lebih kecil dibandingkan kelas >3.000 m, kelas tersebut memiliki kontribusi yang lebih besar terhadap pembentukan zona bahaya karena memperoleh skor bahaya tertinggi. Distribusi spasial kelas jarak dari garis pantai ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Jarak dari Garis Pantai Kota Bengkulu

3.4. Jarak dari Sungai

Analisis ini dilakukan dengan memanfaatkan *tool multi ring buffer* untuk membentuk zona penyangga (*buffer*) secara konsentris dari garis sungai pada interval jarak tertentu, serta menggunakan *tool clip* untuk membatasi hasil *buffer* hanya pada area cakupan wilayah penelitian. Proses ini menghasilkan peta klasifikasi spasial berupa zona-zona jarak dari sungai, seperti 0–100 meter, 100–200 meter, dan seterusnya, yang merepresentasikan tingkat kedekatan wilayah terhadap sungai.

Tabel 7. Kelas Jarak dari Sungai

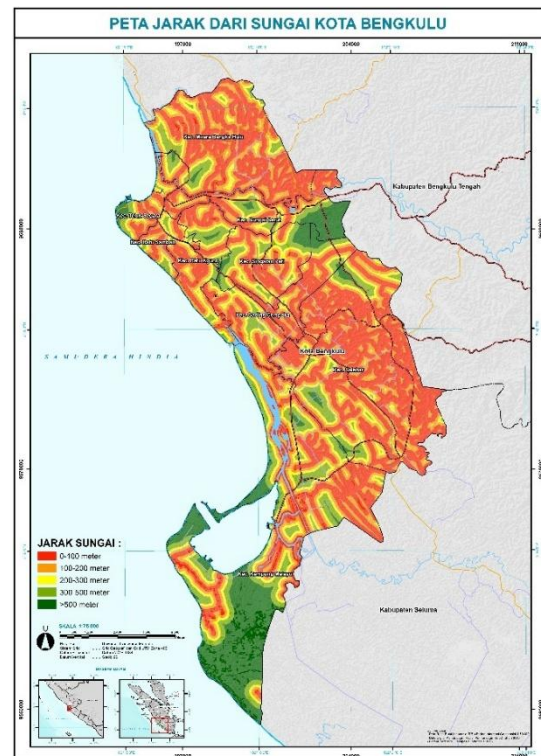
No	Kelas	Luas (ha)	Persentase (%)
1	0-100 m	6.448,31	42,83
2	100-200 m	3.540,99	23,52
3	200-300 m	1.782,54	11,84
4	300-500 m	1.614,49	10,72
5	>500 m	1.669,76	11,09

Sumber: Peneliti, 2025

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 7, kelas jarak 0–100 m merupakan kelas yang paling dominan dengan luas 6.448,31 ha atau 42,83% wilayah Kota Bengkulu. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah yang relatif dekat dengan jaringan sungai tersebar cukup luas di Kota Bengkulu. Dalam penelitian ini, jarak dari sungai digunakan sebagai parameter pendukung dalam identifikasi bahaya tsunami. Kedekatan dengan sungai dapat menjadi jalur yang memungkinkan air laut atau genangan tsunami bergerak lebih jauh ke arah daratan. Oleh karena itu, semakin dekat suatu wilayah dengan sungai, semakin tinggi skor yang diberikan dalam model bahaya. Namun, parameter ini memiliki bobot relatif paling rendah dibandingkan tiga parameter lainnya, yaitu sebesar 15%. Jarak dari sungai berfungsi sebagai faktor tambahan dalam membedakan tingkat bahaya, bukan sebagai satu-satunya penentu zonasi. Distribusi spasial kelas jarak dari sungai dapat dilihat pada Gambar 5.

3.5. Tingkat Bahaya Tsunami

Tingkat bahaya tsunami dalam penelitian ini diperoleh melalui integrasi empat parameter biofisik, yaitu ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai. Keempat parameter tersebut diolah menggunakan pendekatan skoring dan *weighted overlay* pada ArcGIS 10.8. Setiap parameter diklasifikasikan ke dalam lima kelas dan diberikan skor 1–5. Skor 5 menunjukkan kondisi biofisik yang relatif lebih mendukung terbentuknya bahaya tsunami, sedangkan skor 1 menunjukkan kondisi yang relatif lebih aman. Bobot masing-masing parameter adalah 30% untuk jarak dari garis pantai, 30% untuk ketinggian, 25% untuk kelerengan, dan 15% untuk jarak dari sungai. Skema tersebut merupakan modifikasi dari Faiqoh et al. (2013).



Gambar 5. Peta Jarak dari Sungai Kota Bengkulu

Hasil *weighted overlay* menghasilkan lima kelas indeks bahaya relatif, yaitu sangat aman, aman, cukup aman, bahaya, dan sangat bahaya. Klasifikasi tersebut merupakan hasil pengelompokan nilai indeks bahaya dari kombinasi empat parameter biofisik. Dengan demikian, istilah kelas tersebut menggambarkan tingkat bahaya relatif berdasarkan kondisi biofisik, bukan probabilitas terjadinya tsunami, tinggi gelombang, kedalaman genangan, maupun estimasi waktu kedatangan tsunami.

Tabel 8. Kelas Bahaya Tsunami

No	Kelas Bahaya	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Aman	2.881,69	20,16
2	Aman	4.096,71	28,67
3	Cukup Aman	3.552,77	24,86
4	Bahaya	2.274,97	15,92
5	Sangat Bahaya	1.484,49	10,39

Sumber: Peneliti, 2025

Tabel 8 menunjukkan bahwa kelas aman memiliki luas terbesar, yaitu 4.096,71 ha atau 28,67% dari wilayah Kota Bengkulu. Selanjutnya, kelas cukup aman mencakup 3.552,77 ha atau 24,86%, sedangkan kelas sangat aman mencakup 2.881,69 ha atau 20,16%. Di sisi lain, kelas bahaya mencapai 2.274,97 ha atau 15,92%, sementara kelas sangat bahaya mencakup 1.484,49 ha atau 10,39%.

