

ANALISIS KOMPARATIF PEMODELAN INUNDASI TSUNAMI MENGGUNAKAN DELFT3D DAN ARCGIS

Risqi Sofiana^{1*}, Retno Utami Agung Wiyono²

¹Teknik Sipil, Politeknik Negeri Banyuwangi

²Teknik Sipil, Universitas Jember

*Email *corresponding author*: risqisofiana@poliwangi.ac.id

Info Artikel

Dijukan : 05/07/2025

Direview: 07/07/2025

Dipublikasi: 13/08/2025

Abstrak

Wilayah pesisir merupakan kawasan dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana tsunami, sehingga pemetaan genangan yang akurat menjadi aspek penting dalam perencanaan mitigasi. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memodelkan genangan tsunami, di antaranya pendekatan numerik menggunakan perangkat lunak Delft3D dan pendekatan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) seperti ArcGIS. Masing-masing pendekatan memiliki karakteristik tersendiri dalam merepresentasikan kondisi topografi serta perilaku gelombang tsunami, namun penelitian yang secara langsung membandingkan hasil dari keduanya masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil pemodelan genangan tsunami menggunakan dua pendekatan berbeda, yaitu numerik berbasis Delft3D dan spasial berbasis ArcGIS, di kawasan pesisir Pantai Watu Ulo, Kabupaten Jember. Delft3D mensimulasikan propagasi dan genangan gelombang tsunami berdasarkan model numerik hidrodinamika, sementara ArcGIS membangun pemodelan genangan berdasarkan parameter spasial seperti kemiringan lereng, kekasaran permukaan, dan tinggi gelombang menggunakan pendekatan kehilangan energi (*Hloss*). Data ketinggian gelombang di garis pantai yang diperoleh dari simulasi Delft3D digunakan sebagai *input* dalam pemodelan ArcGIS. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa luas genangan yang diproyeksikan oleh Delft3D mencapai 884,71 ha, sedangkan hasil dari ArcGIS menunjukkan luasan 611,53 ha. Perbedaan ini menunjukkan bahwa Delft3D memberikan estimasi genangan yang lebih luas, sementara ArcGIS menghasilkan sebaran genangan yang lebih terkonsentrasi berdasarkan variasi topografi dan karakteristik permukaan. Mempertimbangkan karakteristik masing-masing pendekatan, kombinasi pendekatan antara keduanya dapat meningkatkan akurasi dan relevansi dalam pemetaan zona rawan serta perencanaan mitigasi bencana tsunami.

Kata Kunci : ArcGIS, Delft3D, inundasi, tsunami

Abstract

Coastal areas are highly vulnerable to tsunami disasters, making accurate inundation mapping a crucial element in mitigation planning. Various methods have been developed to model tsunami inundation, including numerical approaches using Delft3D software and spatial approaches based on Geographic Information Systems (GIS), such as ArcGIS. Each approach has its own characteristics in representing topographic conditions and tsunami wave behavior; however, studies that directly compare the outcomes of both approaches remain limited. This study aims to compare tsunami inundation modeling results using two different approaches—namely, a Delft3D-based numerical method and a GIS-based spatial method—applied to the coastal area of Watu Ulo Beach, Jember Regency. Delft3D simulates tsunami wave propagation and inundation based on a hydrodynamic numerical model, while ArcGIS constructs inundation models based on spatial parameters such as slope gradient, surface roughness, and wave height using the energy loss (*Hloss*) approach. Wave height data along the coastline, obtained from Delft3D simulations, were used as input for the ArcGIS modeling. The results show that the inundation area projected by Delft3D reached 884.71 hectares, while ArcGIS produced an inundation extent of 611.53 hectares. This difference indicates that Delft3D tends to estimate a broader inundation area, whereas ArcGIS produces a more localized inundation pattern, influenced by topographic variations and surface characteristics. Considering the strengths of each method, integrating both approaches can enhance the accuracy and relevance of tsunami hazard zone mapping and mitigation planning.

