

Studi modeling dan mapping inundasi tsunami menggunakan software Delft3D studi kasus Pantai Labuan Jukung Lampung

M. Gilang Indra Mardika^{1,*}, Mashuri¹, Dandi Rahman Hakim¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung

*Corresponding authors: m.indra@si.itera.ac.id

Submitted: 5 April 2024, Revised: 20 June 2024, Accepted: 25 June 2024

ABSTRACT: To begin with, one of the valuable beaches at Pesisir Tengah Krui District is Labuan Jukung Beach that directly encounters the Indian Ocean and is crossed by tectonic plates. The current position could consequence a tsunami disaster and cause loss and damage to the area at any time soon. In addition, no hazard map released by the National Center for Volcanology and Disaster Mitigation in the study location is one of the shortcomings of tsunami-prone areas in the West Coast tourist area. Tsunami wave propagation model establishment is a monumentally vital step in tsunami mitigation to pinpoint areas which are vulnerable to tsunami disasters and maximize the damage control. One way or another is by utilizing Delft3D 4.04.01 software according to wave propagation simulation scenario analysis. The input for modeling adopts historical tsunami height data which has similar characteristics to the case study location points, simultaneously 3.6 meter, 8 meter and 15 meter. The outcome wave height of 3.6 meter takes within 36 minutes to reach the coast and it does not cause inundation, meanwhile the outcome of waves height of 8 meter and 15 meter are accomplishing a tsunami inundation on land which takes 33 - 35 minutes to approach the coast. The data used in these scenarios demands the model accuracy requirements of modeling validation by inspecting the wavelengths formed in shallow water. Based on all of these scenario modeling results, the maximum propagation scenario for an 8 meter wave height on land is 330 meter, on the other hand for a 15 meter wave height is 450 meter from the coastline.

KEYWORDS: Delft3D; tsunami modeling; wave propagation.

ABSTRAK: Salah satu pantai di Kecamatan Pesisir Tengah Krui yaitu Pantai Labuan Jukung merupakan pantai yang langsung bertemu Samudra Hindia dan letaknya berada di lintasan lempeng tektonik. Letak pantai tersebut menyebabkan adanya potensi terjadi bencana tsunami dan dampak dari bencana tersebut jika sewaktu-waktu akan terjadi. Ditambah dengan belum adanya peta *hazard* dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Nasional pada lokasi tersebut menjadikan kekurangan yang penting di lokasi rentan tsunami itu. Upaya yang dapat diberikan yaitu mengidentifikasi wilayah tersebut dengan pemodelan rambatan gelombang tsunami menggunakan software Delft3D 4.04.01 menggunakan skenario simulasi penalaran gelombang untuk memberikan mitigasi tsunami dan mengurangi dampaknya. Parameter data yang diperlukan pada pemodelan ini adalah data histori tinggi tsunami dengan karakteristik yang sama pada titik lokasi penelitian sebesar 3.6 m, 8 m, dan 15 m. *Output software* ini menunjukkan waktu penalaran dan inundasi yang ditimbulkan pada setiap skenario digunakan. Tinggi gelombang 3.6 m dalam penalarannya ke pesisir diperlukan waktu 36 menit dan tidak menghasilkan inundasi, sementara pada tinggi gelombang 8 m dan 15 m menghasilkan inundasi atau bencana di daratan dengan waktu 33 – 35 menit yang dibutuhkan gelombang mencapai pesisir. Data yang digunakan pada skenario perlu diuji validasi sebagai syarat akurasi model dengan mengamati hasil panjang gelombang pada laut dangkal. Berdasarkan hasil pemodelan skenario tsunami, rambatan maksimum di daratan berdasarkan pemetaan pada tinggi gelombang 8 m yaitu 330 m dan tinggi gelombang 15 m sejauh 450 m dari bibir pantai.

KATA KUNCI: Delft3D; pemodelan tsunami; *rambatan gelombang*.

© The Author(s) 2020. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Tsunami didefinisikan sebagai gelombang berukuran besar yang bangkit dari laut dan datang ke arah pantai (Miftarokhah, 2013). Ledakan gunung berapi di dalam laut merupakan insiden penyebab gempa bumi pada dasar laut dan tabrakan antar lempeng pada wilayah Samudra adalah hal umum penyebab timbulnya tsunami (Budiyanto et al, 2020). Peluang tingginya ancaman tsunami disebabkan oleh susunan dan proses geologi, serta perpindahan

lempeng karena wilayah Indonesia terletak pada sela Lempeng Pasifik, Eurasia, dan Indo-Australia (Hamilton, 1973). Indonesia juga menjadi peringkat kedua dari klasifikasi negara dengan kejadian terbanyak tsunami yaitu 71 kejadian atau 9% dari jumlah tsunami di dunia (Saleh et al., 2022). *Statement* di atas dapat menjadi alasan bahwa Indonesia termasuk negara yang memiliki ancaman atau rawan bencana tsunami atau gelombang ekstrim. Naik turunnya muka air laut secara periodik disebut gelombang laut dan gelombangnya mempunyai amplitudo serta dapat

dibangkitkan oleh angin akibat gesekannya antara permukaan laut atau dinamakan *capillary wave* (Trusina et al., 2023). Tsunami dapat diartikan sebuah rangkaian gelombang yang merambat dengan periode panjang. Bangkitnya tsunami disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut, keruntuhan tanah atau batuan di bawah laut, meletusnya gunung berapi, dsb (Pamuji et al., 2023).

Provinsi Lampung merupakan salah satu jalur masuk bagi masyarakat luar pulau atau Pulau Jawa untuk masuk ke Pulau Sumatera. Namun, daerah tersebut rawan akan bencana dari laut yaitu pada bagian timur dan barat. Pulau Sumatera bagian selatan terutama daerah pesisir merupakan daerah garis khatulistiwa dan berpotensi bahaya yang serius dalam kejadian tsunami (Anwar, 2021). Secara *general* daerah Lampung sensitif dengan kenaikan atau *run-up* laut akibat pengaruh transisi iklim yang bermula pada pola transformasi kecepatan angin (Pratiwi, 2021). Lampung bagian barat terutama Kabupaten Pesisir Barat ringkih akan potensi tsunami karena lokasinya berdampingan langsung sama Lempeng Eurasia (Riyadi, 2019). Sedangkan salah satu daerah padu penduduk di Pesisir Barat Lampung yaitu Bengkuntan dan Krui, terdapat pusat pertumbuhan pelabuhan dan pemberdayaan wisata (Kurniawan, 2019).

