



Prioritas Mitigasi dengan Pemodelan Spasial Tsunami di Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember ¹

Tsunami Spatial Modelling and Its Mitigation Priorities In Ambulu District Jember Regency

Emir Dienul Kukuh Prasetyo ^a, Dano Quinta Revana ^{a, 2}, Sri Sukmawati ^b

^a Program Studi Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember

^b Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember, Jl. Kalimantan 37 Jember

ABSTRAK

Kabupaten Jember memiliki enam kecamatan rawan bencana tsunami, salah satunya Kecamatan Ambulu. Pada tahun 1994 diketahui bahwa dua pantai yang berada di Kecamatan Ambulu terdampak bencana tsunami. Adanya potensi bencana tsunami di Pesisir Kecamatan Ambulu dapat mempengaruhi keselamatan wisatawan dan masyarakat pesisir Kecamatan Ambulu. Pada saat yang sama, belum adanya kajian terbaru terkait permodelan spasial inundasi tsunami di Kecamatan Ambulu yang meliputi pembahasan tata guna lahan. Penelitian ini bertujuan untuk menyusun prioritas mitigasi dengan permodelan spasial. Metode yang digunakan adalah analisis spasial dengan pengolahan data DEM menjadi *slope*, kemudian mengisi nilai koefisien kekasaran pada tutupan lahan, dilanjutkan dengan permodelan genangan tsunami, analisis penggunaan lahan terdampak, dan penggunaan *Analytical Hierarchy Process (AHP)* untuk penentuan prioritas mitigasi. Hasil dari penelitian ini didapatkan luasan genangan tsunami dengan skenario gelombang 4 m mencapai 219,09 ha, sedangkan luasan genangan tsunami dengan skenario gelombang 11 m mencapai 765,23 ha. Luasan tertinggi penggunaan lahan yang terdampak genangan tsunami dari 2 skenario tersebut adalah lahan pertanian dengan luas 68,71 ha dan 343,95 ha. Hasil penelitian dapat membantu penentuan tindak mitigasi sehingga didapatkan arahan mitigasi prioritas untuk bencana tsunami di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember yaitu penggunaan bangunan peredam tsunami dan pendidikan, penyuluhan, serta penyadaran masyarakat.

Kata kunci: pemodelan tsunami; mitigasi prioritas; Analytical Hierarchy Process (AHP); Ambulu

ABSTRACT

Jember Regency has six sub-districts prone to tsunami disasters, one of which is Ambulu Sub-district. In 1994, it was discovered that two beaches in Ambulu District were affected by the tsunami disaster. The potential for a tsunami disaster on the coast of Ambulu District could affect the safety of tourists and coastal communities in Ambulu District. This research aims to develop mitigation priorities with spatial modeling to help visualize the worst possibility of occurring. The method used is spatial analysis by processing DEM data into slope, then filling in the roughness coefficient value for land cover, followed by modeling tsunami inundation, analyzing affected land use, and using the Analytical Hierarchy Process (AHP) to determine mitigation priorities. The results of this research showed that the tsunami inundation area with a 4 m wave scenario reached 219.09 ha, while the tsunami inundation area with an 11 m wave scenario reached 765.23 ha. The highest area of land affected by tsunami inundation in the 2 scenarios is agricultural land, with an area of 68.71 ha and 343.95 ha. Based on the area obtained, it can help in determining mitigation actions with the help of the AHP method so that priority mitigation directions for the tsunami disaster in Ambulu District, Jember Regency, are obtained, namely the use of tsunami dampening buildings and education, counseling, and public awareness.

Keywords: tsunami modeling; mitigation; Analytical Hierarchy Process (AHP); Ambulu

¹ Info Artikel: Received: 27 Januari 2024, Accepted: 22 Juni 2024

² Corresponding Author: Dano Quinta Revana, danoquinta@unej.ac.id

PENDAHULUAN

Kabupaten Jember memiliki enam kecamatan kawasan rawan bencana tsunami yakni Kecamatan Kencong, Puger, Gumukmas, Wuluhan, Ambulu, dan Tempurejo, Ambulu, Wuluhan, Puger, Gumukmas, dan Kencong (Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Jember 2015 - 2035). Berdasarkan Katalog Desa/Kelurahan Rawan Tsunami (Yunus et al., 2019), di Kabupaten Jember terdapat tiga desa/kelurahan memiliki kelas bahaya tinggi, yaitu Desa Mojomulyo serta Desa Puger Wetan di Kecamatan Puger dan Desa Sumberejo di Kecamatan Ambulu. Karena itu, Kecamatan Ambulu termasuk kecamatan yang mempunyai tingkat bahaya tinggi terhadap tsunami, sehingga perlu adanya kajian dengan melakukan permodelan tsunami. Pada tahun 1994 diketahui telah terjadi bencana tsunami di dua pantai yang berada di Kecamatan Ambulu. Di daerah Pantai Watu Ulo tinggi gelombang mencapai 4 m dan menginvasi ke darat sampai sejauh 60 m (Sofiana et al., 2022). Sedangkan di daerah Pantai Payangan gelombang tsunami mencapai 4 m dan menginvasi ke darat sampai sejauh 60 m (Naryanto dan Wisyanto, 2005).

