



Analisis Risiko Tsunami Berbasis GIS dan Kondisi Eksisting Pantai untuk Mitigasi Bencana di Kota Banda Aceh

Laela Rustiani^{1*}, Bambang Agus Herlambang², Ahmad Khoirul Anam³

¹ Mahasiswa Prodi Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Indonesia

²⁻³ Dosen Prodi Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang, Indonesia

Email: lelarustiani@gmail.com¹, bambangherlambang@upgris.ac.id², kanam5999@gmail.com³

*Penulis Korespondensi: lelarustiani@gmail.com

Abstract: Banda Aceh City has high vulnerability to tsunamis due to its coastal location directly facing the sea and being situated in an active tectonic zone. This study evaluates the spatial distribution of tsunami risk and assesses coastal conditions as disaster mitigation efforts using a mixed-method approach that combines quantitative analysis based on Geographic Information Systems (GIS) and qualitative analysis through field surveys and expert assessments. Three beaches were selected as study locations: Ulee Lheue Beach, Syiah Kuala Beach, and Alue Naga Beach, with risk assessment calculated using the formula $Risk = (H \times V) / C$ according to the BNPB framework and overlay techniques in GIS to create risk distribution maps. Coastal condition evaluation focused on coastal vegetation and protective coastal structures assessed using an ordinal scale of 1–5. Results show that Ulee Lheue Beach has the highest mitigation capacity with a score of 64.5% (good category), Syiah Kuala Beach reaches 57.5% (fairly good), while Alue Naga Beach has the lowest score of 28.3% (poor). Correlation analysis yielded a coefficient of $r = 0.97$, indicating a very strong positive relationship between coastal vegetation and protective coastal structures. Therefore, the study recommends strengthening mitigation strategies through improved protective infrastructure and optimization of coastal vegetation functions, particularly in high-risk areas, to reduce tsunami impacts in the future.

Keywords: Coastal Vegetation; Disaster Mitigation; GIS; Tsunami Risk; Tsunami.

Abstrak: Kota Banda Aceh memiliki kerentanan tinggi terhadap tsunami karena lokasinya di tepi pantai yang menghadap langsung ke laut dan berada di zona tektonik aktif. Penelitian ini mengevaluasi sebaran risiko tsunami secara spasial dan menilai kondisi pantai sebagai upaya mitigasi bencana menggunakan pendekatan campuran yang menggabungkan analisis kuantitatif berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dan analisis kualitatif melalui survei lapangan serta penilaian ahli. Tiga pantai dipilih sebagai lokasi kajian yaitu Pantai Ulee Lheue, Pantai Syiah Kuala, dan Pantai Alue Naga, dengan penilaian risiko dihitung menggunakan rumus $Risiko = (H \times V) / C$ sesuai kerangka BNPB dan teknik overlay dalam SIG untuk membuat peta distribusi risiko. Evaluasi kondisi pantai difokuskan pada vegetasi pesisir dan struktur pelindung pantai yang dinilai dengan skala ordinal 1–5. Hasil menunjukkan Pantai Ulee Lheue memiliki kapasitas mitigasi tertinggi dengan skor 64,5% (kategori baik), Pantai Syiah Kuala mencapai 57,5% (cukup baik), sedangkan Pantai Alue Naga terendah dengan skor 28,3% (buruk). Analisis korelasi menghasilkan koefisien $r = 0,97$ yang menunjukkan hubungan positif sangat kuat antara vegetasi pesisir dan struktur pelindung pantai, sehingga penelitian merekomendasikan penguatan strategi mitigasi melalui perbaikan infrastruktur pelindung dan optimalisasi fungsi vegetasi pesisir, khususnya di area berisiko tinggi, untuk mengurangi dampak tsunami di masa mendatang.

Kata Kunci: Mitigasi Bencana; Risiko Tsunami; SIG; Tsunami; Vegetasi Pesisir.

1. LATAR BELAKANG

Banda Aceh, yang berfungsi sebagai ibu kota Provinsi Aceh, terletak di daerah strategis dekat pesisir yang secara langsung menghadap Selat Malaka utara (Fatimah, n.d.). Keberadaan geografi ini membuat daerah pesisir kota tersebut digunakan secara aktif untuk berbagai kegiatan, termasuk pemukiman, aktivitas pelabuhan, dan pariwisata. Sebagai pusat administrasi dan ekonomi tingkat provinsi, Kota Banda Aceh menunjukkan pertumbuhan pembangunan yang berkelanjutan, baik di area pusat kota maupun di sepanjang pantai.