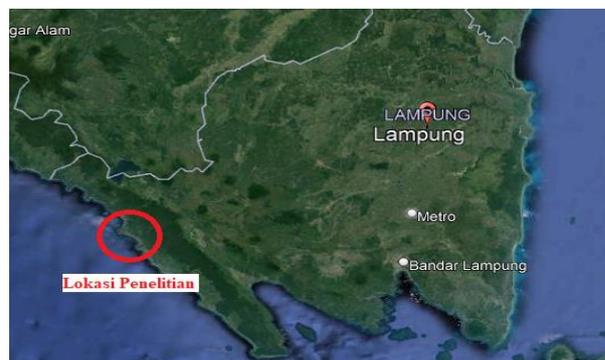
Kekurangan pada daerah risiko tsunami di daerah wisata Pesisir Barat Lampung adalah tidak memiliki peta *hazard* atau peta yang berisikan Kerentanan Rawan Bencana (KRB). Peta yang dikeluarkan oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Nasional 2020 terdapat zona merah dengan peluang terjadinya gelombang berukuran lebih dari 3 meter pada lokasi daerah wisata Pesisir Barat Lampung. Kekurangan peta tersebut akan menyebabkan kurangnya pengetahuan masyarakat mengenai gambaran waktu tiba tsunami dan daerah aman tsunami, serta kurangnya kesiapsiagaan bencana alam (Fitri et al., 2023). Tsunami merupakan bencana alam yang perlu diberi tindakan pencegahan dengan beberapa tahap dalam upaya pengurangan risiko bencana. Tahapan mencakup perencanaan seperti mitigasi, pengelolaan seperti evakuasi atau perlindungan dan evaluasi (Wulung & Abdullah, 2020). Penelitian ini sampai tahap perencanaan yaitu mitigasi atau *mapping* inundasi pada Pantai Labuan Jukung. Peta ini berisikan inundasi atau luas rendaman dan panjang rambatan (Muchlian, Honesti, & Djali, 2021).

Statement di atas mengartikan bahwa daerah pesisir barat di Pulau Sumatera berpeluang adanya gelombang laut sangat besar (Ali, 2021). Oleh karena itu perlunya mitigasi pada kawasan Pesisir Barat Lampung dengan pemodelan *mapping* rambatan gelombang tsunami dan bisa dijadikan pedoman untuk perkembangan upaya mereduksi risiko serta dampak yang ditimbulkan oleh bencana. Salah satu penyebab tsunami adalah gempa, dimana lokasi penelitian ini merupakan zona 2 yang berpotensi terjadinya gempa

dengan tsunami (Sari & Prastowo, 2022). Upaya dalam mengatasi permasalahan di atas, penelitian ini mempunyai tujuan yang akan dikaji dalam memperlihatkan pola rambatan gelombang ekstrim atau tsunami dengan memakai data historis tinggi gelombang tsunami menggunakan *software* Delft3D (Gloria et al., 2023). Harapan pada penelitian ini dapat memberikan hasil analisis yang menyediakan uraian dan keterangan secara mendasar dari analisis tsunami bagi kepentingan ilmiah. Hasil penelitian ini diharapkan dapat merencanakan atau mengelola infrastruktur kewilayahan di sekitar Pantai Labuan Jukung (Mardika, 2021). *Output* dari hasil penelitian ini adalah peta sebaran dari rambatan gelombang tsunami yang menyebabkan genangan sebagai upaya inisial dalam memitigasi bencana tsunami di lokasi studi. Kemudian, hasil penelitian ini juga akan membahas area-area yang akan terdampak pada bagian pembahasan.

2 METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan di Pantai Labuan Jukung, Lampung, gambarnya bisa dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2. Lokasi tersebut merupakan objek wisata dan memiliki ancaman peluang terjadinya tsunami tinggi. Pemilihan lokasi ini berdasarkan peta zona merah yang dirilis oleh Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Potensi terjadinya gelombang pada lokasi penelitian berdasar PVMBG yakni di atas 3 meter dan dapat dilihat pada Gambar 4.

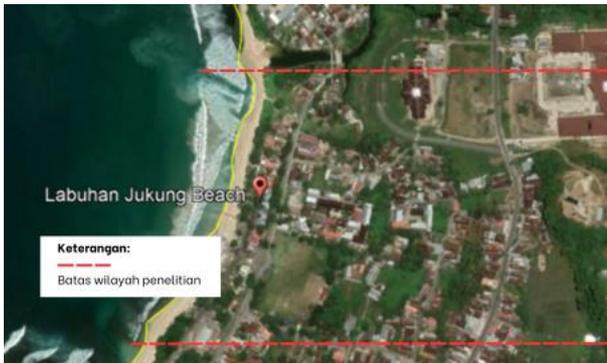


Gambar 1. Peta Wilayah Provinsi Lampung (Google Earth, 2022)

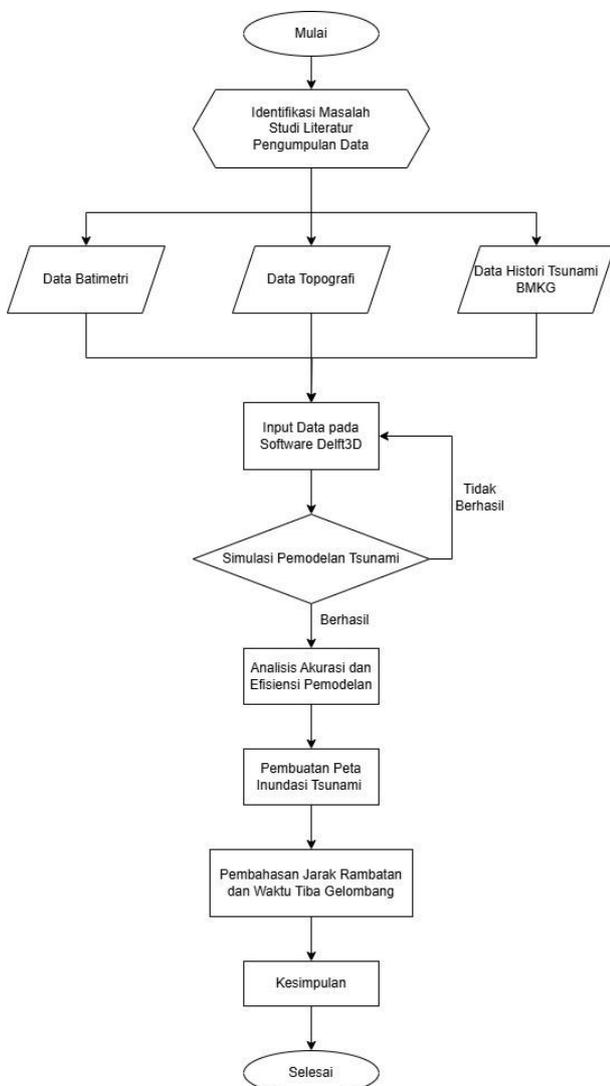
Berikut batasan lokasi berdasarkan geografis yakni:

1. Letak kawasan Pantai Labuan Jukung secara batas utara mempunyai koordinat 5.18° lintang selatan dan 103.931° bujur timur.
2. Letak kawasan Pantai Labuan Jukung secara batas timur mempunyai koordinat 103.931° bujur timur dan 5.19° lintang selatan.
3. Secara arah selatan, letak daerah Pantai Labuan Jukung mempunyai koordinat 5.19° lintang selatan dan 103.930° bujur timur.