Pemodelan tsunami dilakukan oleh para peneliti untuk memberikan informasi yang digunakan untuk keperluan mitigasi pra bencana dan pasca bencana. Pada dasarnya, pemodelan tsunami yang ideal dilakukan dengan pemodelan hidrodinamika menggunakan pemodelan numerik tsunami (Damarnegara et al., 2021; Faradella et al., 2024; Kutschera et al., 2024; Narulita et al., 2023; Rikarda et al., 2020). Bahkan saat ini telah dikembangkan metode pembuatan peta inundasi dengan menggunakan *Machine Learning* (Storrøsten et al., 2024). Namun, pemodelan numerik tsunami memang memerlukan kemampuan mengoperasikan perangkat baik itu *software* dan *hardware* yang cukup tinggi. Jika kebutuhan akan akurasi tidak terlalu tinggi, alternatif lain dalam pembuatan peta inundasi yang bisa digunakan ialah dengan pemanfaatan peta statis seperti *bath tub model*, *wave attenuation model* (Kimpton et al., 2024), atau metode lain seperti yang dilakukan oleh Berryman (2005).

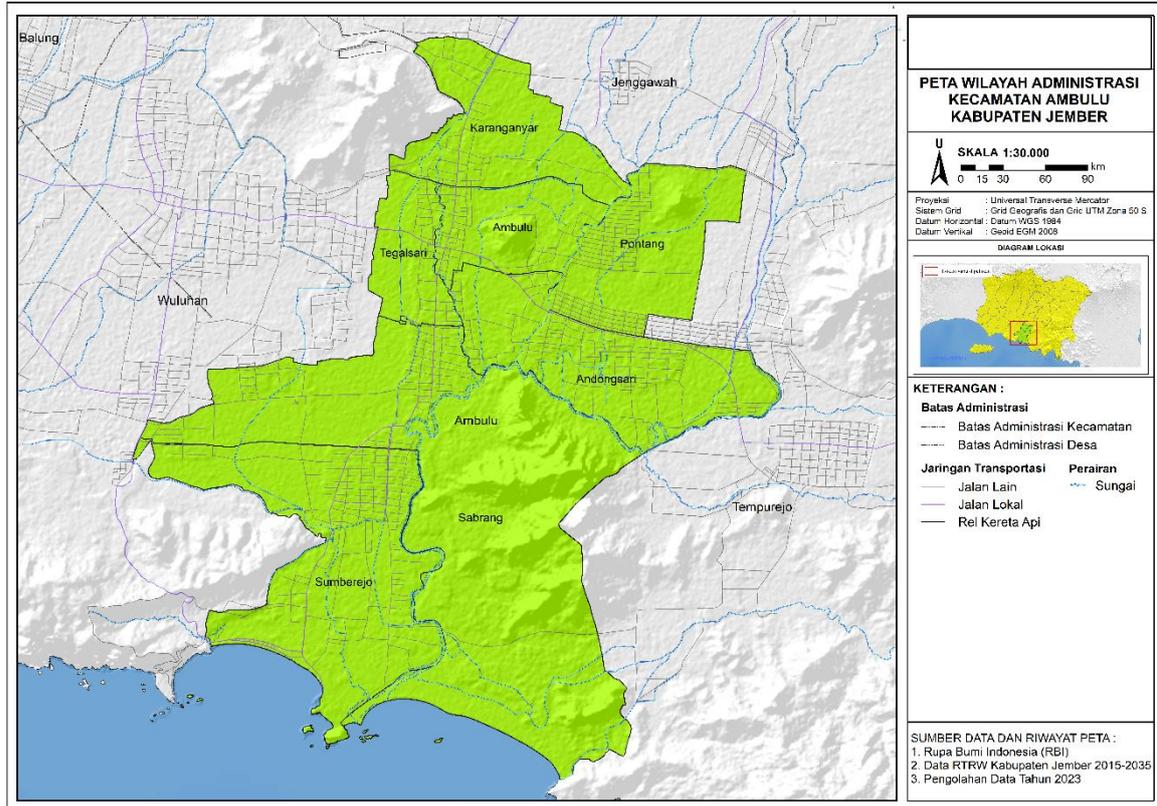
Pada Kecamatan Ambulu yang merupakan wilayah rawan bencana belum dilakukan pemodelan tsunami yang bisa menunjukkan luasan lahan berdasarkan tata guna lahannya. Padahal, hal ini sangat diperlukan untuk mempersiapkan mitigasi tsunami di daerah tersebut. Pada penelitian ini, dilakukan analisis spasial untuk membuat peta inundasi tsunami hingga memunculkan penggunaan lahan terdampak, yang dikomputasi dengan *Analytical Hierarchy Process (AHP)* untuk menentukan prioritas mitigasi. Sebagai pengembangan dari penelitian sebelumnya, pemodelan tsunami ini menggunakan 2 skenario yaitu ketinggian gelombang. Skenario pertama menggunakan ketinggian gelombang sebesar 4 m berdasarkan sejarah tsunami yang melanda Kabupaten Jember pada tahun 1994, dan skenario kedua ketinggian 11 m berdasarkan Referensi Potensi Kejadian dan Genangan Tsunami Indonesia pada lampiran Perka BNPB No. 4 Tahun 2012. Selain itu, perhitungan dampak hasil pemodelan genangan tsunami terhadap penggunaan lahan Kecamatan Ambulu digunakan untuk penentuan mitigasi prioritas tsunami secara structural dan non structural menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process (AHP)*.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian Pemodelan Spasial Tsunami dan Prioritas Mitigasinya ini berlokasi di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember, Provinsi Jawa Timur. Waktu penelitian ini dimulai pada bulan