Keyword : ArcGIS, Delft3D, inundation, tsunami

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan kawasan dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana

tsunami. Kejadian tsunami dapat menimbulkan dampak kerusakan yang signifikan, baik dari aspek lingkungan, sosial, maupun ekonomi (Anggraini

dkk., 2023). Salah satu elemen krusial dalam upaya mitigasi risiko bencana tsunami adalah pemetaan inundasi yang akurat dan representatif terhadap kondisi lapangan. Informasi mengenai luasan daerah terdampak sangat diperlukan dalam mitigasi bencana tsunami seperti menentukan zona bahaya tsunami (Kusuma & Ratiningsih, 2023) dan penentuan jalur evakuasi (Ferreira dkk., 2025). Oleh karena itu, keakuratan hasil pemodelan tsunami menjadi isu penting dalam penelitian kebencanaan, khususnya dalam kesesuaian luasan genangan yang dihasilkan oleh suatu model terhadap topografi di wilayah pesisir.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan dan digunakan oleh para peneliti dalam melakukan simulasi serta pemetaan inundasi tsunami. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan adalah Delft3D, yaitu sebuah perangkat lunak berbasis model numerik hidrodinamika yang memungkinkan simulasi propagasi dan genangan gelombang laut secara rinci dengan mempertimbangkan parameter topografi, batimetri, dan karakteristik aliran (Faradella dkk., 2024). Efektivitas penggunaan Delft3D ditunjukkan dalam penelitian Mardika dkk. (2024), melalui simulasi di Pantai Labuan Jukung, yang menghasilkan jarak genangan mencapai 330 meter untuk gelombang setinggi 8 meter dan 450 meter untuk gelombang setinggi 15 meter.

Selain pendekatan berbasis numerik, sistem informasi geografis (GIS) khususnya melalui aplikasi ArcGIS juga sering digunakan untuk pemetaan zona bahaya tsunami dengan menganalisis elevasi, kemiringan, jarak dari garis pantai, dan tutupan lahan (Susiati dkk., 2024). Sebagai contoh, analisis *overlay* GIS di Kabupaten Mamuju mengidentifikasi bahwa 3% dari wilayah tersebut tergolong sangat rentan, yang menekankan pentingnya pemetaan yang akurat dalam mendukung strategi tanggap bencana yang efektif (Asri & Yusuf, 2024).

Namun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu hanya berfokus pada penerapan salah satu metode tersebut secara terpisah. Belum banyak penelitian yang secara eksplisit membandingkan hasil pemetaan inundasi tsunami yang dihasilkan oleh Delft3D dan ArcGIS. Hal ini menjadi celah ilmiah yang penting, mengingat kedua metode memiliki metodologi dan kemampuan integrasi data yang berbeda. Delft3D menggunakan model elemen hingga untuk mensimulasikan perambatan gelombang dan genangan dengan resolusi spasial tinggi, sehingga sesuai untuk prediksi secara *real-time* dan interaksi pesisir yang kompleks (Kolukula dkk., 2025; Mardika dkk., 2024). Sedangkan ArcGIS menggunakan teknik Sistem Informasi Geografis

untuk menganalisis data topografi dan penggunaan lahan yang fokus mengidentifikasi daerah rentan melalui analisis elevasi berbasis skenario (Irawan dkk., 2024). Perbedaan tersebut dapat berdampak terhadap hasil akhir pemodelan, baik dari segi luasan genangan dan informasi spasial yang dihasilkan.

Penelitian ini merupakan pengembangan dari penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Sofiana dkk. (2022), yaitu pemodelan dan analisis genangan tsunami di kawasan Pantai Watu Ulo Kabupaten Jember menggunakan Delft3D. Melanjutkan hasil tersebut, penelitian ini mengadopsi pendekatan komparatif untuk mengidentifikasi perbedaan hasil pemetaan genangan tsunami antara Delft3D dan ArcGIS pada wilayah penelitian yang sama. Perbandingan dilakukan tidak hanya terhadap luasan genangan yang dihasilkan oleh masing-masing perangkat lunak, tetapi juga terhadap distribusi spasial genangan dalam kaitannya dengan karakteristik topografi wilayah pesisir.