- Secara arah barat, letak daerah Pantai Labuan Jukung memiliki letak koordinat 103.930° bujur timur. Dan 5.18° lintang selatan.



Gambar 2. Peta Kawasan Pantai Labuan Jukung (Google Earth, 2022)



Gambar 3. Diagram alir pemodelan inundasi tsunami

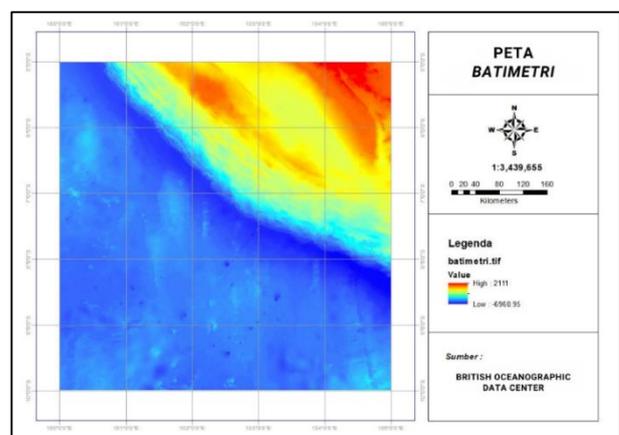
Penelitian ini memakai metode kuantitatif dengan studi kasus untuk memodelkan rambatan dan inundasi gelombang tsunami di Pantai Labuan Jukung. Metode

penelitian dengan kuantitatif merupakan metode yang datanya berupa statistik dan digunakan pada analisis data dengan tujuan menentukan deskripsi mengenai situasi dan kejadian yang diteliti saat waktu dan tempat tertentu (Sugiyono, 2009). Pemodelan tsunami yang dibuat dengan *software* Delft Dashboard dan Delft3D-Flow (Faradella et al., 2024). *Flowchart* penelitian ini dapat dilihat Gambar 3. *Output* dari pemodelan akan dianalisis dan didapatkan informasi mengenai inundasi atau tingkat genangan dan durasi tiba gelombang dengan data historis gelombang tsunami. Hasil pemodelan juga dipakai sebagai data untuk mengidentifikasi kawasan yang terdampak dan penanganannya. Kawasan Pantai Labuan Jukung yang rentan terhadap tsunami dapat menjadi *center* atau patokan dalam penanganan dan pengembangan manajemen risiko yang cocok dan tepat (Armono, 2021).

Adapun data sekunder yang digunakan dalam mendukung penelitian ini yaitu:

2.1 Batimetri

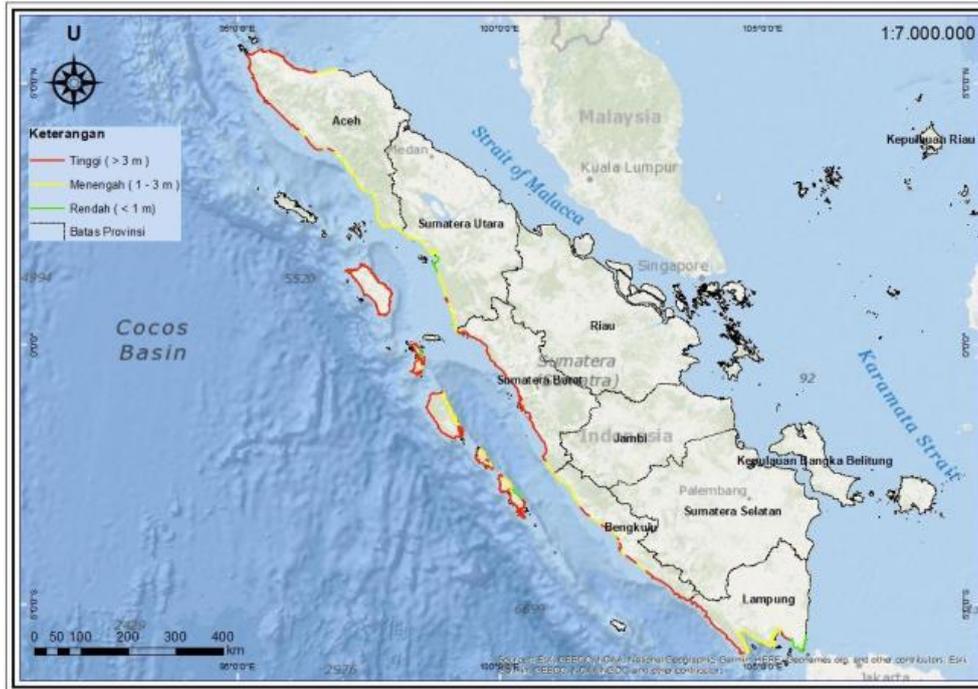
Peta *bathymetri* adalah data yang penting dalam pemodelan tsunami dan data ini diperoleh dari *website General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO)* dengan versi Gebco_08. Data ini dapat dilihat pada Gambar 4 yang dibuat dalam bentuk peta. Kumpulan data ini berupa grid batimetri dari GEBCO dan dimodelkan dalam elevasi.



Gambar 4. Peta bathymetri (British Oceanographic Data Center, 2023)

2.2 Peta potensi tinggi tsunami Pulau Sumatera

Peta potensi ini dapat dilihat pada Gambar 5, dimana data ini dirilis dan didapatkan dari Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) berdasarkan data dari peta Kerentanan Rawan Bencana (KRB) di tahun 2020. Peta tersebut menunjukkan bahwa terdapat peluang terjadinya tsunami di sepanjang garis pantai di Pesisir Barat Provinsi Lampung dengan potensi tinggi gelombang 3 meter. Oleh karena itu, adanya risiko yang substansial pada wilayah tersebut terhadap bencana tsunami.



Gambar 5. Peta potensi gelombang tinggi wilayah Sumatera (Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi, 2020)

Tabel 1. Daftar tinggi tsunami substansial

No.	Waktu Kejadian	Mag. Gempa	Sumber Tsunami	Lokasi		H (m)	Referensi
				Lat	Lon		
1	11-11-2004	7.5	Barat Daya Banda Aceh, Megathrust Sumatera	3.295	95.982	5 - 30	BMG, Borrero (2005), EERI report.
2	12-09-2007	8.4	Bengkulu	-4.438	101.367	3.6	BMG, BAKOSURTANAL, Borrero <i>et al.</i> (2009).
3	25-10-2010	7.7	Mentawai, Sumatera Barat	-3.57	99.93	6 - 12	BMKG, LIPI, Kerpen <i>et al.</i> (2011).