Maret 2023. Kecamatan Ambulu merupakan salah satu wilayah pesisir yang berbatasan dengan Kecamatan Jenggawah di sebelah utara, Samudra Hindia di sebelah selatan, Kecamatan Wuluhan di sebelah barat, dan Kecamatan Tempurejo di sebelah Timur. Kecamatan Ambulu berada pada ketinggian 0-25 m di atas permukaan laut dengan luas wilayah mencapai 56,51 km². Pada ketinggian 25-100 m di atas permukaan laut dengan luas wilayah mencapai 25,00 km². Pada ketinggian 100-500 m di atas permukaan laut dengan luas wilayah mencapai 9,77 km². Lokasi penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta Administrasi Kecamatan Ambulu

Data penelitian

Data yang digunakan pada penelitian ini yaitu data primer dan sekunder. Data primer diperoleh dari hasil kuisisioner dan wawancara dengan *Stakeholder* yang memiliki pemahaman dan keterlibatan terhadap penanggulangan bencana tsunami di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember, yaitu Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Jember, Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga, dan Sumber Daya Air Kabupaten Jember, Dinas Perumahan Rakyat, Kawasan Permukiman, dan Cipta Karya Kabupaten Jember, Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah Kabupaten Jember, dan Pemerintah Kecamatan Ambulu.. Data sekunder diperoleh dengan mengumpulkan informasi melalui dokumen atau literatur terkait yang diperoleh dari *website*, jurnal ilmiah, data intansi dan sumber lainnya.

Metode analisis

Langkah 1. Analisis pemodelan genangan tsunami

1. Pengolahan data DEM menjadi *Slope* (Kemiringan Lereng)

Data DEM yang digunakan untuk *slope* adalah DEM Alos Palsar dengan resolusi 12,5 m. Pengolahan *slope* menggunakan software Arcgis 10.8 dengan *tool slope*. Pada *tool slope* lakukan input data DEM Kecamatan Ambulu yang selanjutnya diubah menjadi *degree*.

2. Mengisi nilai koefisien kekasaran pada tutupan lahan

Nilai koefisien kekasaran diisi pada *atributta table* tutupan lahan Kecamatan Ambulu pada *software* ArcGIS 10.8. Tiap nilai koefisien kakasaran permukaan berdasarkan pada (Berryman, 2005) yang dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan Lahan

No.	Jenis Penutupan/Penggunaan Lahan	Nilai Koefisien Kekasaran Permukaan
1.	Badan Air	0,007
2.	Semak Belukar	0,040
3.	Hutan	0,070
4.	Perkebunan	0,035
5.	Lahan Pertanian	0,025
6.	Lahan Kosong	0,015
7.	Permukiman	0,045
8.	Mangrove	0,025
9.	Tambak/Empang	0,010

3. Pemodelan Inundasi Tsunami menggunakan *Model Builder*

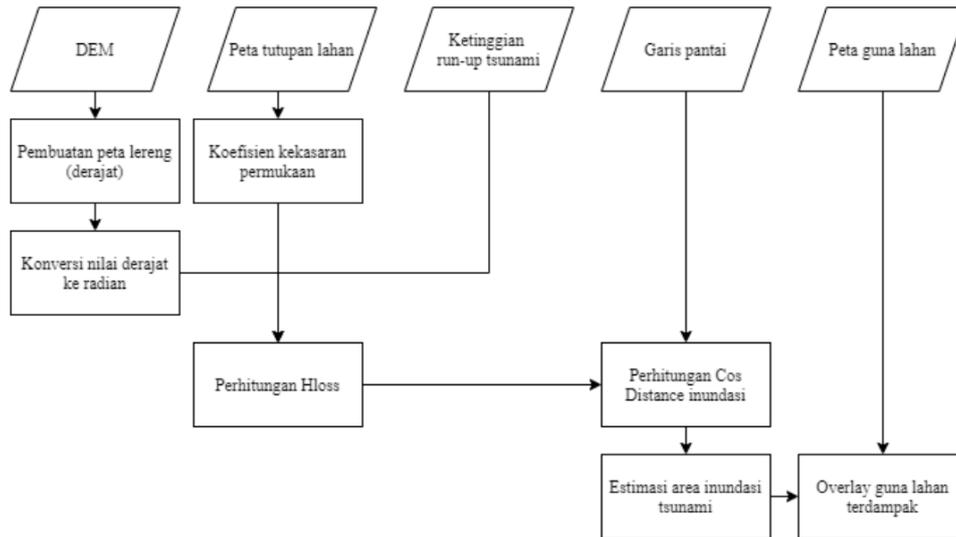
Permodelan tsunami dibuat menggunakan persamaan (Berryman, 2005) kemudian diolah dengan *model builder* pada *software* ArcGIS 10.8 dan menghasilkan peta area genangan tsunami. Pemodelan genangan tsunami dilakukan dengan bantuan *tools cost distance*. Untuk memodelkan ini membutuhkan data *slope*, koefisien kekasaran permukaan tiap tutupan lahan dan garis pantai menggunakan persamaan (Berryman, 2005) seperti berikut

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

Keterangan :

- Hloss* : Nilai penurunan air saat masuk ke daratan
- N : Koefisien kekasaran permukaan
- H : Tinggi gelombang tsunami di garis pantai
- S : *Slope/* kemiringan lereng

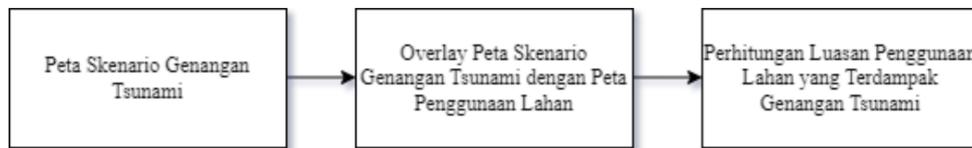
Alur yang menggambarkan proses pemodelan tsunami beserta data yang digunakan serta hasil yang akan dicapai yang dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Tahapan Pemodelan Tsunami (Sumber: Risiko Bencana Indonesia, 2016)

Langkah 2. Analisis penggunaan lahan yang terdampak

Analisis penggunaan lahan yang terkena dampak genangan dilakukan dengan cara melakukan *overlay* peta hasil genangan tsunami dengan peta penggunaan lahan menggunakan *software* ArcGIS 10.8. Dari hasil *overlay* tersebut diketahui penggunaan lahan dan luasnya yang terkena dampak genangan.