Dengan demikian, tujuan dari penelitian ini adalah untuk menggambarkan perbedaan hasil pemetaan genangan tsunami antara pendekatan numerik berbasis Delft3D dan pendekatan spasial berbasis ArcGIS. Pemodelan menggunakan ArcGIS dalam penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan data *Digital Elevation Model* (DEM) serta parameter gelombang tsunami, yaitu tinggi gelombang maksimum di pantai yang diperoleh dari hasil simulasi Delft3D sebelumnya. Nilai tersebut kemudian digunakan dalam estimasi tinggi genangan dengan mengacu pada pendekatan *Hloss* yang dirumuskan oleh Berryman (2005). Hasil pemetaan genangan dari pendekatan ini dibandingkan dengan hasil pemodelan Delft3D untuk mengidentifikasi variasi luasan dan pola sebaran genangan tsunami pada wilayah yang sama.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan komparatif untuk membandingkan hasil pemetaan zona genangan tsunami antara dua metode pemodelan, yaitu Delft3D dan ArcGIS. Model genangan menggunakan Delft3D telah dikembangkan pada penelitian sebelumnya (Sofiana dkk., 2022), dan dalam penelitian ini hasil tersebut digunakan sebagai dasar untuk membangun model genangan dengan bantuan perangkat lunak sistem informasi geografis, khususnya dengan pendekatan *cost distance* pada ArcGIS.

Delft3D mengadopsi pendekatan numerik untuk menyelesaikan persamaan hidrodinamika air dangkal. Pendekatan ini digunakan dalam simulasi

propagasi gelombang tsunami, *run-up*, serta inundasi. Model ini juga memiliki kemampuan untuk menggambarkan interaksi gelombang dengan topografi pesisir secara dinamis.

Sebaliknya, pemodelan menggunakan ArcGIS lebih menekankan pada analisis spasial berbasis raster yang diturunkan dari data *Digital Elevation Model* (DEM), peta penggunaan lahan, dan parameter kehilangan energi gelombang (*Hloss*). Sebagai sistem informasi geografis, ArcGIS berfungsi untuk mengelola, menganalisis, dan memvisualisasikan data spasial, namun tidak dirancang untuk menangani dinamika hidrodinamik secara langsung. Oleh karena itu, interaksi antar variabel seperti tekanan gelombang terhadap permukaan darat atau efek turbulensi cenderung diabaikan dalam pendekatan ini.

Jika dalam hal kompleksitas pemodelan, Delft3D mampu mensimulasikan berbagai skenario tsunami dengan magnitudo dan konfigurasi pesisir yang berbeda, seperti yang ditunjukkan dalam penelitian di wilayah Mediterania (Borzi dkk., 2024). Meskipun Delft3D unggul dalam simulasi hidrodinamik yang detail, penggunaannya memerlukan pengoperasian perangkat lunak hingga kebutuhan komputasi yang tinggi. Sebaliknya, ArcGIS lebih mudah dioperasikan karena didukung oleh antarmuka yang sederhana serta kemampuan integrasi data spasial yang efisien, sehingga lebih mendukung penerapan dalam perencanaan kebencanaan.

Data dan Parameter Pemodelan

Data utama yang digunakan untuk pemodelan dalam ArcGIS mencakup *Digital Elevation Model* (DEM), peta penggunaan lahan, garis pantai sebagai sumber gelombang tsunami, dan ketinggian gelombang tsunami di garis pantai yang diperoleh dari hasil simulasi Delft3D yang telah dilakukan oleh Sofiana dkk. (2022) yaitu sebesar 12,57 meter. Adapun tiga parameter utama yang digunakan dalam pemetaan inundasi tsunami menggunakan ArcGIS yaitu: (1) tinggi gelombang tsunami di garis pantai; (2) kemiringan lereng wilayah yang diturunkan dari data DEM; dan (3) koefisien kekasaran permukaan berdasarkan jenis

tutupan lahan. Parameter tersebut telah banyak digunakan dalam penelitian pemodelan genangan berbasis sistem informasi geografis dan terbukti sesuai dalam menentukan tingkat kehilangan energi gelombang selama penjalaran ke wilayah daratan.