Secara spasial, zona bahaya dan sangat bahaya terutama terkonsentrasi pada kawasan pesisir Barat Kota Bengkulu. Pola tersebut menunjukkan konsistensi dengan karakteristik parameter pembentuk indeks bahaya, terutama kombinasi elevasi rendah dan kedekatan dengan garis pantai. Kawasan dengan kondisi tersebut memperoleh skor

relatif tinggi pada parameter utama sehingga menghasilkan nilai indeks bahaya yang lebih besar.

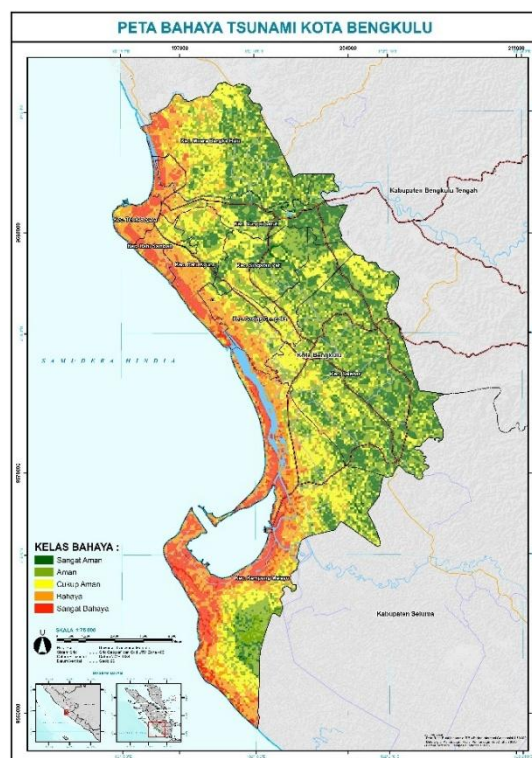
Kawasan Pantai Panjang merupakan salah satu area yang berada pada konsentrasi bahaya relatif tinggi. Kondisi tersebut berkaitan dengan karakteristik kawasan yang berada dekat dengan garis pantai dan memiliki elevasi relatif rendah. Sebaliknya, wilayah yang lebih jauh dari garis pantai dan memiliki elevasi relatif lebih tinggi cenderung memperoleh kelas bahaya yang lebih rendah.

Pada tingkat kecamatan, zona bahaya dan sangat bahaya terutama terdapat pada kecamatan yang berbatasan langsung dengan pesisir Barat, antara lain Ratu Agung, Ratu Samban, Teluk Segara, Kampung Melayu, dan Muara Bangka Hulu. Sebaliknya, Kecamatan Sungai Serut dan Selebar memiliki area yang relatif lebih luas pada kelas sangat aman. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa variasi spasial tingkat bahaya berkaitan dengan kombinasi karakteristik topografi dan posisi wilayah terhadap garis pantai serta jaringan sungai.

Kecamatan Ratu Agung dan Ratu Samban teridentifikasi memiliki wilayah pesisir yang luas sehingga masuk dalam kategori bahaya hingga sangat bahaya. Kecamatan Teluk Segara juga memiliki proporsi signifikan dalam kategori bahaya, terutama di kawasan permukiman pesisir yang berdekatan dengan garis pantai. Hasil pemetaan juga menunjukkan bahwa kawasan pesisir Kota Bengkulu, terutama ketiga kecamatan tersebut, masuk dalam kategori bahaya hingga sangat bahaya. Hal ini konsisten dengan teori kemampuan lahan yang menegaskan bahwa wilayah dengan elevasi rendah, kelereng landai, dan keterhubungan dengan aliran sungai memiliki tingkat kerentanan yang lebih tinggi terhadap bencana (Rasyid et al., 2021). Kecamatan Kampung Melayu menampilkan karakteristik serupa, dengan sebagian besar wilayah pesisirnya termasuk dalam kelas bahaya hingga sangat bahaya. Kecamatan Muara Bangka Hulu juga rentan karena kedekatannya dengan aliran sungai besar dan garis pantai, yang memperkuat potensi dampak gelombang. Sebaliknya, Kecamatan Sungai Serut dan Selebar relatif lebih aman karena berada pada elevasi lebih tinggi, topografi bergelombang, serta jarak yang lebih jauh dari garis pantai. Kedua kecamatan ini mendominasi kategori sangat aman, sehingga berperan penting sebagai zona perlindungan alami dari potensi dampak tsunami.

Konsentrasi zona bahaya dan sangat bahaya berlokasi di sepanjang pesisir Barat Kota Bengkulu, sedangkan bagian Timur cenderung lebih aman. Kondisi ini mempertegas perlunya strategi mitigasi berbasis kewilayahan yang menempatkan kecamatan pesisir sebagai prioritas utama dalam perencanaan evakuasi dan penyediaan infrastruktur tangguh bencana. Secara spasial, distribusi tingkat bahaya tsunami di Kota Bengkulu dapat dilihat pada Gambar

6, yang memperlihatkan zona bahaya paling signifikan pada kawasan pesisir dibandingkan dengan bagian daratan yang lebih ke pedalaman.