Gambar 3 Alur Analisis Lahan Yang Terdampak Genangan

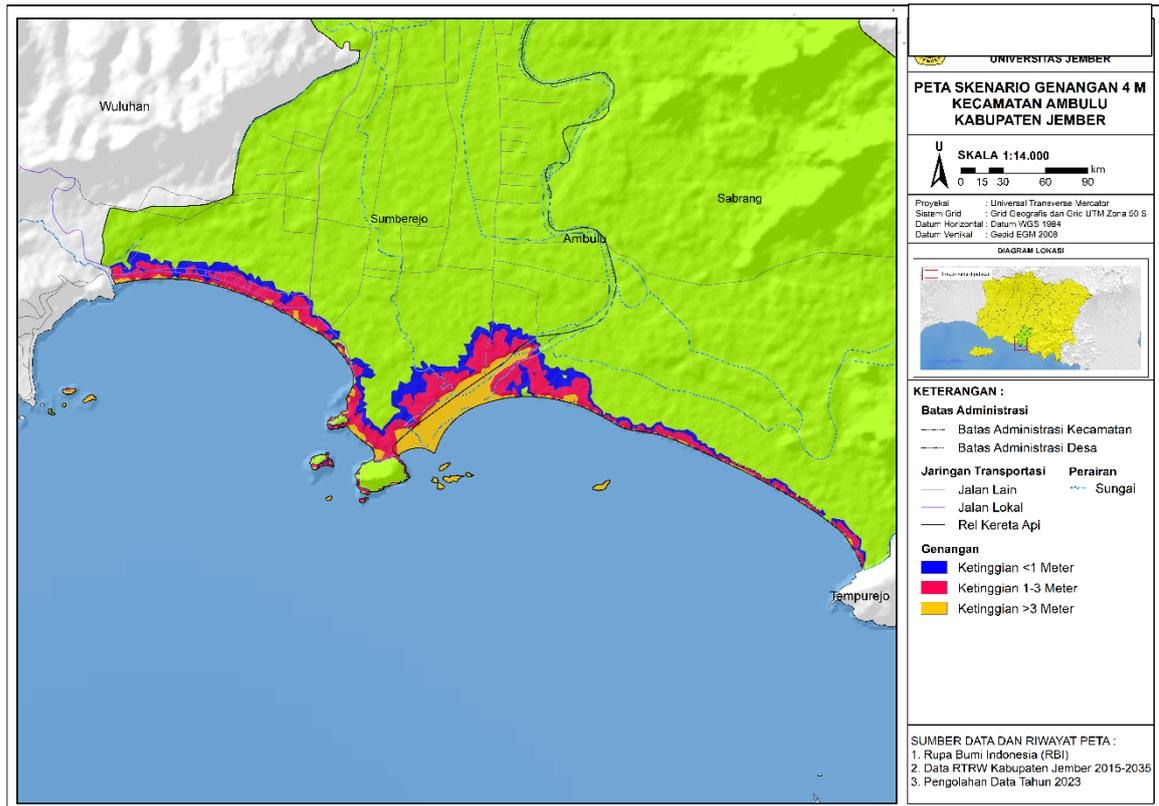
Langkah 3. Analytical Hierarchy Process

Analytical Hierarchy Process (AHP) adalah teknik analisis data dengan menggunakan penentuan skala prioritas dalam pengambilan sebuah keputusan. Metode ini bertujuan untuk menentukan prioritas mitigasi. Pengolahan data yang diperoleh dari hasil analisis *Analytical Hierarchy Process (AHP)* selanjutnya akan diolah dengan menggunakan *software* Expert Choice. Tahapan-tahapan dalam melakukan analisis menggunakan bantuan Expert Choice, yaitu: 1. Memasukkan goal atau tujuan dalam penelitian; 2. Memasukkan kriteria dan sub kriteria yang digunakan dalam penelitian; 3. Menambahkan jumlah responden atau stakeholder dalam penelitian; 4. Melakukan pengisian hasil kuesioner; 5. Melakukan pembobotan hasil kuesioner seluruh responden; 6. Hasil arahan mitigasi prioritas tsunami di Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember.