Namun, kemudahan yang ditawarkan oleh lokasi geografis ini juga menghasilkan risiko tinggi terhadap tsunami. Musibah tsunami yang terjadi pada 26 Desember 2004 membuktikan bahwa kawasan pesisir sangat rentan terhadap ancaman gelombang besar dari laut (Goto et al., 2011). Tragedi tersebut menyebabkan banyak korban jiwa dan kerusakan besar pada infrastruktur, terutama di lokasi yang dekat dengan pantai.

Setelah tsunami 2004, pembangunan di Kota Banda Aceh yang mengarah ke utara atau daerah pesisir sebenarnya meningkat, padahal kebijakan pembangunan seharusnya berfokus pada sisi selatan kota. Fenomena ini memunculkan kekhawatiran akan kemungkinan terjadinya bencana serupa di masa depan, karena semakin dekatnya pembangunan area pemukiman dan infrastruktur dengan pantai meski beberapa kecamatan di pesisir seperti Meuraxa, Syiah Kuala, Kuta Alam, dan Kutaraja memiliki profil topografi yang rendah dan jarak dekat menuju sumber bahaya (Fatimah, n.d.), sehingga keselamatan daerah itu sangat bergantung pada keberhasilan langkah-langkah mitigasi bencana.

Mitigasi bencana tsunami dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama, yaitu mitigasi struktural dan non-struktural. Mitigasi struktural melibatkan pembangunan infrastruktur fisik seperti bangunan penahan ombak, dinding tepi pantai, serta penciptaan zona hijau di pesisir. Di sisi lain, mitigasi non-struktural mencakup upaya untuk meningkatkan kesadaran masyarakat, perencanaan tata ruang yang memperhatikan kerentanan lokasi, serta pengembangan sistem peringatan dini (Syamsidik et al., 2019). Salah satu langkah mitigasi struktural yang efektif adalah optimalisasi lingkungan pesisir melalui pengembangan struktur pengaman pantai dan ekosistem vegetasi yang bertindak sebagai pelindung alami dari gelombang tsunami.

Menurut Peraturan Menteri Pekerjaan Umum nomor 07 tahun 2015, pelaksanaan pengamanan pantai harus mengikuti konsep zona perlindungan dengan memperhatikan karakteristik daerah pesisir (Hidayatullah et al., 2015). Tujuan dari pengamanan tersebut adalah untuk melindungi komunitas yang tinggal di dekat pantai dari berbagai bahaya, termasuk ombak, banjir pasang, erosi, dan abrasi, sembari melindungi sarana publik, fasilitas sosial, serta kawasan dengan nilai ekonomi tinggi dan kepentingan strategis nasional. Dalam konteks mitigasi tsunami, struktur pengaman pantai seperti tanggul, pemecah ombak, serta vegetasi pesisir seperti hutan bakau dan pohon cemara memiliki peran penting dalam mengurangi kekuatan gelombang tsunami sebelum mencapai daratan.

Meskipun banyak penelitian sebelumnya telah melakukan studi tentang pengurangan risiko tsunami di Banda Aceh dengan berbagai cara (Fatimah, n.d.)(Muhari et al., 2011), masih ada sedikit penelitian yang khusus menggabungkan analisis risiko berbasis ruang dengan

penilaian kondisi pantai (Herlina et al., 2024). Hal ini terutama terkait dengan peran vegetasi pesisir dan struktur pengaman pantai. Padahal, penting untuk memiliki pemahaman yang lengkap mengenai sebaran risiko tsunami secara spasial dan kemampuan mitigasi yang ada dari kondisi pantai saat ini, agar dapat merancang strategi pengurangan risiko bencana yang lebih baik.

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tingkat risiko tsunami berdasarkan aspek spasial serta menilai kondisi pantai yang ada dalam rangka upaya mitigasi bencana di Banda Aceh. Penelitian ini berfokus pada tiga area pantai yaitu Pantai Ulee Lheue, Pantai Syiah Kuala, dan Pantai Alue Naga. Ketiga lokasi ini dipilih karena mewakili variasi ciri fisik pantai dan tingkat risiko tsunami yang berbeda. Penilaian dilakukan terhadap dua komponen utama, yaitu vegetasi pesisir dan struktur pengaman pantai, untuk mengetahui seberapa efektif daerah-daerah tersebut dalam mitigasi. Diharapkan bahwa hasil penelitian ini dapat memberikan saran kepada pengambil keputusan dalam merancang strategi mitigasi tsunami dan pengelolaan pantai yang berkelanjutan di Banda Aceh.