2.3 Data Histori Tsunami

Berdasarkan besar potensi gelombang dari peta Kerentanan Rawan Bencana (KRB), dapat disimpulkan dengan nilai histrotis tinggi tsunami yang pernah terjadi pada wilayah sekitar lokasi penelitian. Besarnya data gelombang ini dijadikan parameter pada pemodelan Delft3D dengan daftar histori pada tahun 2000-2018 yang substansial dan dikeluarkan oleh (PVMBG) seperti Tabel 1.

Data-data yang sudah dikumpulkan akan diolah untuk menjadi data input dalam proses pemodelan tsunami menggunakan Delft3D. Berikut merupakan pendekatan numerik persamaan pengatur sistem dalam *software* Delft3D memakai persamaan momentum dan persamaan kontinuitas dengan ketepatan nilai yang hanya diterapkan pada gelombang sangat panjang atau $kh < 0.25$ (panjang gelombang > 25 kedalaman air) dengan menggunakan Metode Sistem Multi Grid guna

meningkatkan akurasi dan efisiensi pemodelan pada area simulasi (Wang, 2009), seperti berikut:

$$\partial\zeta + \partial[(d+\zeta)U] + \partial[(d+\zeta)V] \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial u}{\partial \sigma} - fv = -\frac{1}{\rho} P_u + F_u + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial u}{\partial \sigma} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\omega}{d+\zeta} \frac{\partial v}{\partial \sigma} + fu = -\frac{1}{\rho} P_v + F_v + \frac{1}{(d+\zeta)^2} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(V_v \frac{\partial v}{\partial \sigma} \right)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial \sigma} = -\frac{\partial \zeta}{\partial t} - \frac{\partial[(d+\zeta)u]}{\partial x} - \frac{\partial[(d+\zeta)v]}{\partial y} + H(q_{in} - q_{out}) + P - E \dots\dots\dots (2)$$

Dalam skema 2D yang akan diterapkan pemodelan, persamaan di atas direduksi sehingga hanya komponen u dan v yang akan dianalisis dalam menentukan kecepatan rambat, yang konsekuensinya

akan mempengaruhi tinggi dan fase gelombang sebagai berikut:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial[(d+\zeta)u]}{\partial x} + \frac{\partial[(d+\zeta)v]}{\partial y} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial u}{\partial x} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + gu \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{C^2(h+\zeta)} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + gv \frac{\sqrt{u^2+v^2}}{C^2(h+\zeta)} = \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}$$

Keterangan: t = waktu (s); x,y,z = sumbu koordinat arah, longitudinal, transversal dan vertikal (°); u, v, w = kecepatan sesaat pada aliran arah x, y dan z (m/s); P, Q = fluks volume dalam arah x dan arah y (LT⁻¹); gx, gy, gz = percepatan gravitasi arah x, y dan z (m²/s); τij = nilai tegangan geser arah j yang bekerja pada bidang tegak lurus sumbu i (Pa); H = kedalaman air total (m); fu, fv = gesekan di arah x dan y (N).

Mengetahui dan mengecek periode serta panjang gelombang yang terbentuk merupakan komponen krusial dalam menganalisis akurasi hasil pemodelan dengan persamaan berikut (Triatmodjo, Perencanaan Bangunan Pantai, 2006).

$$T = \frac{t}{n} \dots\dots\dots (4)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana: L = panjang gelombang (m), g = percepatan gravitasi (m/s²), T = periode (s), h = tinggi gelombang (m), d = kedalaman laut (m).

Pada skenario input berdasarkan data tinggi histori tsunami, dipilih kejadian-kejadian tsunami signifikan di masa lampau yang memiliki kesamaan karakteristik seperti letak posisi yang terletak di bagian barat Pulau Sumatera serta berhadapan langsung dengan Lempeng-Indoaustralia sehingga diharapkan dapat mendekati keadaan sebenarnya apabila bencana terjadi pada lokasi studi kasus yaitu di Pantai Labuan Jukung, Kabupaten Pesisir Barat, Provinsi Lampung. Dalam perencanaan pemodelan tsunami menggunakan Delft3d-flow, dibutuhkan besaran gempa yang kemudian akan dikonversikan oleh toolbox tsunami pada Delft Dashboard menjadi tinggi gelombang sesuai skenario histori tinggi tsunami. Berikut persamaan konversi besaran gempa menjadi tinggi gelombang (Triatmodjo, Teknik Pantai, 1999).

$$m = 2.26 M - 14.18 \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan: m = besaran tsunami, M = besaran gempa (Magnitudo).

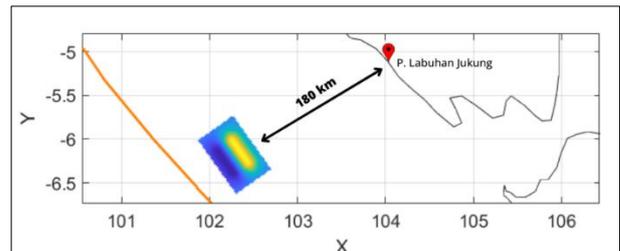
Pada hasil perhitungan yang dilakukan menggunakan Persamaan 6 dan jarak patahan yang telah diukur menggunakan Citra Satelit Google Earth yang tertuang dalam Gambar 6 didapat parameter data-data input model yang tercantum pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Skenario besaran gempa

Tinggi skenario gelombang (m)	Batas Bawah (m)	Batas Atas (m)	Besaran Gempa (SR)
3.6	3.1	4.1	6.96
8	7	10	7.491
15	12.8	17.6	7.867

Tabel 3. Skenario patahan gempa

Tinggi Skenario Gelombang (m)	Besaran Gempa (SR)	Jarak Patahan Gempa ke Lokasi Studi Kasus (km)	Dip (°)	Slip (m)	Rake (°)
3.6	6.96		15	21	90
8	7.491	180	15	45	90
15	7.867		15	85	90



Gambar 6. Jarak patahan gempa ke lokasi studi kasus

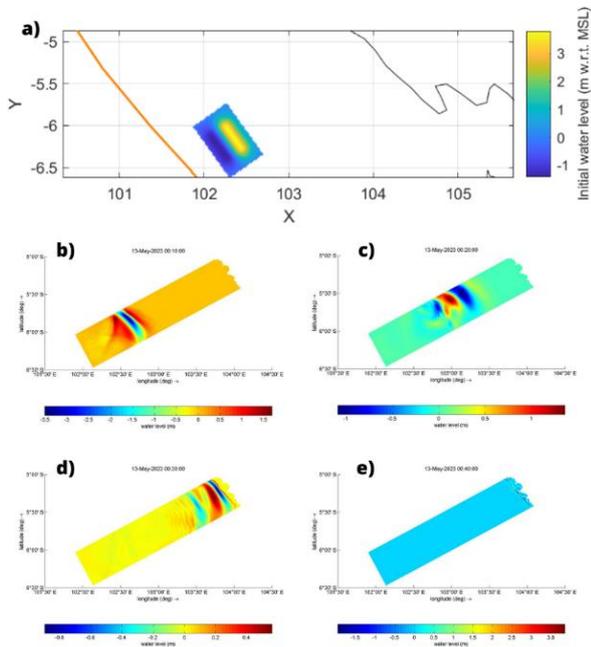
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Penjalaran Gelombang