HASIL DAN PEMBAHASAN

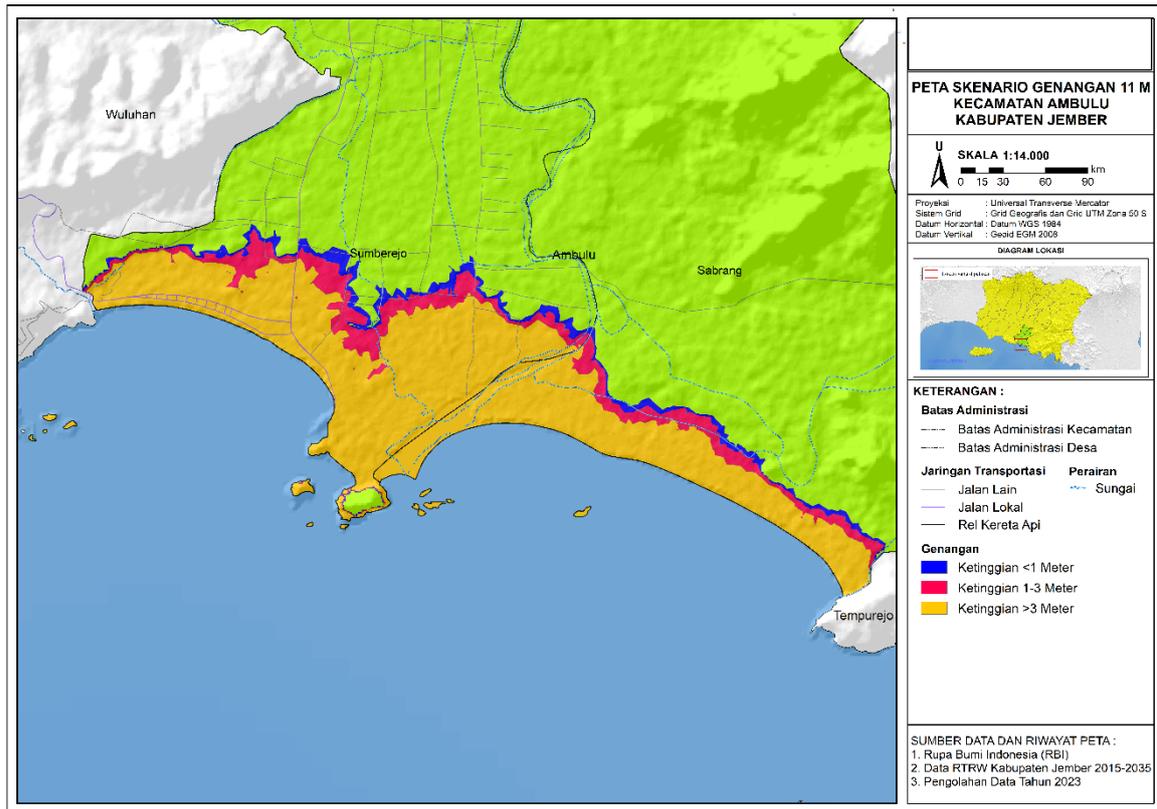
Analisis Pemodelan Genangan Tsunami di Kecamatan Ambulu

Pada penelitian ini skenario yang pertama digunakan pada pemodelan adalah ketinggian gelombang 4 m. Analisis yang didapatkan berdasarkan persamaan Berryman, (2006). Data yang diperlukan untuk persamaan yaitu koefisien kekasaran, *slope*/kelerengan, dan garis pantai. Hasil pemodelan tsunami di Kecamatan Ambulu dengan skenario ketinggian gelombang 4 m dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4 Peta Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Ketinggian Gelombang 4 Meter

Pada penelitian ini skenario kedua yang digunakan pada pemodelan adalah ketinggian gelombang 11 meter. Analisis yang didapatkan berdasarkan persamaan Berryman, (2006). Data yang diperlukan untuk persamaan yaitu koefisien kekasaran, *slope*/kelerengan, dan garis pantai. Hasil pemodelan tsunami di Kecamatan Ambulu dengan skenario ketinggian gelombang 11 meter dapat dilihat pada Gambar 5.



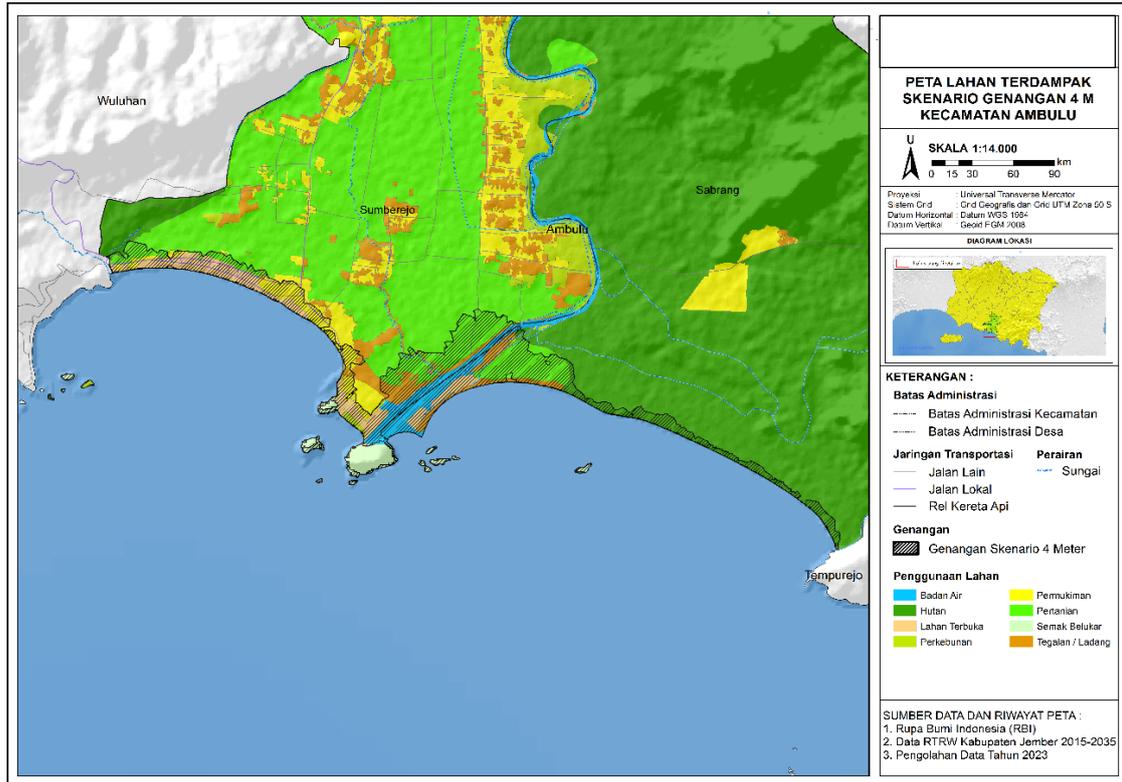
Gambar 5 Peta Pemodelan Genangan Tsunami dengan Skenario Ketinggian Gelombang 11 Meter