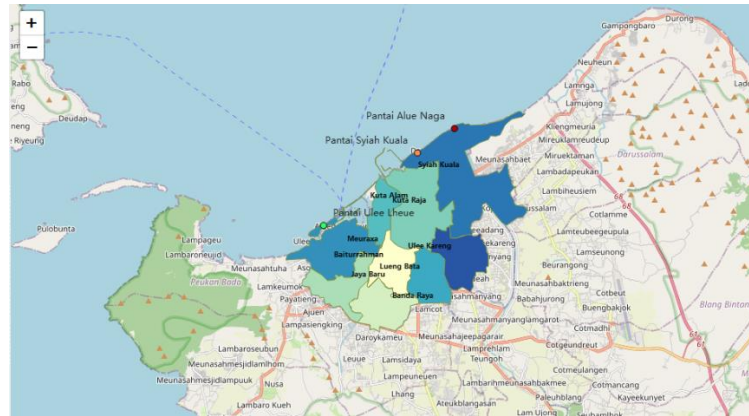
2. METODE PENELITIAN

Dalam penelitian ini, pendekatan campuran diadopsi dengan menggabungkan analisis kuantitatif yang berfokus pada Sistem Informasi Geografis (SIG) (Post et al., 2009) dan analisis kualitatif yang melibatkan observasi di lapangan serta evaluasi dari para ahli.

Analisis kuantitatif bertujuan untuk menilai risiko tsunami dari segi spasial, sedangkan analisis kualitatif berusaha untuk menilai keadaan saat ini dari area pesisir dalam rangka upaya mitigasi bencana.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian di Kota Banda Aceh (Sumber: perkim.id).



Gambar 2. Titik Koordinat Lokasi Penelitian Pantai di Kota Banda Aceh.

Penelitian ini dilakukan di tiga pantai di Kota Banda Aceh, yaitu Pantai Ulee Lheue, Pantai Syiah Kuala, dan Pantai Alue Naga. Pemilihan lokasi dilakukan dengan cara sengaja dengan memperhatikan letak pantai yang ada di daerah pesisir terbuka dan langsung terpapar potensi gelombang tsunami. Koordinat geografis dari lokasi penelitian dapat ditemukan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Titik Koordinat Lokasi Penelitian Pantai di Kota Banda Aceh.

No	Nama Pantai	Kecamatan	Latitude	Longitude
1	Ulee Lheue	Meuraxa	5.5625° LU	95.2889° BT
2	Syiah Kuala	Syiah Kuala	5.5939° LU	95.3296° BT
3	Alue Naga	Syiah Kuala	5.6045° LU	95.3459° BT

Untuk menilai keadaan pantai saat ini, dua komponen utama diperhatikan: vegetasi pesisir dan struktur pelindung pantai, yang dinilai melalui survei lapangan yang dibantu oleh penilaian dari ahli yang memiliki kompetensi dalam bidang kebencanaan dan pesisir. Dalam usaha untuk mengukur kemampuan pantai dalam mengurangi dampak tsunami, digunakan skala penilaian ordinal yang terdiri dari lima kategori (Dall'osso et al., 2009) seperti yang tertera dalam Tabel 2.

Tabel 2. Kemampuan Eksisting Pantai Meminimalkan Bencana Tsunami

No	Kategori	Skala
1.	Sangat baik	5
2.	Baik	4
3.	Cukup baik	3
4.	Kurang baik	2
5.	Buruk	1

Penilaian risiko tsunami dalam penelitian ini mengacu pada kerangka konseptual yang dibuat oleh Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). Risiko dihitung berdasarkan