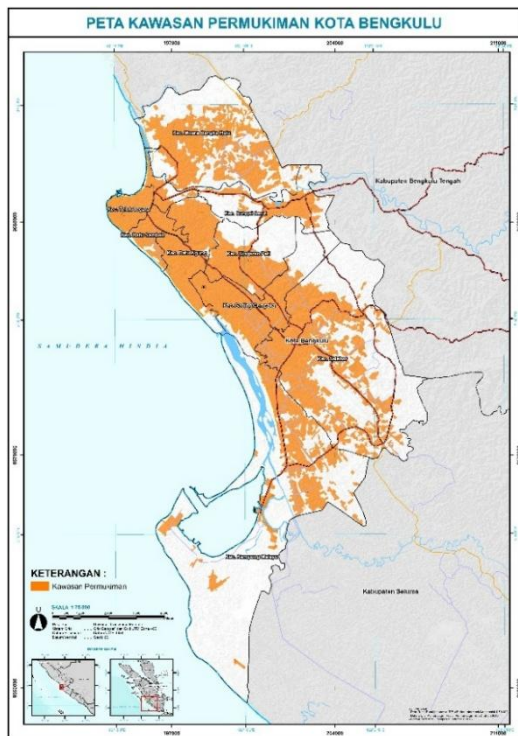


Gambar 6. Peta Bahaya Tsunami Kota Bengkulu

3.6. Kawasan Permukiman

Kawasan permukiman di Kota Bengkulu tercatat memiliki luas sebesar 6.739,81 ha, yang tersebar di seluruh kecamatan dengan konsentrasi terbesar pada kawasan pesisir dan pusat kota. Pola distribusi permukiman menunjukkan kecenderungan linier mengikuti garis pantai serta jaringan transportasi utama, mencerminkan dinamika perkembangan kota yang berorientasi pada aktivitas pesisir dan pusat ekonomi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa sebagian besar penduduk Kota Bengkulu tinggal di kawasan dengan tingkat keterpaparan yang relatif tinggi terhadap bahaya tsunami, terutama di wilayah pesisir Barat yang berdekatan langsung dengan garis pantai.

Sebaliknya, permukiman yang berlokasi di bagian Timur kota umumnya lebih terlindungi karena berada pada elevasi yang lebih tinggi dan jauh dari garis pantai. Visualisasi spasial kawasan permukiman ditampilkan pada peta berikut, yang memberikan gambaran menyeluruh mengenai sebaran dan luasan permukiman serta relevansinya dalam konteks analisis kerentanan bencana. Gambar 7 menunjukkan distribusi spasial kawasan permukiman Kota Bengkulu. Informasi ini selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk melakukan *overlay* antara kawasan permukiman dan peta bahaya tsunami.



Gambar 7. Peta Kawasan Permukiman Kota Bengkulu

Dalam penelitian ini, kawasan permukiman tidak digunakan untuk menghitung jumlah penduduk yang terpapar. Luas permukiman hanya digunakan untuk mengukur keterpaparan spasial kawasan permukiman, yaitu luasan permukiman yang berada di dalam setiap kelas bahaya. Dengan demikian, hasil pada bagian berikutnya tidak dapat ditafsirkan sebagai jumlah penduduk, jumlah bangunan, nilai aset, ataupun tingkat kerentanan sosial yang terpapar.

3.7. Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Bahaya Tsunami

Analisis keterpaparan dilakukan melalui *overlay* antara peta bahaya tsunami dan peta kawasan permukiman. Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui luas kawasan permukiman yang berada pada masing-masing kelas bahaya tsunami. Dengan pendekatan tersebut, keterpaparan yang dimaksud dalam penelitian ini adalah keterpaparan spasial kawasan permukiman, bukan keterpaparan aktual penduduk atau aset. Analisis ini tidak memasukkan jumlah penduduk, kepadatan penduduk, jumlah bangunan, nilai aset, karakteristik sosial-ekonomi, maupun kapasitas masyarakat. Oleh karena itu, hasil analisis tidak digunakan untuk menyimpulkan jumlah masyarakat yang berpotensi terdampak ataupun tingkat risiko tsunami.

Tabel 9. Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Bahaya Tsunami

No	Kelas Bahaya	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Sangat Aman	1.303,06	19,33
2	Aman	2.053,92	30,47
3	Cukup Aman	1.885,53	27,98
4	Bahaya	1.083,58	16,08
5	Sangat Bahaya	413,72	6,14

Sumber: Peneliti, 2025

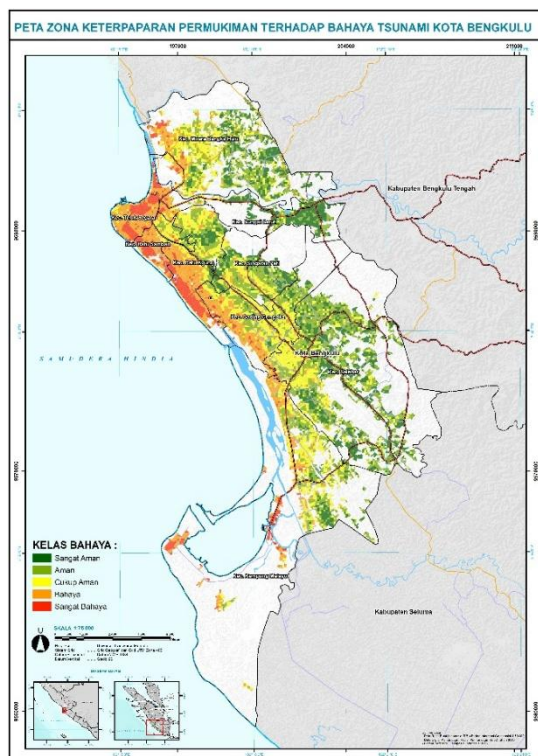
Berdasarkan Tabel 9, kawasan permukiman paling luas berada pada kelas aman, yaitu 2.053,92 ha atau 30,47% dari total kawasan permukiman. Kelas cukup aman mencakup 1.885,53 ha atau 27,98%, sedangkan kelas sangat aman mencapai 1.303,06 ha atau 19,33%. Meskipun demikian, masih terdapat sebagian besar permukiman yang teridentifikasi berada pada kategori bahaya dan sangat bahaya, khususnya di wilayah pesisir Barat yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia.