Berdasarkan hasil analisis pemodelan dapat diketahui wilayah yang terkena dampak genangan tsunami dengan skenario ketinggian gelombang 4 meter di Kecamatan Ambulu seluas 219,09 ha. Sedangkan wilayah yang terkena dampak genangan tsunami dengan skenario ketinggian gelombang 11 m di Kecamatan Ambulu seluas 765,23 ha. Dimana luasan lahan yang terdampak lebih besar pada skenario gelombang 11 m dari pada hasil kejadian tahun 1994.

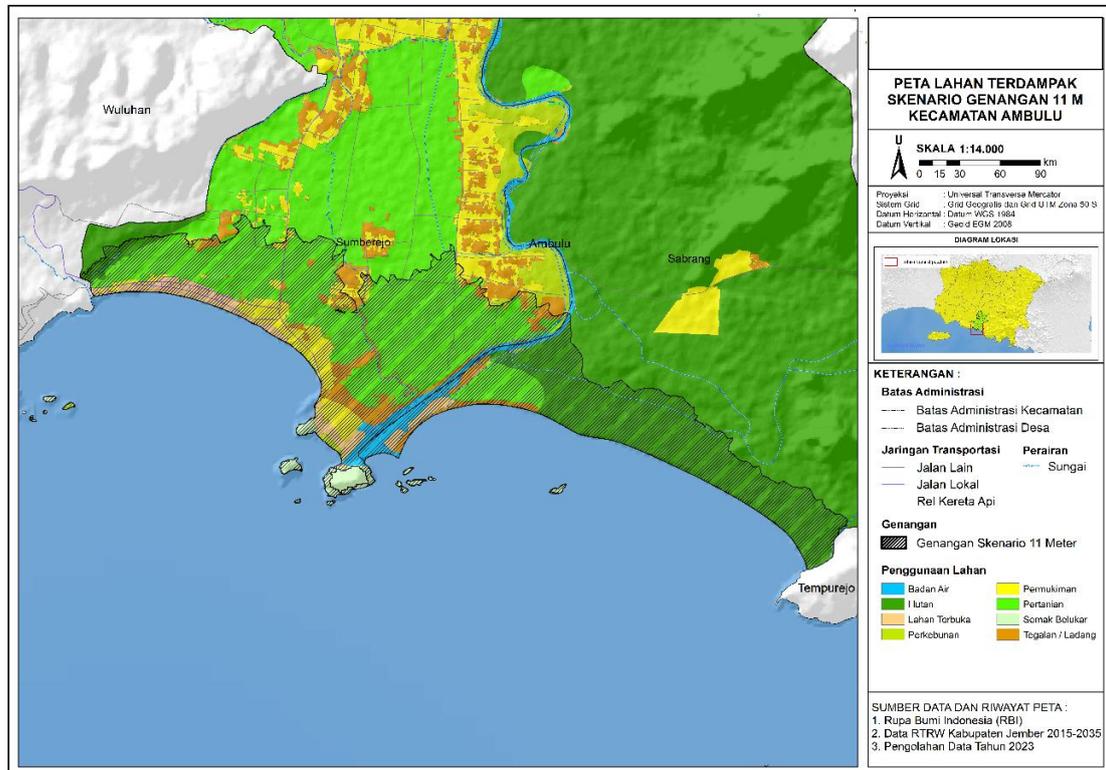
Analisis Penggunaan Lahan yang Terdampak Genangan Tsunami

Pemodelan tsunami dengan skenario ketinggian gelombang 4 m dan 11 m memiliki dampak terhadap penggunaan lahan di Kecamatan Ambulu. Penggunaan lahan di Kecamatan Ambulu adalah Badan Air, Hutan, Lahan Terbuka, Perkebunan, Permukiman, Pertanian, Semak Belukar, dan Tegalan/Ladang.

Penggunaan lahan yang terkena dampak genangan tsunami dapat diketahui dengan cara melakukan *overlay* peta penggunaan lahan dan peta genangan tsunami dengan skenario ketinggian 4 m dan 11 m. Pada kedua peta tersebut dilakukan *overlay* menggunakan *tools intersect*, sehingga dihasilkan peta dan diketahui luasan tiap penggunaan lahan yang terkena dampak genangan tsunami di Kecamatan Ambulu. Penggunaan lahan yang terkena dampak genangan tsunami dapat dilihat pada Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 6 Peta Penggunaan Lahan yang Terdampak Genangan 4 Meter



Gambar 7 Peta Penggunaan Lahan yang Terdampak Genangan 11 Meter

Luasan penggunaan lahan yang terkena dampak genangan tsunami dengan skenario ketinggian 4 meter dan 11 meter dapat dilihat pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2 Luasan Penggunaan Lahan yang Terdampak Genangan 4 Meter