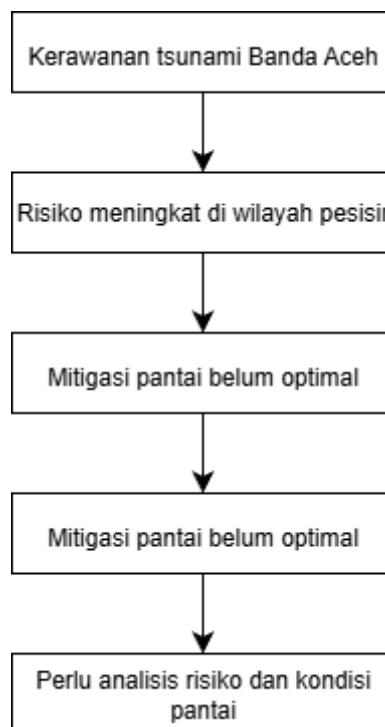
interaksi antara tingkat bahaya, kerentanan, dan kapasitas mitigasi kawasan. Persamaan yang digunakan adalah $Risiko = (H \times V) / C$ (Puspa Vidya et al., 2025), di mana H mewakili tingkat bahaya tsunami, V menunjukkan tingkat kerentanan daerah, dan C merujuk pada kapasitas mitigasi di wilayah pesisir .

Proses perhitungan dimulai dengan memberikan skor kepada komponen vegetasi pantai dan struktur pelindung pesisir oleh para ahli, menggunakan skala penilaian dari 1 sampai 5.

Nilai kapasitas mitigasi (C) diambil dari rata-rata skor yang diberikan di setiap lokasi penelitian. Selanjutnya, nilai bahaya (H) dan kerentanan (V) ditentukan melalui analisis spasial yang menggunakan Sistem Informasi Geografis dengan metode overlay peta tematik yang relevan.

Setelah semua parameter didapatkan, tingkat risiko tsunami dihitung menggunakan persamaan yang telah ditentukan. Sebagai contoh, jika sebuah wilayah memiliki nilai bahaya 4, kerentanan 3, dan kapasitas mitigasi 4, maka tingkat risikonya adalah 3.

Hasil nilai risiko yang diperoleh selanjutnya dibagi menjadi lima kategori, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi. Data dianalisis secara kuantitatif deskriptif, dengan mengolah nilai rata-rata dari hasil penilaian para ahli pada setiap komponen pantai. Pemetaan distribusi risiko tsunami dilakukan dengan teknik overlay dalam Sistem Informasi Geografis (Isdianto et al., 2021), dan hasil akhirnya disajikan dalam bentuk peta tematik dan tabel agar dapat mendukung interpretasi kondisi mitigasi pesisir di Kota Banda Aceh.

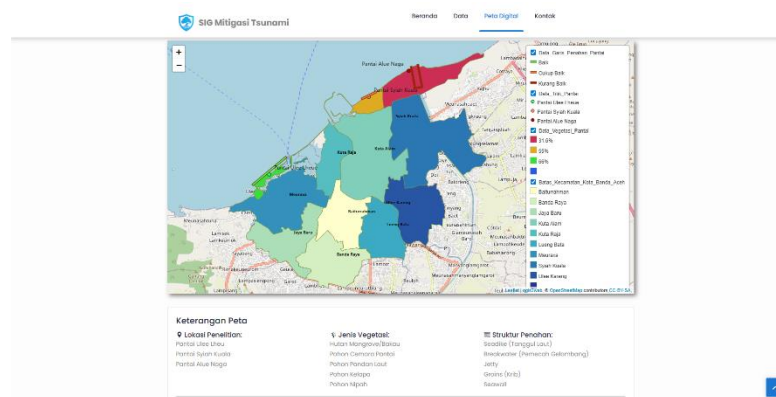


Gambar 3. Alur identifikasi masalah penelitian.

Berdasarkan alur identifikasi masalah tersebut, tahap awal penelitian ini difokuskan pada pengkajian risiko tsunami di wilayah pesisir Kota Banda Aceh. Identifikasi dilakukan dengan menganalisis tingkat kerawanan tsunami, peningkatan risiko di kawasan pesisir, serta kondisi mitigasi pantai yang belum optimal. Hasil identifikasi ini menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan analisis risiko dan evaluasi kondisi eksisting pantai.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian mengenai keberadaan vegetasi serta struktur pelindung di kawasan pesisir menunjukkan variasi kemampuan dalam menghadapi ancaman tsunami di tiap lokasi yang diamati.



Gambar 4. Peta Distribusi Risiko Tsunami di Kota Banda Aceh.