Pada sisi lain, kawasan permukiman yang berada pada kelas bahaya mencapai 1.083,58 ha atau 16,08%, sedangkan kelas sangat bahaya mencapai 413,72 ha atau 6,14%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa terdapat bagian kawasan permukiman yang secara spasial berada pada kelas bahaya tinggi berdasarkan kombinasi parameter biofisik yang digunakan.

Situasi tersebut menyebabkan bahaya yang besar bagi komunitas pesisir, khususnya di daerah dengan konsentrasi penduduk yang padat. Temuan ini sejalan dengan penelitian pada kota-kota lain di Indonesia, yang menekankan pentingnya integrasi peta bahaya dalam perencanaan tata ruang kota untuk mitigasi risiko bencana (Buchori et al., 2018; Handayani et al., 2020; Sagala et al., 2021; Suppasri et al., 2013). Hal ini menegaskan konsistensi bahwa faktor biofisik seperti ketinggian, kelerengan, dan jarak dari garis pantai berkontribusi signifikan terhadap tingkat keterpaparan.

Permukiman di zona bahaya dan sangat bahaya umumnya terkonsentrasi pada kecamatan pesisir seperti Ratu Agung, Ratu Samban, Teluk Segara, dan Kampung Melayu, yang ditandai oleh kedekatan langsung dengan garis pantai. Kondisi ini mengindikasikan bahwa strategi mitigasi struktural maupun non-struktural yang terintegrasi dalam perencanaan tata ruang dibutuhkan, terutama pada kecamatan yang masuk dalam zona tersebut. Sebaliknya, kawasan dengan kategori sangat aman umumnya berada di bagian Timur kota, seperti Kecamatan Selebar dan Sungai Serut, yang memiliki elevasi lebih tinggi, kelerengan lebih curam, serta relatif jauh dari garis pantai dan aliran sungai.

Secara spasial, distribusi keterpaparan permukiman terhadap bahaya tsunami di Kota Bengkulu dapat dilihat pada Gambar 8, yang memperlihatkan adanya kontras yang jelas antara kawasan pesisir dengan tingkat keterpaparan tinggi dan kawasan pedalaman dengan tingkat keterpaparan rendah.



Gambar 8. Peta Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Bahaya Tsunami Kota Bengkulu

Perhitungan zonasi keterpaparan kawasan permukiman terhadap bahaya tsunami pada masing-masing kecamatan yang termasuk dalam wilayah terdampak disajikan dalam Tabel 10. Tabel tersebut menampilkan distribusi luasan permukiman yang berada dalam setiap kelas tingkat bahaya tsunami, yang meliputi kategori sangat aman, aman, cukup aman, bahaya, dan sangat bahaya, di seluruh kecamatan di wilayah studi. Hal ini bertujuan untuk memperjelas sebaran spasial keterpaparan permukiman terhadap potensi bencana tsunami, serta menjadi dasar bagi pengambilan keputusan dalam perencanaan mitigasi risiko dan penataan ruang di tingkat lokal.

Berdasarkan Tabel 10, terdapat pola spasial yang cukup jelas antara kecamatan yang didominasi kawasan permukiman pada kelas aman hingga sangat aman dan kecamatan yang memiliki proporsi permukiman lebih besar pada kelas bahaya hingga sangat bahaya. Kecamatan Selebar memiliki luasan permukiman pada kelas sangat aman dan aman yang relatif besar, masing-masing sebesar 544,81 ha (30,94%) dan 761,13 ha (43,23%). Pola yang relatif serupa ditemukan di Sungai Serut, dengan 209,75 ha (48,08%) permukiman berada pada kelas sangat aman dan 91,02 ha (20,86%) pada kelas aman. Singaran Pati juga menunjukkan dominasi kelas aman sebesar 198,32 ha (39,69%), sedangkan Muara Bangka Hulu memiliki 248,59 ha (22,08%) pada kelas sangat aman dan 371,30 ha (32,99%) pada kelas aman.

Tabel 10. Keterpaparan Spasial Kawasan Permukiman terhadap Bahaya Tsunami Menurut Kecamatan di Kota Bengkulu

No	Kecamatan	Kelas Bahaya	Luas (ha)	Persentase (%)
1	Gading Cempaka	Sangat Aman	37,21	4,68
		Aman	208,00	26,16
		Cukup Aman	315,53	39,69
		Bahaya	208,27	26,20
		Sangat Bahaya	26,01	3,27
2	Kampung Melayu	Sangat Aman	74,35	7,95
		Aman	251,75	26,90
		Cukup Aman	340,13	36,35
		Bahaya	202,72	21,67
		Sangat Bahaya	66,75	7,13
3	Muara Bangka Hulu	Sangat Aman	248,59	22,08
		Aman	371,30	32,99
		Cukup Aman	356,12	31,64
		Bahaya	118,02	10,48
		Sangat Bahaya	31,61	2,81
4	Ratu Agung	Sangat Aman	64,13	9,28
		Aman	141,12	20,42
		Cukup Aman	170,73	24,70
		Bahaya	204,62	29,61
		Sangat Bahaya	110,54	15,99
5	Ratu Samban	Sangat Aman	2,72	1,08
		Aman	31,20	12,39
		Cukup Aman	65,97	26,19
		Bahaya	94,76	37,62
		Sangat Bahaya	57,27	22,73
6	Selebar	Sangat Aman	544,81	30,94
		Aman	761,13	43,23
		Cukup Aman	420,34	23,87
		Bahaya	31,60	1,80
		Sangat Bahaya	2,76	0,16
7	Singaran Pati	Sangat Aman	121,49	24,31
		Aman	198,32	39,69
		Cukup Aman	158,56	31,73
		Bahaya	21,36	4,27
		Sangat Bahaya	-	-
8	Sungai Serut	Sangat Aman	209,75	48,08
		Aman	91,02	20,86
		Cukup Aman	43,12	9,88
		Bahaya	66,27	15,19
		Sangat Bahaya	26,13	5,99
9	Teluk Segara	Sangat Aman	-	-
		Aman	0,09	0,04
		Cukup Aman	15,03	6,17
		Bahaya	135,95	55,78
		Sangat Bahaya	92,66	38,02