3.1.1 Skenario 1 (input data pada Delft3D dalam pembentukan gelombang tsunami setinggi 3.6 meter)

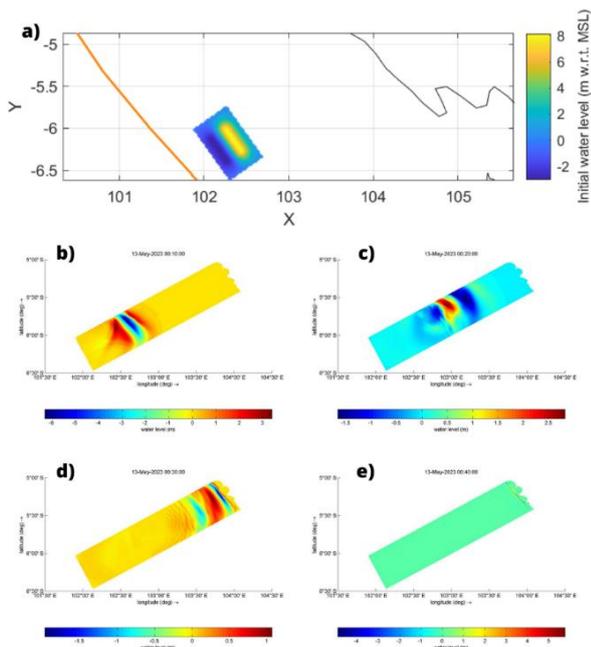
Visualisasi atau penggambaran hasil pemodelan pada jenis skenario 1 digambarkan dalam interval waktu setiap 10 menit, di mana x adalah koordinat bujur dan y merupakan koordinat lintang pada gambar. Berdasarkan hasil legenda dari simulasi pendistribusian sebaran gelombang 3.6 meter yang terbentuk pada Gambar 7, menunjukkan bahwa sebagian besar elevasi permukaan air maksimum pada model mencapai 0.6 - 3.6 meter. Pembahasan terkait dengan Gambar 7 dapat diimplikasikan pada 10 menit pertama hasil dari pemodelan, ketinggian maksimum gelombang mencapai 1.6 meter dan secara perlahan nilai ketinggian berkurang dengan kontinu pada menit 30 dengan ketinggian 0.6 meter. Namun, akibat dari perubahan batimetri atau kedalaman perairan terjadi transformasi gelombang dari ketinggian amplitudo

gelombang yang merambat semakin meningkat sampai dengan kurang lebih 3.5 meter seiring dengan jarak yang semakin dekat dengan daratan. Maka *run-up* dari gelombang tsunami terjadi hanya di sekitar garis pantai pada lokasi studi.



Gambar 7. Elevasi permukaan air spasial gelombang 3.6 meter: a) elevasi awal, b) 10 menit, c) 20 menit, d) 30 menit, e) 40 menit.

3.1.2 Skenario 2 (input data pada Delft3D dalam pembentukan gelombang tsunami setinggi 8 meter)

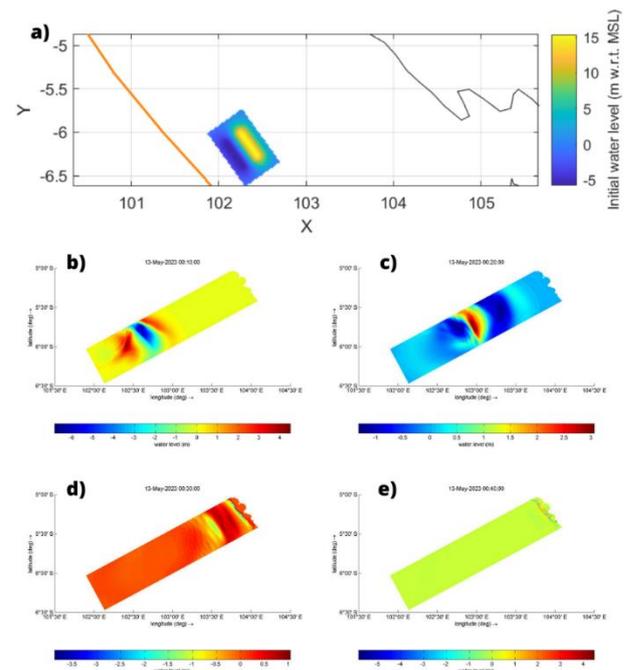


Gambar 8. Elevasi permukaan air spasial gelombang 8 meter: a) elevasi awal, b) 10 menit, c) 20 menit, d) 30 menit, e) 40 menit.

Pada simulasi pendistribusian sebaran gelombang 8 meter yang terbentuk pada Gambar 8, menunjukkan bahwa elevasi permukaan air maksimum berkisar antara 1 – 6 meter. Pada menit ke-20, gelombang memiliki tinggi 2.6 meter yang semakin berkurang pada menit ke-30 dan bertambah tinggi kembali saat mendekati pesisir hingga mencapai tinggi 6 meter.

3.1.3 Skenario 3 (input data pada Delft3D dalam pembentukan gelombang tsunami setinggi 15 meter)

Selanjutnya pada simulasi pendistribusian sebaran gelombang tertinggi yaitu gempa yang menghasilkan gelombang 15 meter seperti pada Gambar 9, menunjukkan bahwa elevasi permukaan air maksimum pada menit ke-10, 20, 30 dan 40 menit berkisar 1 – 4.5 meter. Elevasi maksimum pada gelombang 15 meter lebih rendah dibanding gelombang 8 meter dikarenakan pada visualisasi ditetapkan dalam waktu per-10 menit, sedangkan gelombang maksimum terjadi di antara celah waktu rentang tersebut.



Gambar 9. Elevasi permukaan air spasial gelombang 15 meter: a) elevasi awal, b) 10 menit, c) 20 menit, d) 30 menit, e) 40 menit.