Ulee Lheue memberikan contoh sistem perlindungan yang paling baik berkat keberagaman vegetai dan fasilitas bangunan pengaman pantai yang lengkap, sehingga bisa maksimal meredam kekuatan ombak. Sementara itu, Syiah Kuala menunjukkan kondisi mitigasi yang cukup stabil, pendorong utamanya adalah keberadaan ekosistem mangrove yang dominan, berfungsi sebagai penghalang alami di sepanjang tepi pantai (Post et al., 2009). Di sisi lain, Alue Naga menunjukkan dukungan perlindungan paling lemah dikarenakan kurangnya tumbuhan pesisir serta infrastruktur pengaman yang tidak memadai, menyebabkan daerah ini lebih rentan terhadap bahaya tsunami.

Analisis kapasitas dalam menghadapi tsunami dilakukan dengan mempertimbangkan dua aspek utama, yakni status vegetasi pesisir dan keberadaan bangunan pelindung pantai. Kedua faktor ini sangat penting untuk mereduksi kekuatan gelombang tsunami serta menentukan tingkat perlindungan kawasan tersebut. Mengacu pada hasil penilaian yang terdapat dalam Tabel 3.

Tabel 3. Evaluasi Vegetasi dan Struktur Pesisir.

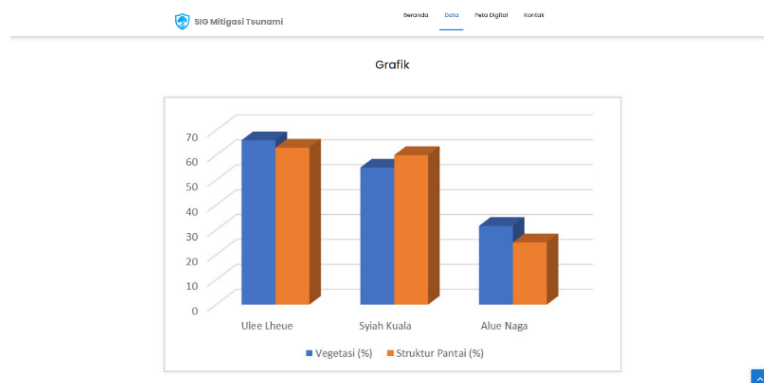
Lokasi	Vegetasi (%)	Struktur Pesisir (%)
Ulee Lheue	66	63
Syiah Kuala	55	60
Alue Naga	31,6	25

Setiap nilai dari komponen-komponen tersebut kemudian digabungkan untuk menghasilkan angka mitigasi total, yang selanjutnya menjadi dasar dalam mengklasifikasikan kemampuan penanganan di setiap lokasi. Ringkasan klasifikasi dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Ringkasan Kemampuan Mitigasi.

Lokasi	Vegetasi	Struktur	Skor Mitigasi (%)	Klasifikasi
Ulee Lheue	66%	63%	64,5	Baik
Syiah Kuala	55%	60%	57,5	Cukup Baik
Alue Naga	31,6%	25%	28,3	Buruk

Untuk memudahkan perbandingan visual antar lokasi, data pada Tabel 4 divisualisasikan dalam bentuk grafik batang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.

**Gambar 5.** Perbandingan Persentase Vegetasi dan Struktur.

Perbedaan tingkat perlindungan ini sangat tergantung pada ragam dan kelengkapan bangunan pengaman pantai yang ada di masing-masing lokasi. Sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 5, Ulee Lheue memiliki struktur perlindungan yang paling lengkap, di mana terdapat seadike, breakwater, jetty, groin, dan seawall yang bekerja secara sinergis untuk mengurangi energi gelombang. Di Syiah Kuala terdapat dua tipe struktur utama, yaitu breakwater dan seawall, yang cukup efektif untuk memberikan perlindungan, meskipun tidak sebesar Ulee Lheue. Sementara itu, Alue Naga hanya memiliki tiga jenis bangunan (seadike, jetty, dan groin)

dengan kondisi yang kurang memadai, sehingga kemampuan mitigasinya menjadi terbatas.

Tabel 5. Jenis Struktur Pengaman Pantai pada Tiga Lokasi Penelitian.