Sumber: Peneliti, 2025

Sebaliknya, beberapa kecamatan menunjukkan konsentrasi kawasan permukiman yang lebih besar pada kelas bahaya dan sangat bahaya. Teluk Segara merupakan kecamatan dengan proporsi terbesar pada kelas bahaya, yaitu 135,95 ha (55,78%), dan kelas sangat bahaya sebesar 92,66 ha (38,02%). Dengan demikian, berdasarkan luas relatif kawasan permukiman terhadap kelas bahaya, sebagian besar permukiman di Teluk Segara berada pada kelas bahaya hingga sangat bahaya. Kondisi serupa juga terlihat di Ratu Samban, dengan 94,76 ha (37,62%) berada pada kelas bahaya dan 57,27 ha (22,73%) pada kelas sangat bahaya. Ratu Agung juga menunjukkan proporsi permukiman yang cukup besar pada kelas bahaya dan sangat bahaya, masing-masing 204,62 ha (29,61%) dan 110,54 ha (15,99%).

Kecamatan Gading Cempaka dan Kampung Melayu memperlihatkan pola yang lebih beragam. Di Gading

Cempaka, kelas cukup aman merupakan kelas dominan dengan luas 315,53 ha (39,69%), tetapi kelas bahaya juga memiliki luasan yang relatif besar, yaitu 208,27 ha (26,20%). Sementara itu, Kampung Melayu didominasi kelas cukup aman sebesar 340,13 ha (36,35%), diikuti kelas aman sebesar 251,75 ha (26,90%) dan kelas bahaya sebesar 202,72 ha (21,67%). Pola tersebut menunjukkan bahwa keterpaparan spasial permukiman di kedua kecamatan tidak terkonsentrasi pada satu kelas bahaya, melainkan tersebar pada beberapa kelas.

Secara spasial, perbedaan antar kecamatan tersebut berkaitan dengan posisi permukiman terhadap zona hasil pemodelan bahaya tsunami. Kecamatan yang memiliki bagian wilayah lebih jauh dari garis pantai dan memiliki karakteristik topografi yang relatif lebih mendukung cenderung memiliki proporsi permukiman pada kelas sangat aman dan aman yang lebih besar. Sebaliknya, kecamatan yang berada pada kawasan pesisir Barat dan memiliki permukiman yang berdekatan dengan garis pantai cenderung memiliki proporsi permukiman pada kelas bahaya dan sangat bahaya yang lebih besar. Pola ini memperkuat hasil pemetaan bahaya sebelumnya bahwa kedekatan dengan garis pantai, kondisi elevasi, kelerengan, dan kedekatan dengan sungai berkontribusi dalam membentuk distribusi spasial kelas bahaya.

Temuan tersebut juga menunjukkan bahwa luasan kawasan permukiman pada kelas bahaya merupakan indikator keterpaparan spasial, tetapi belum dapat digunakan untuk menyatakan besarnya jumlah penduduk yang terdampak. Suatu kecamatan dengan luasan permukiman pada kelas bahaya yang besar belum tentu memiliki jumlah penduduk terdampak yang lebih besar apabila kepadatan penduduk dan karakteristik bangunannya berbeda. Oleh karena itu, hasil penelitian ini perlu dipahami sebagai identifikasi paparan spasial kawasan permukiman terhadap bahaya tsunami, sedangkan estimasi jumlah penduduk, kepadatan bangunan, nilai aset, dan kerentanan sosial memerlukan analisis lanjutan.

Hasil pada Tabel 9 dan Tabel 10 memberikan informasi yang lebih terukur mengenai lokasi dan luasan kawasan permukiman yang berada pada setiap kelas bahaya. Informasi tersebut dapat menjadi informasi dasar untuk menentukan wilayah prioritas dalam kajian lanjutan, termasuk analisis kepadatan penduduk, aksesibilitas evakuasi, kapasitas kawasan, kesesuaian penggunaan lahan, serta integrasi dengan RTRW dan RDTR. Namun, penelitian ini tidak secara langsung menentukan lokasi jalur evakuasi, *shelter*, atau *buffer zone*, karena penentuan tersebut memerlukan analisis spasial tambahan.

3.8. Implikasi terhadap Perencanaan Tata Ruang

Hasil penelitian memberikan informasi dasar mengenai distribusi bahaya tsunami dan keterpaparan spasial kawasan permukiman di Kota Bengkulu. Dari perspektif perencanaan wilayah dan kota, informasi tersebut dapat digunakan untuk

mengidentifikasi kawasan yang memerlukan perhatian lebih lanjut dalam pengendalian pemanfaatan ruang dan penyusunan strategi mitigasi. Namun, implikasi yang dihasilkan penelitian ini perlu ditempatkan sebagai arahan awal, bukan sebagai rekomendasi lokasi yang telah teruji kelayakannya secara spasial.