Koefisien kekasaran permukaan ditetapkan berdasarkan klasifikasi jenis tutupan lahan yang dikonversi ke dalam nilai numerik sesuai dengan rujukan beberapa penelitian terdahulu (Berryman, 2005). Misalnya, area bangunan memiliki nilai *n* sebesar 0,080, vegetasi 0,070, rawa 0,025, dan seterusnya. Penyesuaian nilai ini penting karena kekasaran permukaan memengaruhi signifikan terhadap kehilangan energi tsunami dan sebaran luasan genangan di daratan.

Persamaan Pemodelan Inundasi

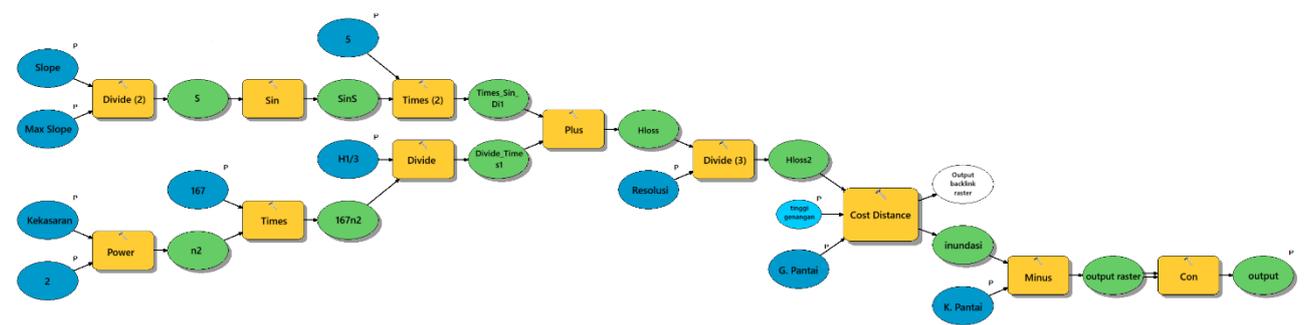
Estimasi kehilangan ketinggian gelombang tsunami selama penjalaran dihitung pada ArcGIS menggunakan rumus *Hloss* yang dikembangkan oleh Berryman (2005).

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

Hloss adalah kehilangan ketinggian tsunami per 1 meter jarak genangan atau inundasi. Sedangkan *n* adalah koefisien kekasaran permukaan, *H₀* adalah ketinggian tsunami di garis pantai, dan *S* merupakan besarnya lereng permukaan. Persamaan inilah yang kemudian digunakan dalam pemodelan inundasi di ArcGIS.

Pemodelan Tsunami di ArcGIS

Pemodelan ini diawali dengan pembuatan peta lereng (*slope*) dari data DEM untuk area yang ditinjau menggunakan fitur *spatial analyst*. Selanjutnya, peta penggunaan lahan diklasifikasi berdasarkan jenis tutupan, dan setiap kelas diberi nilai kekasaran (*n*) yang sesuai. Kedua data tersebut kemudian dikombinasikan melalui formulasi kehilangan ketinggian gelombang *Hloss* untuk menghasilkan peta raster yang merepresentasikan kehilangan energi gelombang tsunami per satuan jarak penjalaran pada masing-



Gambar 1. Model Builder

masing piksel berdasarkan kondisi topografi dan karakteristik permukaan lahan. Tahapan pemodelan ini divisualisasikan dalam *Model Builder*, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.

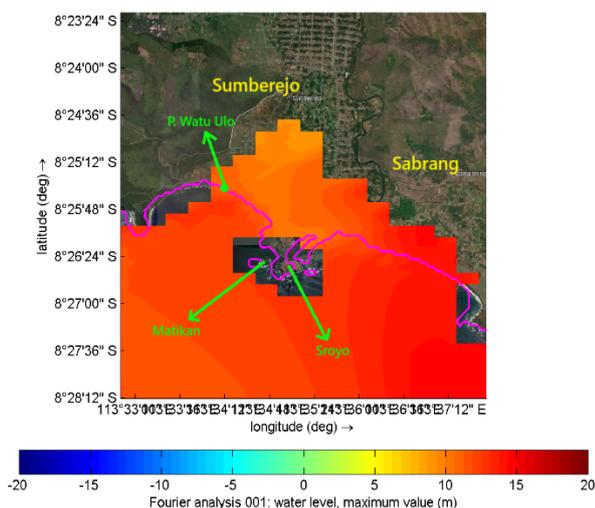
Tahap selanjutnya yang juga tergambarkan pada *model builder* adalah penetapan garis pantai sebagai titik awal penjalaran tsunami. Menggunakan *cost distance tool*, dilakukan pemodelan penyebaran inundasi tsunami menuju daratan berdasarkan akumulasi nilai kehilangan energi sepanjang jalur penjalaran. Estimasi batas maksimum inundasi tsunami diperoleh dengan mengacu pada tinggi gelombang awal (H_0) yang diperoleh dari hasil simulasi Delft3D.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis luasan genangan tsunami di kawasan Pantai Watu Ulo, Kabupaten Jember berdasarkan dua pendekatan pemodelan yang berbeda, yakni pemodelan numerik menggunakan Delft3D dan spasial berbasis sistem informasi geografis menggunakan ArcGIS.