No	Bangunan Penahan Pantai	Lokasi
1	Seadike	Ulee Lheue, Alue Naga
2	Breakwater	Ulee Lheue, Syiah Kuala
3	Jetty	Ulee Lheue, Alue Naga
4	Groin	Ulee Lheue, Alue Naga
5	Seawall	Ulee Lheue, Syiah Kuala

Selain dari infrastruktur pelindung buatan, vegetasi pesisir juga memiliki peran penting dalam sistem penanganan tsunami (Tanaka et al., 2007) (Alongi, 2008). Temuan menunjukkan adanya lima jenis tanaman utama yang tumbuh di tiga lokasi penelitian seperti tertera dalam Tabel 6. Mangrove atau bakau, cemara pantai, dan pohon nipah ditemukan di semua lokasi, yang menunjukkan bahwa ketiga jenis tanaman ini sangat penting bagi ekosistem pesisir Banda Aceh. Namun, Ulee Lheue tercatat sebagai lokasi dengan keragaman vegetasi tertinggi, dengan adanya pandan laut yang tidak ditemukan di lokasi lain dan juga pohon kelapa yang ada di Alue Naga. Keragaman tanaman ini membantu Ulee Lheue menyerap energi gelombang secara lebih efektif melalui penghalang fisik dan penyerapan gelombang bertingkat (Suetsugu et al., 2012).

Tabel 6. Jenis Vegetasi Pantai pada Tiga Lokasi Penelitian.

No	Jenis Vegetasi Pantai	Lokasi
1	Mangrove / Bakau	Ulee Lheue, Syiah Kuala, Alue Naga
2	Cemara Pantai	Ulee Lheue, Syiah Kuala, Alue Naga
3	Pandan Laut	Ulee Lheue
4	Pohon Kelapa	Ulee Lheue, Alue Naga
5	Pohon Nipah	Ulee Lheue, Syiah Kuala, Alue Naga

Hasil dari pengujian statistik menunjukkan koefisien korelasi sebesar $r = 0,97$, yang mengindikasikan adanya hubungan positif yang sangat kuat antara kondisi vegetasi pesisir dan adanya struktur penahan pantai. Koefisien ini menguatkan bahwa tempat yang memiliki kualitas tanaman yang lebih baik biasanya juga memiliki infrastruktur pesisir yang lebih baik. Hubungan yang kuat ini menunjukkan bahwa vegetasi pesisir memainkan peran penting dalam mendukung efektivitas infrastruktur pesisir karena kemampuannya dalam mengurangi energi gelombang. Oleh karena itu, tanaman dan bangunan penahan pantai saling mendukung dan

tidak berdiri sendiri dalam meningkatkan kemampuan mitigasi tsunami di daerah pesisir. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa gabungan infrastruktur hijau dan infrastruktur abu-abu menghasilkan sistem perlindungan pesisir yang paling efisien dan ramah lingkungan (Akbar et al., 2019) (Alongi, 2008).

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis dan diskusi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa kondisi pantai di Kota Banda Aceh menunjukkan perbedaan kapasitas mitigasi yang signifikan di berbagai lokasi penelitian. Pantai Ulee Lheue memiliki kapasitas mitigasi tertinggi dengan skor 64,5% (kategori baik), yang didukung oleh beragam jenis vegetasi pesisir dan adanya struktur pelindung pantai yang lengkap. Pantai Syiah Kuala menunjukkan kapasitas mitigasi sedang dengan skor 57,5% (kategori cukup baik), di mana ekosistem mangrove menjadi elemen utama dari sistem mitigasi. Di sisi lain, Pantai Alue Naga memiliki kapasitas mitigasi terendah, dengan skor 28,3% (kategori buruk), karena keterbatasan vegetasi pesisir dan kurangnya infrastruktur untuk menjaga pantai. Uji statistik menunjukkan ada korelasi positif yang sangat kuat ($r = 0,97$) antara kondisi vegetasi pesisir dan keberadaan struktur pelindung pantai, yang menunjukkan bahwa kedua elemen ini saling mempengaruhi dan tidak bekerja secara terpisah dalam meningkatkan kapasitas mitigasi tsunami di daerah pesisir. Dengan temuan ini, disarankan kepada pemerintah Kota Banda Aceh untuk meningkatkan kapasitas mitigasi pantai, khususnya di daerah Alue Naga, dengan membangun struktur pelindung pantai yang memadai dan mengembangkan vegetasi pesisir secara terencana. Hal ini harus dilakukan dengan mengombinasikan strategi mitigasi berbasis infrastruktur hijau dan abu-abu. Pemetaan risiko tsunami dan penilaian kapasitas mitigasi pantai sebaiknya dimasukkan dalam Rencana Detail Tata Ruang (RDTR) kawasan pesisir (Damásio, 2009). Program konservasi dan rehabilitasi akan diprioritaskan di area dengan kapasitas mitigasi rendah. Selain itu, penting untuk membentuk sistem monitoring dan evaluasi secara berkala, yang dilengkapi dengan sosialisasi yang berkelanjutan serta pendidikan tentang kebencanaan untuk masyarakat pesisir, agar dapat meningkatkan ketahanan jangka panjang terhadap ancaman tsunami.