Konsentrasi zona bahaya dan sangat bahaya pada kawasan pesisir, terutama yang beririsan dengan permukiman, menunjukkan perlunya mempertimbangkan informasi bahaya tsunami dalam proses penyusunan maupun evaluasi RTRW dan RDTR. Informasi tersebut dapat menjadi salah satu masukan dalam proses pengendalian pemanfaatan ruang, terutama pada kawasan yang memiliki konsentrasi permukiman tinggi dan berada pada kelas bahaya yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan Rasyid (2026) yang menunjukkan pentingnya hubungan antara kesesuaian penggunaan lahan dan kepatuhan terhadap rencana tata ruang dalam mengarahkan perkembangan ruang secara lebih terstruktur.

Namun demikian, hasil penelitian ini belum cukup untuk secara langsung menetapkan zonasi tata ruang, menentukan jalur evakuasi, menetapkan lokasi *shelter vertikal*, atau menetapkan *buffer zone*. Penentuan lokasi dan bentuk intervensi tersebut membutuhkan analisis tambahan berupa kesesuaian penggunaan lahan, aksesibilitas jaringan jalan, kapasitas infrastruktur, kepadatan penduduk, waktu tempuh evakuasi, ketersediaan lahan, serta kesesuaian dengan RTRW/RDTR. Oleh karena itu, hasil penelitian lebih tepat diposisikan sebagai informasi dasar untuk menentukan lokasi prioritas yang selanjutnya perlu dianalisis lebih lanjut.

Pendekatan tersebut sejalan dengan Purwanto et al. (2017), yang menunjukkan bahwa perencanaan wilayah pesisir berbasis mitigasi memerlukan kombinasi pendekatan struktural dan nonstruktural. Dalam konteks Kota Bengkulu, hasil pemetaan bahaya dapat digunakan sebagai salah satu dasar untuk mengidentifikasi kawasan yang memerlukan kajian lebih lanjut mengenai infrastruktur evakuasi, pengendalian pemanfaatan lahan, dan peningkatan kesiapsiagaan masyarakat.

Urbanus et al. (2021) juga menekankan pentingnya integrasi antara pendekatan struktural dan nonstruktural dalam membangun ketahanan kawasan pesisir. Dengan demikian, hasil pemetaan bahaya dalam penelitian ini tidak hanya relevan untuk pengendalian pemanfaatan ruang, tetapi juga dapat menjadi informasi awal untuk mengarahkan kajian lanjutan mengenai sistem evakuasi, kesiapsiagaan masyarakat, dan penguatan infrastruktur pada kawasan dengan tingkat bahaya tinggi.

Selain aspek fisik, strategi mitigasi juga perlu mempertimbangkan dimensi sosial dan pengetahuan masyarakat. Penelitian oleh Rasyid et al. (2026) menunjukkan bahwa pengetahuan lokal dapat menjadi bagian penting dalam strategi mitigasi tsunami di kawasan pesisir Lampung Selatan.

Sementara itu, Zalmansyah et al. (2022) menegaskan pentingnya praktik dan pengetahuan lokal sebagai bagian dari mekanisme adaptasi masyarakat. Dalam konteks Kota Bengkulu, informasi bahaya yang dihasilkan penelitian ini dapat dipadukan dengan pengetahuan lokal masyarakat untuk mengidentifikasi pengalaman historis terhadap bencana, pola penyelamatan yang telah berkembang, serta bentuk kesiapsiagaan berbasis komunitas.

Dengan demikian, implikasi utama penelitian ini adalah menyediakan basis informasi spasial yang dapat mendukung tahapan perencanaan berikutnya. Integrasi hasil pemetaan bahaya dengan data kependudukan, jaringan jalan, fasilitas publik, penggunaan lahan, RTRW/RDTR, dan informasi kapasitas masyarakat diperlukan untuk menghasilkan rekomendasi yang lebih operasional. Pendekatan bertahap tersebut memungkinkan hasil penelitian digunakan secara lebih hati-hati dalam proses perencanaan tanpa mengklaim bahwa penelitian ini telah menentukan intervensi tata ruang atau evakuasi yang optimal.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memetakan tingkat bahaya tsunami dan keterpaparan spasial kawasan permukiman di Kota Bengkulu melalui integrasi empat parameter biofisik, yaitu ketinggian, kelerengan, jarak dari garis pantai, dan jarak dari sungai. Hasil analisis menunjukkan bahwa zona bahaya hingga sangat bahaya terutama terkonsentrasi pada kawasan pesisir Barat Kota Bengkulu. Kecamatan Ratu Agung dan Ratu Samban merupakan wilayah yang memiliki proporsi permukiman pada kelas bahaya relatif tinggi, sedangkan Kecamatan Selebar dan Sungai Serut didominasi oleh permukiman pada kelas sangat aman dan aman. Pola tersebut menunjukkan bahwa karakteristik biofisik wilayah, khususnya elevasi, kelerengan, serta kedekatan dengan garis pantai dan sungai, berperan dalam membentuk distribusi spasial tingkat bahaya tsunami.

Berdasarkan hasil *overlay* antara peta bahaya tsunami dan kawasan permukiman, luas permukiman yang berada pada kelas bahaya mencapai 1.083,58 ha (16,08%), sedangkan kelas sangat bahaya mencapai 413,72 ha (6,14%). Dengan demikian, secara keseluruhan terdapat 1.497,30 ha atau 22,22% kawasan permukiman yang berada pada kelas bahaya dan sangat bahaya. Nilai tersebut menggambarkan keterpaparan spasial kawasan permukiman terhadap zona bahaya tsunami, bukan tingkat risiko atau kerentanan penduduk. Penilaian terhadap risiko aktual masih memerlukan analisis lebih lanjut yang mempertimbangkan distribusi penduduk, kepadatan bangunan, kerentanan sosial-ekonomi, serta kapasitas masyarakat dan wilayah.