Perbandingan Luasan Genangan Tsunami antara Delft3D dan ArcGIS

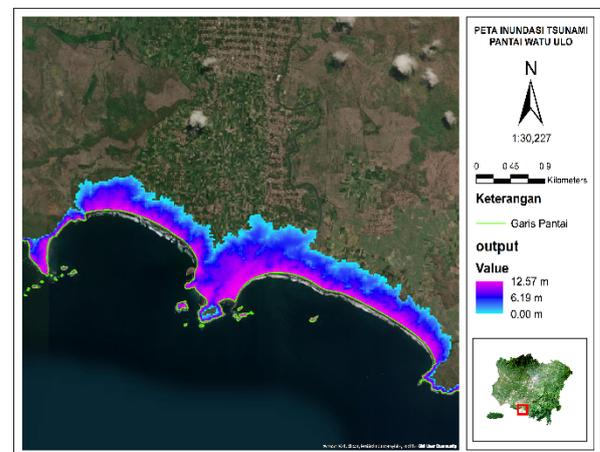
Hasil simulasi numerik menggunakan Delft3D yang telah dilakukan oleh sebelumnya (Sofiana dkk., 2022) yang dapat dilihat pada Gambar 2. Model ini mensimulasikan propagasi gelombang secara fisik menggunakan pemecahan persamaan hidrodinamika dua dimensi, yang menghasilkan sebaran genangan yang meluas pada wilayah Pantai Watu Ulo. Sebagaimana gelombang tsunami yang dihasilkan oleh skenario gempa *megathrust* Selatan Jawa menggenangi wilayah daratan seluas 884,71 ha. Genangan tersebut tersebar di dua desa utama di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember yaitu Desa Sumberejo dengan luasan 634,68 ha, dan Desa Sabrang seluas 250,03 ha.



Gambar 2. Inundasi Tsunami Menggunakan Delft3D

Sementara itu, hasil pemodelan menggunakan ArcGIS dapat dilihat pada Gambar 3. Pendekatan yang digunakan pada pemodelan ini adalah kehilangan energi gelombang (H_{loss}) berdasarkan parameter kemiringan lereng (*slope*), nilai kekasaran permukaan (n), serta ketinggian gelombang di garis pantai. Pemodelan tersebut menghasilkan luas total area terdampak akibat gelombang tsunami di Kecamatan Ambulu, Kabupaten Jember adalah 611,53 ha. Adapaun distribusi genangan masing-masing daerah di Desa Sumberejo sebesar 336,89 ha dan seluas 274,64 ha di Desa Sabrang.

Gambar 2 menunjukkan adanya area kosong yang tidak dilalui gelombang tsunami. Area ini merupakan lokasi Pulau Matikan dan Pulau Sroyo. Pada Gambar 3, Pulau Matikan tampak seluruhnya terdampak oleh gelombang tsunami, sementara Pulau Sroyo hanya terdampak sebagian. Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan pendekatan dalam pemodelan tsunami yang digunakan.