No.	Penggunaan Lahan	Luas Lahan Terdampak (ha)
1.	Badan Air	28,09
2.	Hutan	26,05
3.	Lahan Terbuka	37,71
4.	Perkebunan	2,65
5.	Permukiman	22,54
6.	Pertanian	68,71
7.	Semak Belukar	7,38
8.	Tegalan / Ladang	25,93
Total		219,09

Tabel 3 Luasan Penggunaan Lahan yang Terdampak Genangan 11 Meter

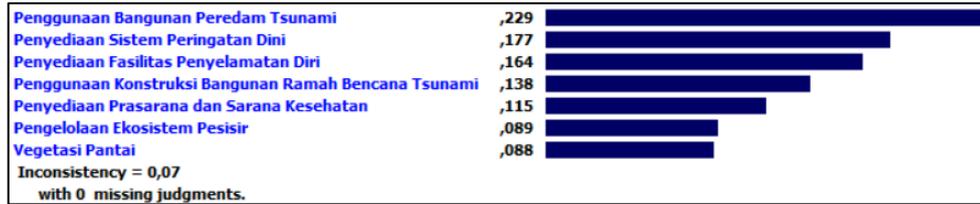
No.	Penggunaan Lahan	Luas Lahan Terdampak (ha)
1.	Badan Air	34,03
2.	Hutan	218,77
3.	Lahan Terbuka	38,22
4.	Perkebunan	8,41
5.	Permukiman	53,43
6.	Pertanian	343,95
7.	Semak Belukar	13,04
8.	Tegalan / Ladang	55,39
Total		765,23

Berdasarkan hasil analisis dimuat pada Tabel 2 dan Tabel 3 dapat diketahui bahwa luasan penggunaan lahan yang terdampak genangan tsunami dengan skenario ketinggian gelombang 4 m yang paling signifikan adalah pertanian dengan luas 68,71 ha dan pada skenario ketinggian 11 m yang paling signifikan adalah pertanian dengan luas 343,95 ha. Oleh karena itu, lahan pertanian memiliki potensi risiko tsunami yang paling signifikan.

Analisis Arahan Mitigasi Prioritas Tsunami di Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember

Penentuan mitigasi terhadap terhadap bencana tsunami di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember dilakukan menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process (AHP)*, dengan *software* Expert Choice dalam pengolahannya. Data yang diperoleh berdasarkan hasil pengisian kusioner dari 5 *Stakeholder* yaitu Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Jember, Dinas Pekerjaan Umum Bina Marga, dan Sumber Daya Air Kabupaten Jember, Dinas Perumahan Rakyat, Kawasan Permukiman, dan Cipta Karya Kabupaten Jember, Badan Perencanaan dan Pembangunan Daerah Kabupaten Jember, dan Pemerintah Kecamatan Ambulu.

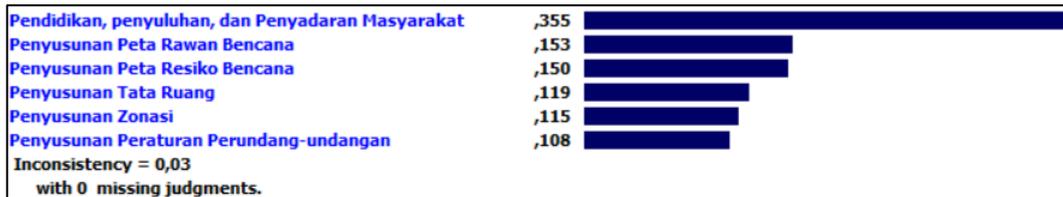
Berdasarkan hasil perhitungan pada sub kriteria mitigasi struktural mendapatkan nilai inkonsistensi 0,07. Angka tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan masih dibawah ambang batas senilai 0,1 yang berarti konsisten dapat digunakan. Hasil perhitungan sub kriteria mitigasi struktural tsunami dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8 Hasil Perhitungan Sub Kriteria Mitigasi Struktural Tsunami

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa prioritas utama terkait arahan mitigasi struktural prioritas tsunami di Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember yaitu penggunaan bangunan peredam tsunami. Penggunaan bangunan peredam tsunami adalah salah satu bentuk usaha untuk meminimalisir efek energi tsunami ke daratan. Bangunan peredam tsunami antara lain *breakwater* dan tembok laut (*seawall*) (McGovern et al., 2023). Breakwater yang dipasang di muara sebagai jetty memiliki kelebihan untuk meredam gelombang dari arah tertentu sehingga meminimalisir tinggi gelombang yang sampai ke pantai (Wiyono et al., 2023). Adapun tembok laut yang dipasang sejajar pantai memiliki kelebihan yaitu dapat melindungi pantai dan mencegah gelombang melimpas struktur yang ada di pantai (Akbar et al., 2023)

Berdasarkan hasil perhitungan pada sub kriteria mitigasi non struktural mendapatkan nilai inkonsistensi 0,03. Angka tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan masih dibawah ambang batas senilai 0,1 yang berarti konsisten dapat digunakan. Hasil perhitungan sub kriteria mitigasi non struktural tsunami dapat dilihat pada Gambar 9.