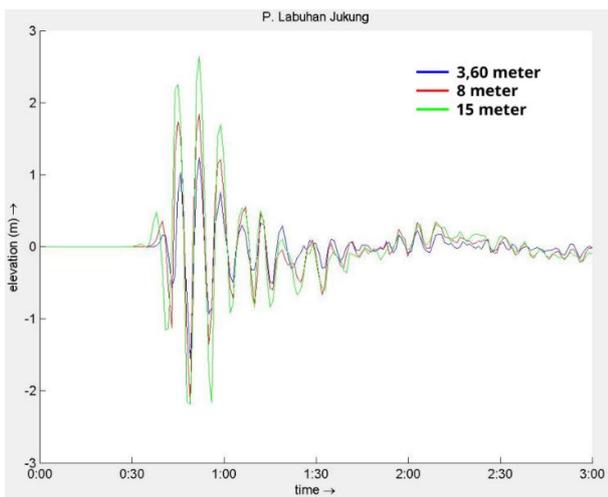
Tinggi dan waktu tiba gelombang tsunami pada lokasi titik observasi yaitu di Pantai Labuan Jukung berdasarkan elevasi permukaan air maksimum yang diperoleh dari simulasi. Berdasarkan skenario data histori tinggi tsunami, hasil analisis tinggi dan waktu tiba tsunami pada pesisir Pantai Labuan Jukung dapat dilihat pada Tabel 4.

Ketinggian maksimum gelombang tsunami pada waktu tiba di pesisir Pantai Labuan Jukung yang diinput berdasarkan data histori tinggi tsunami yaitu

mencapai 2.6 meter, yang membutuhkan waktu selama 33 – 36 menit. Hubungan antara tinggi dan waktu tiba gelombang tsunami dapat dilihat pada Gambar 10.

Tabel 4. Tinggi dan waktu tiba tsunami

Lokasi	Tinggi Tsunami (meter)	Waktu Tiba (menit)
Pantai Labuan Jukung	3.6	36
	8	35
	15	33



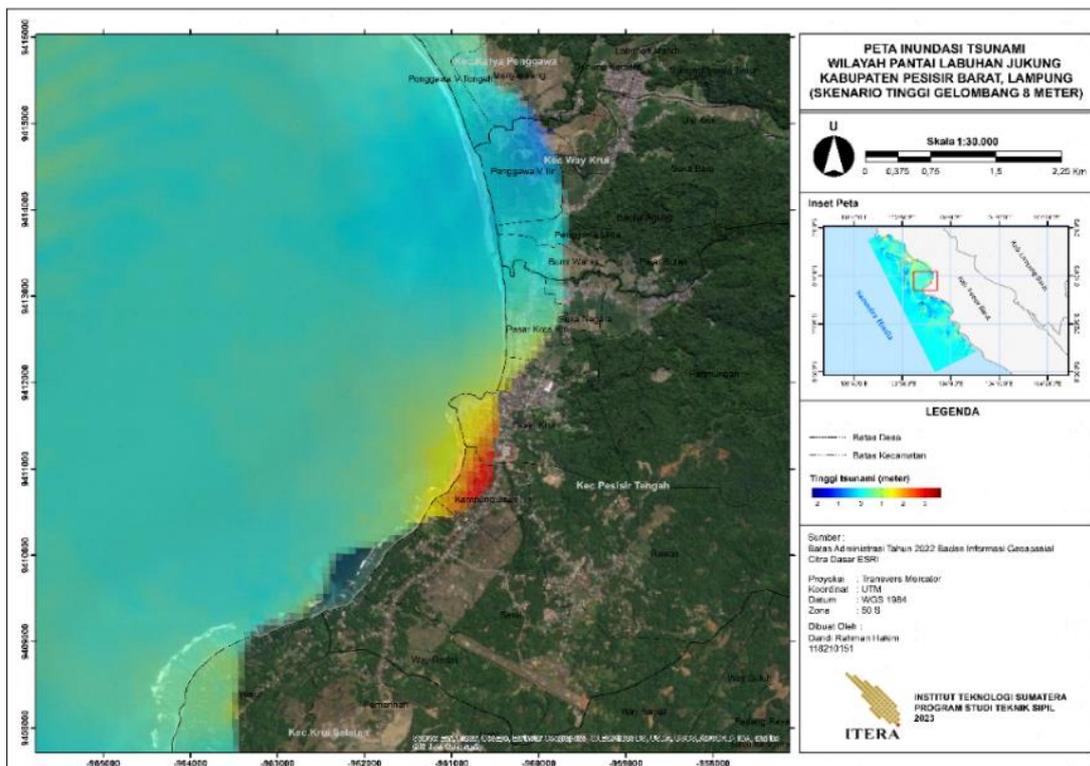
Gambar 10. Ketinggian gelombang tsunami

3.2 Identifikasi Area Genangan Tsunami

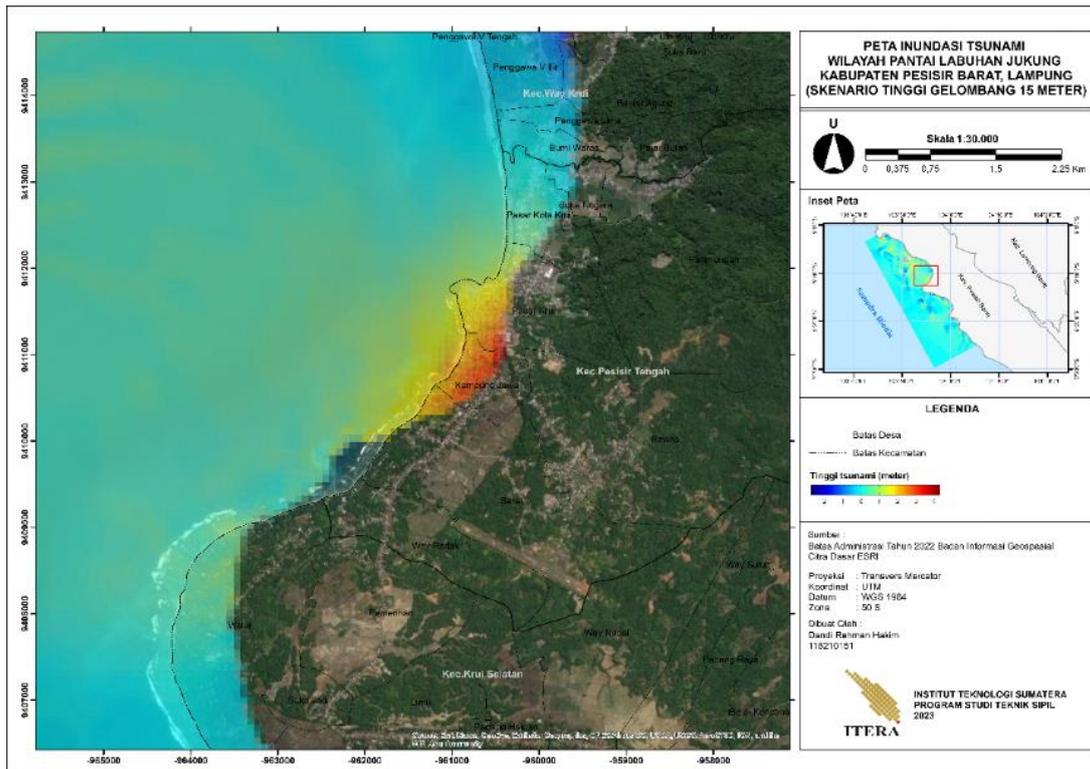
Hasil identifikasi tinggi gelombang dan jarak maksimum rambatan gelombang yang berhasil mencapai wilayah daratan Pantai Labuan Jukung yaitu pada skenario gelombang berdasarkan data tinggi histori tsunami dengan ketinggian 8 dan 15 meter. Pada studi ini dilakukan pemetaan dengan menggunakan bantuan software GIS. Berikut adalah peta genangan (inundasi) hasil pemodelan Delft3D akibat gelombang tsunami dengan ketinggian 8 dan 15 meter.