Gambar 3. Inundasi Tsunami Menggunakan ArcGIS

Pada pemodelan menggunakan Delft3D, gelombang tsunami dihasilkan dari parameter patahan gempa bumi yang didefinisikan melalui *Delft Dashboard Toolbox*. Gelombang ini kemudian dipropagasikan dari sumber gempa di laut menuju wilayah pesisir, hingga akhirnya menyebabkan inundasi di daratan. Sebaliknya, pada pemodelan menggunakan ArcGIS yang ditampilkan pada Gambar 3, gelombang tsunami diasumsikan berasal langsung dari garis pantai dengan ketinggian yang seragam di sepanjang wilayah pesisir. Kenyataannya, gelombang tsunami umumnya terbentuk akibat aktivitas tektonik berupa pergesekan antarlempeng di dasar laut. Ketika gelombang ini merambat dari laut dalam menuju daratan, terjadi interaksi dengan morfologi dasar laut yang menyebabkan variasi ketinggian gelombang. Akibatnya, ketinggian

gelombang tsunami yang mencapai pesisir cenderung tidak seragam.

Tabel 1. Perbandingan Luasan Inundasi

Desa	Inundasi (Delft3D)	Inundasi (ArcGIS)	Selisih (Ha)
Sumberejo	634,68 ha	336,89 ha	-297,79
Sabrang	250,03 ha	274,64 ha	+24,61
Total	884,71 ha	611,53 ha	-273,18

Selisih luasan genangan yang ditampilkan dalam Tabel 1 mengindikasikan adanya perbedaan karakteristik hasil pemodelan pada masing-masing wilayah. Pada Desa Sumberejo, selisih negatif yang cukup besar menunjukkan bahwa model Delft3D menghasilkan jangkauan genangan yang lebih luas akibat bentuk topografi yang terbuka dan landai, sehingga gelombang tsunami menjalar lebih jauh ke daratan tanpa hambatan spasial yang signifikan. Selain itu, penggunaan resolusi grid yang belum cukup tinggi pada wilayah daratan turut memengaruhi akurasi identifikasi area terdampak tsunami.

Sementara di Desa Sabrang, pendekatan berbasis ArcGIS menunjukkan luasan genangan yang lebih besar dibandingkan Delft3D. Hal ini menunjukkan bahwa parameter spasial seperti kekasaran permukaan dan kemiringan lereng memiliki pengaruh langsung terhadap sebaran genangan dalam pendekatan *Hloss*, terutama pada wilayah yang memiliki resistensi rendah terhadap aliran gelombang.

Implikasi terhadap Penentuan Zona Bahaya dan Mitigasi

Meskipun Delft3D menyediakan simulasi hidrodinamik yang lebih komprehensif, pendekatan ArcGIS menunjukkan keunggulan dalam aspek integrasi data spasial, efisiensi penggunaan, dan relevansi terhadap kebutuhan perencanaan wilayah berbasis data geospasial. Kedua pendekatan memiliki karakteristik yang saling melengkapi yaitu Delft3D lebih unggul dalam merepresentasikan interaksi gelombang dan topografi secara numerik, sedangkan ArcGIS lebih efektif digunakan untuk pemetaan zona rawan dan pengembangan strategi mitigasi berdasarkan kondisi spasial yang aktual. Kombinasi keduanya dapat meningkatkan akurasi dan kebermanfaatan hasil pemodelan dalam pengelolaan risiko bencana pesisir secara terpadu.

Hasil pemodelan yang terintegrasi ini menunjukkan potensi risiko bahaya berupa inundasi, kerusakan infrastruktur pesisir, ancaman terhadap keselamatan jiwa, serta terganggunya aktivitas sosial dan ekonomi masyarakat pesisir.

Tingkat risiko bervariasi dari sedang hingga tinggi, tergantung pada kedalaman genangan, kecepatan aliran, dan tingkat kerentanan wilayah yang terdampak. Rekomendasi yang dihasilkan meliputi penyesuaian zona evakuasi berbasis data terbaru, integrasi peta risiko ke dalam perencanaan tata ruang wilayah pesisir, penguatan sistem peringatan dini, serta peningkatan kapasitas masyarakat melalui edukasi kebencanaan (Almutairi dkk., 2020).

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan dalam estimasi luasan genangan yang dihasilkan oleh kedua model. Model Delft3D memproyeksikan luasan genangan sebesar 884,71 ha, sedangkan ArcGIS menghasilkan luasan sebesar 611,53 ha. Perbedaan ini mencerminkan karakteristik masing-masing pendekatan yaitu Delft3D mengandalkan pemodelan dinamika gelombang secara hidrodinamik, sedangkan ArcGIS memanfaatkan parameter topografi dan penggunaan lahan dalam pendekatan kehilangan energi gelombang.