Gambar 9 Hasil Perhitungan Sub Kriteria Mitigasi Non Struktural Tsunami

Dari hasil perhitungan tersebut dapat diketahui bahwa prioritas utama terkait arahan mitigasi non struktural prioritas tsunami di Kecamatan Ambulu Kabupaten Jember yaitu pendidikan, penyuluhan, dan penyadaran masyarakat. Pendidikan, penyuluhan, dan penyadaran masyarakat dilakukan melalui latihan, gladi, simulasi, lokakarya serta peningkatan kesiapsiagaan masyarakat mengenai upaya mengurangi risiko bencana tsunami. Hal ini sejalan dengan hasil pemetaan risiko tsunami yang telah dilakukan oleh beberapa peneliti (Ardi et al., 2023; Suparno et al., 2023) bahwa parameter kapasitas merupakan hal yang penting dalam menurunkan risiko tsunami yang terjadi di sebuah daerah. Salah satunya ialah dengan cara melakukan pendidikan dan penyuluhan kepada Masyarakat mengenai risiko tsunami dan tata cara melakukan mitigasi terhadap tsunami di daerah tersebut.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pemodelan tsunami di Kecamatan Ambulu menggunakan metode spasial maka didapatkan luasan genangan tsunami dengan skenario gelombang 4 m mencapai 219,09 ha, sedangkan luasan genangan tsunami dengan skenario gelombang 11 m mencapai 765,23 ha. Luasan tertinggi penggunaan lahan yang terdampak genangan tsunami

dari 2 skenario tersebut adalah lahan pertanian dengan luas 68,71 ha dan 343,95 ha. Hasil pemodelan tersebut diperlukan adanya arahan mitigasi prioritas untuk bencana tsunami di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember adalah penggunaan bangunan peredam tsunami dan pendidikan, penyuluhan, serta kesadaran masyarakat. Permodelan ini menjadi rekomendasi terkait kebijakan pemerintah setempat dalam mencegah kemungkinan terburuk dari dampak bencana tsunami.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, S. A., Wiyono, R. U. A., & Hidayah, E. (2023). Perencanaan Bangunan Pelindung Pantai Di Desa Pesisir Besuki Kabupaten Situbondo. *Teras Jurnal : Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 85. <https://doi.org/10.29103/tj.v13i1.816>
- Ardi, A. R. S., Halik, G., & Wiyono, R. U. A. (2023). Risk Mapping of Tsunami Ambulu Sub-District. *Journal of Water Resources Engineering*, 2023(1), 89–102. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2023.014.01.8>
- Narulita, N. A., Wiyono, R. U. A., Halik, G., & Pratama, M. (2023). Tsunami – Tides Interaction of the South Coast of Jember Using Delft3D-Flow. *Jurnal Teknik Pengairan*, 14(2), 143–152. <https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2023.014.02.5>
- Berryman, K. (2005). *Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand*.
- Damarnegara, S., Winarta, B., Fuddoly, Lasminto, U., Al Kindhi, B., & Sarwono, B. (2021). Numerical investigation of tsunami impact in newly developed tourism coast, case study: Melasti Beach. *Physics and Chemistry of the Earth*, 122. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103001>
- Faradella, M., Wiyono, R. U. A., & Halik, G. (2024). Tsunami Simulation in Paseban Beach Using Nesting Method on Delft3D Modeling. *Rekayasa Sipil*, 18(1), 41–48. <https://doi.org/10.21776/ub.rekayasasipil.2024.018.01.8>
- Kimpton, T., Higuera, P., Whittaker, C., Wotherspoon, L., & Zorn, C. (2024). A rapid simplified method for determining tsunami inundation extent based on energy conservation. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. <https://doi.org/10.1111/mice.13168>
- Kutschera, F., Gabriel, A. A., Wirp, S. A., Li, B., Ulrich, T., Abril, C., & Halldórsson, B. (2024). Linked and fully coupled 3D earthquake dynamic rupture and tsunami modeling for the Húsavík-Flatey Fault Zone in North Iceland. *Solid Earth*, 15(2), 251–280. <https://doi.org/10.5194/se-15-251-2024>
- McGovern, D. J., Allsop, W., Rossetto, T., & Chandler, I. (2023). Large-scale experiments on tsunami inundation and overtopping forces at vertical sea walls. *Coastal Engineering*, 179(September 2022), 104222. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104222>
- Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Jember 2015 - 2035 (2015).
- Rikarda, R. D. E., Wiyono, R. U. A., Halik, G., Hidayah, E., & Pratama, M. B. (2020). Tsunami simulation in Puger Beach considering the combination of earthquake source in South Java. *AIP Conference Proceedings*, 2278. <https://doi.org/10.1063/5.0014684>
- Sofiana, R., Wiyono, R. U. A., & Nurtjahjaningtyas, I. (2022). Tsunami Mitigation Strategy at Watu Ulo Beach Based on Numerical Modeling Using Delft3D-Flow. *UKARsT*, 6(2), 158. <https://doi.org/10.30737/ukarst.v6i2.2959>
- Storrøsten, E. B., Ramalingam, N. R., Lorito, S., Volpe, M., Sánchez-Linares, C., Løvholt, F., & Gibbons, S. J. (2024). Machine Learning Emulation of High Resolution

Inundation Maps. *Geophysical Journal International*.

<https://doi.org/10.1093/gji/ggae151>

Suparno, Wiyono, R. U. A., Hidayah, E., & Koon Lee, W. (2023). Tsunami Disaster Risk Assessment Using a Geographic Information System for Puger Sub-District, Jember Regency. *Jurnal Teknik Pengairan*, 14(1), 13–24.

<https://doi.org/10.21776/ub.pengairan.2023.014.01.2>

Wiyono, R. U. A., Fadhilla, A., Maulana Ma, A. R., Halik, G., Widiarti, W. Y., & Hidayah, E. (2023). Effect of breakwater layout on waves at Puger beach Jember with Delft3D modeling. *E3S Web of Conferences*, 468.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346801002>

Yunus, R., Amri, Mohd. R., Wartono, Kristanto, Y., & Nugraheni, A. D. (2019). *Katalog Desa/Kelurahan Rawan Tsunami*.