Berdasarkan hasil identifikasi peta inundasi yang dapat diamati pada Gambar 11, terlihat bahwa skenario dengan bangkitan ketinggian gelombang akibat gempa setinggi 8 meter berhasil mencapai daerah pesisir pantai dalam waktu 35 menit setelah terjadi gempa, dan terus menjalar ke daratan. Dalam skenario tersebut, tercatat bahwa jarak maksimal rambatan tsunami adalah 330 meter dari tepi pantai pada wilayah wisata Pantai Labuan Jukung. Gelombang yang merambat di daratan mencapai tinggi maksimum sebesar 4 meter, menyebabkan terendamnya kawasan wisata Pantai Labuan Jukung.

Dampak tsunami tidak hanya terbatas pada kawasan pariwisata, tetapi juga meluas ke pemukiman penduduk, sekolah, pasar, masjid, dan bahkan mencapai kawasan perkantoran seperti kantor PLN, kantor Dinas Pariwisata Pesisir Barat, serta kantor DPRD Kabupaten Pesisir Barat. Tsunami dengan gelombang yang menghantam dengan kekuatan sedemikian besar menyebabkan kerugian yang signifikan pada infrastruktur dan fasilitas publik.



Gambar 11. Peta inundasi tsunami 8 meter



Gambar 12. Peta inundasi tsunami 15 meter

Sedangkan hasil identifikasi peta inundasi yang ditunjukkan pada Gambar 12. dengan skenario bangkitan ketinggian gelombang akibat gempa setinggi 15 meter berhasil mencapai daerah pesisir pantai dalam waktu 33 menit setelah gempa terjadi dan terus menjangar ke daratan. Jarak jangkauan maksimal pada skenario ini yaitu sekitar 450 meter dari garis pantai. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi skenario bangkitan tinggi gelombang, semakin cepat pula waktu yang diperlukan gelombang untuk mencapai wilayah daratan dan semakin jauh pula jangkauan maksimal dari rambatan gelombang tersebut.

Berdasarkan jarak jangkauan gelombang yang diperoleh pada skenario ini menunjukkan hasil rambatan yang lebih jauh dibanding skenario bangkitan gelombang 8 meter, sehingga infrastruktur yang terdampak juga semakin banyak. Pada skenario ini menenggelamkan pemukiman penduduk yang lebih jauh, sekolah, pasar, masjid bahkan sampai Kantor Bupati Pesisir Barat.

Faktor-faktor yang mempengaruhi tingginya gelombang tsunami yang menghantam kawasan wisata Pantai Labuan Jukung yaitu karena lokasi pantai tersebut berada pada limpasan datangnya gelombang tsunami yaitu dari arah menyamping. Tak hanya itu, refraksi dari pembentukan gelombang juga mengakibatkan penjalaran pola gelombang yang lebih dominan pada lokasi tersebut. Pengaruh lain seperti geografi dan topografi di sepanjang garis pantai juga mengakibatkan pola gelombang cenderung mengarah ke lokasi pantai Labuan Jukung. Hal ini terjadi karena keberadaan Bukit Selalau di arah timur pantai Labuan

Jukung sehingga gelombang yang seharusnya menghempas secara bebas pada garis pesisir pantai, terhalang oleh bukit tersebut yang menyebabkan gelombang terakumulasi ke arah pantai Labuan Jukung dan sekitarnya.

3.3 Akurasi dan Efisiensi Hasil Pemodelan

Pendekatan keakurasian dan efisiensi dalam pemodelan gelombang tsunami merupakan tahap kritis untuk memastikan akurasi dan keandalan model. Salah satu parameter penting yang perlu divalidasi adalah panjang gelombang. Akurasi dan efisiensi berdasarkan ketentuan yang dikembangkan oleh Wang pada tahun 2009 dapat membantu mengukur sejauh mana akurasi hasil pemodelan gelombang tsunami dengan Delft3D. Perhitungan periode gelombang dan panjang gelombang yaitu menggunakan persamaan 4 dan 5 dengan mengambil sampel pada setiap periode gelombang pertama, serta menghitung nilai bilangan gelombang (Tabel 5).

Tabel 5. Periode dan panjang gelombang

Gelombang (m)	T (s)	L (m)	k
3.6	360	406.54	0.007
8	420	651.12	0.0015
15	480	830.28	0.0012

Berdasarkan ketentuan Wang (2009) dengan menggunakan metode sistem *multi grid* mengenai akurasi pemodelan yang diperuntukkan bagi

gelombang dengan panjang yg ekstrim yaitu $kh < 0.25$ (panjang gelombang > 25 kedalaman air) dengan menganggap bahwa ketinggian permukaan air rata-rata dan dasar laut pada sensor gauge di pesisir pantai yaitu maksimal 3 meter, maka perhitungannya sebagai berikut:

1. Gelombang skenario 3.6 m
 $kh < 0.25$ (406.54 m) > 25 (3 m)
 $(0.007)(3) < 101.635$ m > 75 m
 0.021 m < 101.635 m > 75 m (Memenuhi)
2. Gelombang skenario 8 m
 $kh < 0.25$ (651.12 m) > 25 (3 m)
 $(0.0015)(3) < 162.78$ m > 75 m
 0.0045 m < 162.78 m > 75 m (Memenuhi)
3. Gelombang skenario 15 m
 $kh < 0.25$ (830.28 m) > 25 (3 m)
 $(0.0012)(3) < 207.57$ m > 75 m
 0.0036 m < 207.57 m > 75 m (Memenuhi)

Berdasarkan hasil dari perhitungan pengujian nilai akurasi dan efisiensi, hasil perhitungan panjang gelombang yang terbentuk dari ketiga skenario yang dibuat pada penelitian ini yaitu memenuhi syarat batas akurasi pemodelan pada laut dangkal dimana nilai seperempat panjang gelombang melebihi dari 3 kali nilai kedalaman sehingga simulasi tidak menemukan error pada perhitungan numerik. Dengan demikian dapat dikatakan pemodelan menggunakan software Delft3D memiliki akurasi tinggi dalam memodelkan suatu gelombang tsunami.