Meskipun Delft3D unggul dalam representasi penalaran gelombang, ArcGIS lebih adaptif untuk integrasi data spasial dan pemetaan zona rawan dan strategi mitigasi bencana tsunami. Oleh karena itu, hasil penelitian ini merekomendasikan penggunaan terpadu antara kedua pendekatan untuk memperoleh hasil pemodelan yang akurat sekaligus relevan dalam perencanaan mitigasi bencana. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan validasi lapangan guna meningkatkan akurasi prediksi serta menerapkan pendekatan serupa di wilayah pesisir lain yang memiliki karakter topografi dan penggunaan lahan yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Almutairi, A., Mourshed, M., & Ameen, R. F. M. (2020). Coastal Community Resilience Frameworks for Disaster Risk Management. *Natural Hazards*, 101(2), 595–630. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03875-3>
- Anggraini, S., Koestoer, R. H. T., & Daryono. (2023). Environmental perspective on Tsunami Disaster Mitigation and Its Implications: a Critical Review. *ASEAN Natural Disaster Mitigation and Education Journal ANDMEJ*, 1(1), 20–30. <https://doi.org/10.61511/andmej.v>
- Asri, H., & Yusuf, M. (2024). Application of Remote Sensing Technology and Geographic Information Systems for Tsunami

- Vulnerability Analysis in Mamuju District. *Journal of Ocean Science and Technology Innovation*, 5(3), 244–255. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/zonalaut>
- Berryman, K. (2005). Review of Tsunami Hazard and Risk in New Zealand. Dalam *Institute of Geological and Nuclear Sciences Client Report* (Nomor September).
- Borzì, L., Scala, P., Distefano, S., Laksono, F. X. A. T., Manno, G., Innangi, S., Gamberi, F., Kovács, J., Ciralo, G., & Di Stefano, A. (2024). Tsunami Propagation and Flooding Maps: An Application for The Island of Lampedusa, Sicily Channel, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 49(14), 4842–4861. <https://doi.org/10.1002/esp.5996>
- 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>
- Ferreira, M. A., Oliveira, C. S., & Francisco, R. (2025). Tsunami Risk Mitigation: The Role of Evacuation Routes, Preparedness and Urban Planning. *Natural Hazards*, 121(4), 6719–6751. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07061-7>
- Irawan, L. Y., Islam, S. N., Sumarmi, Ardiansyah, Z. F., Dani, F. A., Fadhlurahman, I., Religi, M. D., Sari, R. R. A., & Farihah, S. N. (2024). GIS Modelling for Prediction of Tsunami Inundation Areas in Coastal Areas of Malang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1406(1), 012017. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1406/1/012017>
- Kolukula, S. S., Murty, P. L. N., Kumar, T. S., Ramarao, E. P., & Ramana, M. M. V. (2025). Tsunami Modelling Over Global Oceans. *Royal Society Open Science*, 12(1), 241128. <https://doi.org/10.1098/rsos.241128>
- Kusuma, S. H., & Ratiningsih, A. (2023). Mitigation Control on Industrial Allotment Area Plan based on Tsunami Hazard Prone Zoning Area in Purworejo Regency, Central Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1353(1), 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1353/1/012004>
- Mardika, M. G. I., Mashuri, & Hakim, D. R. (2024). Studi Modeling dan Mapping Inundasi Tsunami Menggunakan Software Delft3D Studi Kasus Pantai Labuan Jukung Lampung. *PADURAKSA: Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 13(1), 54–63. <https://doi.org/10.22225/pd.13.1.9348.54-63>
- 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), 158–173. <https://doi.org/10.30737/ukarst.v6i2.2959>
- Susiati, H., Widiawaty, M. A., Sunardi, S., Taufik, M., Kholiq, M. A., Dede, M., Afriana, N. N., Sukriah, E., & Pane, J. S. (2024). Geospatial Analysis of Tsunami Hazards and Mitigation Strategies. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1406(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1406/1/012015>