Secara akademis, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memperkuat pemetaan bahaya tsunami berbasis parameter biofisik pada skala administrasi kota serta memperlihatkan distribusi

spasial kawasan permukiman yang berada pada setiap kelas bahaya. Hasil penelitian juga telah diperbandingkan dengan kajian terdahulu dan sumber informasi kebencanaan sebagai bagian dari evaluasi terhadap konsistensi pola spasial bahaya yang dihasilkan. Secara praktis, peta bahaya dan informasi keterpaparan spasial permukiman dapat digunakan sebagai informasi dasar dalam mendukung pengendalian pemanfaatan ruang dan penyusunan strategi mitigasi tsunami. Namun, penentuan lokasi jalur evakuasi, titik kumpul, *shelter* vertikal, maupun *buffer zone* memerlukan analisis lanjutan mengenai aksesibilitas, jaringan jalan, kesesuaian penggunaan lahan, kapasitas evakuasi, serta keterpaduannya dengan RTRW dan RDTR.

Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan hasil kajian ini melalui integrasi aspek kerentanan sosial, kepadatan dan distribusi penduduk, karakteristik bangunan, kapasitas masyarakat, serta pemodelan genangan tsunami sehingga dapat menghasilkan penilaian risiko tsunami yang lebih komprehensif. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi salah satu dasar spasial untuk pengembangan kajian risiko dan perencanaan wilayah pesisir Kota Bengkulu yang lebih adaptif terhadap ancaman tsunami.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Institut Teknologi Sumatera (ITERA), khususnya Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, atas dukungan akademik dan kelembagaan selama pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan dan ucapan terima kasih secara khusus disampaikan kepada Pusat Mitigasi Bencana Gempa dan Tsunami (PMBGT), Institut Teknologi Sumatera, atas dukungan akademik, teknis, serta wawasan dan masukan yang diberikan dalam mendukung pelaksanaan penelitian ini. Penghargaan juga disampaikan kepada Pemerintah Kota Bengkulu, Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kota Bengkulu, serta seluruh instansi terkait atas dukungan dalam penyediaan data, informasi, dan masukan yang mendukung proses analisis. Ucapan terima kasih turut disampaikan kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan teknis dan akademik sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Arrisaldi, T., Bima, M. A. A., Nurapita, K. K. R., & Pratiknyo, P. (2025). Tsunami Inundation Modeling and Hazard Mapping Using GIS in Sawarna Beach, Banten Province. *Dinamika Teknik Sipil: Majalah Ilmiah Teknik Sipil*, 18(1), 11–19. <https://doi.org/10.23917/dts.v18i1.10617>
- Asbi, A. M., Rahman, Y., Rasyid, F. M., & Siregar, D. I. (2026). Assessing Coastal Vulnerability to Extreme Waves and Abrasion in Bandar Lampung City: Implications for Spatial Pattern and Infrastructure Adaptation. *Jurnal Geografi Lingkungan Tropik (Journal of Geography of Tropical Environments)*, 10(1), Article 1. <https://doi.org/10.7454/jglitrop.v10i1.208>
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2024). *Buku Indeks Risiko Bencana Indonesia (IRBI) 2024*. BNPB.