4 KESIMPULAN

Pada hasil penjalaran gelombang pada simulasi skenario data tinggi gelombang histori tsunami dengan ketinggian gelombang 3.6 m, *run up* tsunami ke daratan tidak terbentuk namun berhasil mencapai pesisir dengan membutuhkan waktu selama 36 menit. Penjalaran gelombang dengan ketinggian gelombang 8 m membutuhkan waktu 35 menit untuk mencapai daerah pesisir, sedangkan gelombang dengan ketinggian 15 m membutuhkan waktu hanya 33 menit untuk mencapai pesisir sejak terjadinya gempa. Kedua gelombang dengan tinggi 8 m dan 15 m diidentifikasi mengakibatkan tsunami pada daerah Pantai Labuan Jukung Krui. Berdasarkan hasil pemodelan Delft3D, jarak maksimal rambatan yang berpotensi tergenang akibat gelombang histori tsunami setinggi 8 m yaitu sejauh 330 m, sementara untuk gelombang histori tsunami setinggi 15 m yaitu sejauh 450 m. Sementara itu, hasil gelombang yang terbentuk berdasarkan ketiga skenario yang dilakukan memenuhi ketentuan (Wang, 2009) syarat akurasi model pada laut dangkal dengan periode dan panjang gelombang pada simulasi ketinggian 3.6 meter yaitu 360 s dan 406.54 m, ketinggian 8 meter yaitu 420 s dan 651.12 m dan ketinggian 15 meter yaitu 480 s. Hal ini menunjukkan *software* Delft3d memiliki akurasi yang tinggi dan bisa

digunakan dalam memodelkan gelombang tsunami. Saran untuk penelitian selanjutnya dapat berupa pemodelan menggunakan *software* lainnya dan juga dapat melakukan uji model fisik di laboratorium guna mendapatkan gambaran dalam bentuk prototipe terkait dengan rambatan gelombang tsunami dari sumber patahan sampai ke daerah dataran.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, I. A. (2021). Modelling of Wave Height for the Study of Ocean Wave Energy in the West of Lampung Province. *Jurnal Ilmiah Teknologi Maritim*, 15(2).
- Anwar, S. (2021). Perbandingan Nilai Hazard Kejadian Tsunami di Indonesia Berdasarkan Posisi Garis Khatulistiwa (Katalog Tsunami Indonesia 1802-2018). *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 12(1), 33-45.
- Armono, H. D. (2021). Analysis of Tsunami Wave Height, Run-up, and Inundation in the Coastal of Blitar and Malang Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 936(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/936/1/012013>.
- Budiyanto, D., Septiana, T., & Muda, M. A. (2020). Pemanfaatan Analisis Spasial untuk Pemetaan Risiko Bencana Alam Tsunami Menggunakan Pengolahan Data Spasial Sistem Informasi Geografis. *Kumpulan Jurnal Ilmu Komputer (KLIK)*, 07(02), 210-218.
- Faradella, M., Wiyono, R. U., & Halik, G. (2024). Tsunami Simulation in Paseban Beach Using Nesting Method on Delft3D Modeling. *Rekayasa Sipil*, 18(1), 41-48.
- Fitri, E. A., Karyadi, B., Johan, H., & Farid, M. (2023, maret). Model E-Booklet Fisika Terintegrasi Mitigasi Bencana Tsunami Pada Materi Gelombang Untuk Siswa di Pulau Enggano. *JPF (Jurnal Pendidikan Fisika) FKIP UM Metro*, 11(1), 79-93.
- Gloria, L. E., Wiyono, U. A., & Halik, G. (2023). Simulation of High Wave Inundation at Payangan Beach Using Delft3D for Coastal Mitigation. *U Karst*, 07(01), 61-74.
- Hamilton, W. (1973). Tectonics of the Indonesian Region. *Bulletin of the Geological Society of Malaysia*, 6, 3-10.
- Kurniawan, F. (2019). *Pemodelan Tsunami dan Alternatif Jalur Evakuasi Berbasis Sistem Informasi Geografi di Kecamatan Krui Selatan Kabupaten Pesisir Barat Tahun 2019*. Universitas Lampung, Bandar Lampung.
- Mardika, G. I. (2021). Analisis Pasang Surut Menggunakan Metode Least Square di Wilayah Perairan Muara Sungai Poso. *Journal of Infrastructure Planning, and Design*, 1(2).
- Miftarokhah, A. (2013). *Kerentanan Bencana Tsunami di Pantai Barat Kabupaten Pandeglang*.
- Muchlian, M., Honesti, L., & Djali, N. (2021). Studi Komparasi antara Peta Inundasi Tsunami Hasil Pemodelan TUNAMI N3 dengan Peta Topografi Daerah. *Jurnal Teknik Sipil ITP*, 8(2), 46-51.
- Pamuji, D., Setiadji, P., & Karapa, E. (2023). Strategi Pengelolaan Wilayah Pesisir Kabupaten Sarmi Dalam Upaya Mitigasi Tsunami. *Jurnal Arsitektur dan Planologi*, 13(1), 27-33.
- Pratiwi, D. &. (2021). *Analisis Potensial Penjalaran Gelombang Tsunami di Pesisir Barat Lampung, Indonesia*.
- Riyadi, R. (2019). Analisis Peta Bentuk Rupa Bumi Dalam Menentukan Lokasi Dari Pengaruh Tsunami di Kabupaten Cilacap. *Ijtimaiya: Journal of Social Science Teaching*, 3(2), 86-186.
- Saleh, D. F., Baeda, A. Y., & Rahman, S. (2022). Skema Mitigasi Tsunami Mendatang di Pelabuhan Garongkong,

- Barru, Sulawesi Selatan. *Jurnal Riset & Teknologi Terapan Kemaritiman*, 1(2), 42-46.
- Sari, I. N., & Prastowo, T. (2022). Analisis Seismisitas Potensi Bahaya Bencana Seismik Di Wilayah Selatan Pulau Sumatera. *Jurnal Inovasi Fisika Indonesia*, 11(2), 12-19.
- Sugiyono. (2009). *Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif dan R&D*. Bandung: ALFABETA.
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai* (5 ed.). Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2006). *Perencanaan Bangunan Pantai* (2nd ed.). Yogyakarta: Beta Offset.
- Trusina, Fahmi, M., Ibrahim, Fachrurrazi, & Al'ala, M. (2023). Studi Perencanaan Jetty pada Muara Pembuangan Air (Stormwater Outfall) di PT Perta Arun Gas, Lhokseumawe. *Jurnal Teknik Sipil*, 15(2), 36-46.
- Wang, X. (2009). User Manual For Comcot Version 1.7 (First Draft). Cornell University. USA.
- Wulung, S. R., & Abdullah, C. U. (2020, Februari). Upaya Mitigasi Pasca Tsunami di Destinasi Pariwisata. *Open Journal Systems*, 14(7), 2883-2893.