DAFTAR REFERENSI

- Akbar, I., Poerbo, H. W., & Soedarsono, W. K. (2019). Adaptive urban design principles for land subsidence and sea level rise in coastal area of Tambak Lorok, Semarang. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 273(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/273/1/012005>
- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024>
- 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, 1557–1565.
- Damásio. (2009). No title. *Majallat al-‘Arabiyyah*, 2(5), 255.
- Fatimah, E. (n.d.). Penilaian tingkat risiko bencana tsunami untuk kawasan Kota Banda Aceh berdasarkan skenario tsunami Desember 2004. *Jurnal*, 3(2), 2014–2145.
- Goto, K., Chagué-Goff, C., Fujino, S., Goff, J., Jaffe, B., Nishimura, Y., Richmond, B., Sugawara, D., Szczuciński, W., Tappin, D. R., Witter, R. C., & Yulianto, E. (2011). New insights of tsunami hazard from the 2011 Tohoku-oki event. *Marine Geology*, 290(1–4), 46–50. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2011.10.004>
- Herlina, E. (2024). Analisis eksisting pantai sebagai upaya mitigasi risiko bencana tsunami di Kota Banda Aceh. *Journal of Disaster Management*, 1(2). <https://ejournal.unmuha.ac.id/index.php/pmb/index>
- Hidayatullah, S. (2015). Pemodelan tingkat risiko bencana tsunami pada permukiman di Kota Bengkulu menggunakan sistem informasi geografis. *Jurnal*, 10(2).
- Isdianto, A., Kurniasari, D., Subagiyo, A., Haykal, M. F., & Supriyadi, S. (2021). Pemetaan kerentanan tsunami untuk mendukung ketahanan wilayah pesisir. *Jurnal Permukiman*, 16(2), 90–100. <https://doi.org/10.31815/jp.2021.16.90-100>
- Muhari, A., Imamura, F., Koshimura, S., & Post, J. (2011). Examination of three practical run-up models for assessing tsunami impact on highly populated areas. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(12), 3107–3123. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-3107-2011>
- Post, J., Wegscheider, S., Mück, M., Zosseder, K., Kiefl, R., Steinmetz, T., & Strunz, G. (2009). Assessment of human immediate response capability related to tsunami threats in Indonesia at a sub-national scale. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1075–1086. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1075-2009>
- Puspa Vidya, D., Budiawati, M., Ditami, A. A., & Virtriana, R. (2025). Analisis perbandingan metodologi BNPB dan TSVI untuk penilaian risiko tsunami di Aceh Jaya, Indonesia. *Indonesian Journal of Environmental Disaster*, 4(2). <https://doi.org/10.20961/ijed.v4i2.2648>
- Suetsugu, D., Shiobara, H., Sugioka, H., Ito, A., Isse, T., Kasaya, T., Tada, N., Baba, K., Abe, N., Hamano, Y., Tarits, P., Barriot, J. P., & Reymond, D. (2012). TIARES project: Tomographic investigation by seafloor array experiment for the Society hotspot. *Earth, Planets and Space*, 64(4), 2009–2012. <https://doi.org/10.5047/eps.2011.11.002>
- Syamsidik, Tursina, Suppasri, A., Al’Ala, M., Luthfi, M., & Comfort, L. K. (2019). Assessing the tsunami mitigation effectiveness of the planned Banda Aceh Outer Ring Road

(BORR), Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(1), 299–312.
<https://doi.org/10.5194/nhess-19-299-2019>

Tanaka, N., Sasaki, Y., Mowjood, M. I. M., Jinadasa, K. B. S. N., & Homchuen, S. (2007). Coastal vegetation structures and their functions in tsunami protection: Experience of the recent Indian Ocean tsunami. *Landscape and Ecological Engineering*, 3(1), 33–45.
<https://doi.org/10.1007/s11355-006-0013-9>