- Badan Pusat Statistik Kota Bengkulu. (2025). *Kota Bengkulu dalam Angka Tahun 2025*. BPS Kota Bengkulu.
- Birkmann, J., & Welle, T. (2015). Assessing the risk of loss and damage: exposure, vulnerability and risk to climate-related hazards for different country classifications. *International Journal of Global Warming*, 8(2), 191–212. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2015.071963>
- Brune, S., Babeyko, A. Y., Ladage, S., & Sobolev, S. V. (2010). Landslide tsunami hazard in the Indonesian Sunda Arc. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 589–604. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-589-2010>
- Buchori, I., Pramitasari, A., Sugiri, A., Maryono, M., Basuki, Y., & Sejati, A. W. (2018). Adaptation to coastal flooding and inundation: Mitigations and migration pattern in Semarang City, Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, 163, 445–455. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.07.017>
- Faiqoh, I., Gaol, J. L., & Ling, M. M. (2013). Vulnerability Level Map of Tsunami Disaster in Pangdaran Beach, West Java. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences*, 10(2), 90–103.
- Fuad, M. A. Z., Kurniasari, D., & Dewi, C. S. U. (2025). Pemetaan Kerentanan Tsunami di Kawasan Wisata Pantai: Studi Kasus di Pulau Merah, Banyuwangi-Indonesia. *JFMR (Journal of Fisheries and Marine Research)*, 9(2), 14–23. <https://doi.org/10.21776/ub.jfmr.2025.009.02.2>
- Handayani, W., Chigbu, U. E., Rudiarto, I., & Putri, I. H. S. (2020). Urbanization and Increasing Flood Risk in the Northern Coast of Central Java—Indonesia: An Assessment towards Better Land Use Policy and Flood Management. *Land*, 9(10), 343. <https://doi.org/10.3390/land9100343>
- Horspool, N., Pranantyo, I., Griffin, J., Latief, H., Natawidjaja, D. H., Kongko, W., Cipta, A., Bustaman, B., Anugrah, S. D., & Thio, H. K. (2014). A probabilistic tsunami hazard assessment for Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), 3105–3122. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-3105-2014>
- Li, L., Switzer, A. D., Wang, Y., Chan, C.-H., Qiu, Q., & Weiss, R. (2018). A modest 0.5-m rise in sea level will double the tsunami hazard in Macau. *Science Advances*, 4(8). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat1180>
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Horspool, N., Smebye, H., de Bono, A., & Nadim, F. (2014). Global tsunami hazard and exposure due to large co-seismic slip. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 10, 406–418. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2014.04.003>
- Mirsel, R., Muta'ali, L., Devianty, T., Rustiyana, H., Haryono, Wany, E., Henriques, E. D. T., Natsir, H. I., Setyobudi, R., Pujiriyani, D. W., Rasyid, F. M., Ferrinadewi, E., Suhartini, Chandra, M. H., Sami'un, D. C., Estede, S., & Abdulhadi, D. (2026). *10 Tahun SDGs dan Implementasinya di Indonesia* (A. Minarsi, Ed.). Star Digital Publishing.
- Ningtyas, N. N., Satyarno, I., & Triatmadja, R. (2022). Preparedness of Tsunami Disaster in Pandeglang Region Due to The Activity of Mount Krakatau. *INERSIA Informasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 18(2), 141–156. <https://doi.org/10.21831/inersia.v18i2.54054>
- Purwanto, N. I., Poluan, R. J., & Takumansang, E. D. (2017). Perencanaan Wilayah Pesisir Berbasis Mitigasi Bencana di Kecamatan Sanana Kabupaten Kepulauan Sula Provinsi Maluku Utara. *Spasial*, 4(3), 1–8. <https://doi.org/10.35793/sp.v4i3.17295>
- Putra, I. M. E. K., & Chernovita, H. P. (2020). Mapping of Tsunami disaster evacuation pathways based on Tsunami altitude scenario using Network Analyst Method (case study: Palu City, Central Sulawesi). *Journal of Applied Geospatial Information*, 4(1), 304–311. <https://doi.org/10.30871/jagi.v4i1.2012>
- Rasyid, F. M. (2026). Land Use Suitability and Spatial Plan Compliance in Kalianda District, South Lampung. *Jurnal Perencanaan Wilayah Dan Kota*, 21(1), 44–58. <https://doi.org/10.29313/jpwk.v21i1.8045>
- Rasyid, F. M., Damai, A. A., & Asbi, A. M. (2021). Hubungan Daya Dukung Lingkungan Berbasis Kemampuan Lahan dengan Kerentanan Banjir di Kecamatan Teluk Betung Selatan. *Jurnal Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 8(1), 1–11. <https://doi.org/10.21776/ub.jsal.2021.008.01.1>
- Rasyid, F. M., Zalmansyah, A., Arinta, F. K., Slameto, S., Kifli, G. C., Aminah, S., Suryatin, E., Mulyadi, M., Musseptial, Haryatmo, S., & Supriadi, A. (2026). Indigenous knowledge-based tsunami disaster mitigation strategies in South Lampung coastal areas, Indonesia. *Jambá Journal of Disaster Risk Studies*, 18(1), 1983. <https://doi.org/10.4102/IAMBA.v18i1.1983>
- Sagala, S. A. H., Suroso, D. S. A., Puspitasari, N., Suroso, A. A., & Rizqika, K. A. (2021). Knowledge and implementation gaps in disaster risk reduction and spatial planning: Palu City, Indonesia. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 30(4–5), 462–479. <https://doi.org/10.1108/DPM-03-2021-0105>
- Santius, S. H. (2015). Pemodelan Tingkat Risiko Bencana Tsunami pada Permukiman di Kota Bengkulu Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Permukiman*, 10(2), 92–105.
- Strunz, G., Post, J., Zosseder, K., Wegscheider, S., Mück, M., Riedlinger, T., Mehl, H., Dech, S., Birkmann, J., Gebert, N., Harjono, H., Anwar, H. Z., Khomarudin, R. M., & Muhari, A. (2011). Tsunami risk assessment in Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(1), 67–82. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-67-2011>
- Suppasri, A., Shuto, N., Imamura, F., Koshimura, S., Mas, E., & Yalciner, A. C. (2013). Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Tsunami: Performance of Tsunami Countermeasures, Coastal Buildings, and Tsunami Evacuation in Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 170(6), 993–1018. <https://doi.org/10.1007/s00024-012-0511-7>
- Urbanus, A., Sela, R. L. E., & Tungka, A. E. (2021). Mitigasi Bencana Banjir Struktural dan Non-Struktural di Kabupaten Bolaang Mongondow Selatan. *Spasial*, 8(3), 447–458. <https://doi.org/10.35793/sp.v8i3.36350>
- Utami, W. (2021). Analisis Rencana Tata Ruang Wilayah Pada Pesisir Rawan Tsunami (Studi Pesisir Aceh, Banten dan Palu). *TATALOKA*, 23(4), 479–495. <https://doi.org/10.14710/tataloka.23.4.479-495>
- Veni, V. (2019). Arahan Kebijakan Penggunaan Lahan Permukiman Berbasis Bencana Tsunami di Kabupaten Pesisir Selatan. *JURNAL SWARNABHUMI: Jurnal Geografi Dan Pembelajaran Geografi*, 4(2), 122–130. <https://doi.org/10.31851/swarnabhumi.v4i2.2893>
- Yuzal, H., Kim, K., Pant, P., & Yamashita, E. (2017). Tsunami evacuation buildings and evacuation planning in

- Rasyid, F. M., Muhammad, A., Munirwan, H., dan Asbi, A. M. (2026). Pemetaan Tingkat Bahaya dan Zona Keterpaparan Permukiman terhadap Tsunami di Kota Bengkulu. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 24(4), 855-869, doi:10.14710/jil.24.4.855-869
- Banda Aceh, Indonesia. *Journal of Emergency Management*, 15(1), 49-61.
<https://doi.org/10.5055/jem.2017.0312>
- Zalmansyah, A., Herlina, N., Rasyid, F. M., & Arinta, F. K. (2022). Kearifan Lokal dalam Tradisi Sambatan: Diaspora Masyarakat Jawa di Lampung Tengah. *Mlangun: Jurnal Ilmiah Kebahasaan Dan Kesastraan*, 19(2), 185-200.