

**SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI DI WILAYAH  
TELUK LAMPUNG DENGAN VARIASI SKENARIO GEMPA**

**SKRIPSI**

**Oleh**

**M. Naufal Al Farabi  
NPM 2214221030**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

**SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI DI WILAYAH  
TELUK LAMPUNG DENGAN VARIASI SKENARIO GEMPA**

**Oleh**

**M. NAUFAL AL FARABI**

**Skripsi**

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar**

**SARJANA SAINS**

**Pada**

**Jurusan Perikanan dan Kelautan**

**Fakultas Pertanian Universitas Lampung**



**FAKULTAS PERTANIAN  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2026**

## ABSTRAK

### SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI DI WILAYAH TELUK LAMPUNG DENGAN VARIASI SKENARIO GEMPA

Oleh

M. NAUFAL AL FARABI

Teluk Lampung merupakan perairan semi-tertutup di selatan Sumatra dengan batimetri dan morfologi pesisir yang kompleks, sehingga rentan terhadap amplifikasi gelombang tsunami. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik penjalaran gelombang tsunami, waktu tiba, tinggi gelombang maksimum, dan luas inundasi berdasarkan tiga skenario sumber gempa: megathrust Selat Sunda Mw 9,2, Sesar Semangko Timur B Mw 7,5, dan Sesar Ujung Kulon A Mw 7,3. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak JAGURS dengan konfigurasi *nested grid* lima tingkat resolusi (2430–30 m) yang dibangun dari data GEB-CO, DEMNAS, dan BATNAS. Parameter sumber gempa dihitung menggunakan hukum skala Wells & Coppersmith (1994) untuk skenario sesar dan Strasser et al. (2010) untuk subduksi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario Mw 9,2 menghasilkan deformasi awal terbesar (*uplift* 7,6 m), tinggi gelombang maksimum 7,72 m di Sukaraja, dan luas inundasi 57,19 km<sup>2</sup>. Skenario Mw 7,5 dan Mw 7,3 menghasilkan inundasi jauh lebih kecil, masing-masing 7,36 km<sup>2</sup> dan 3,80 km<sup>2</sup>. Waktu tiba gelombang pada skenario Mw 9,2 berkisar 25,8–84,0 menit, sedangkan skenario Mw 7,3 menghasilkan waktu tiba tercepat 9,1 menit di Krakatau. Amplifikasi gelombang tertinggi terjadi di bagian dalam teluk akibat efek konvergensi energi, shoaling, dan resonansi pada perairan semi-tertutup. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahaya tsunami di Teluk Lampung dikontrol tidak hanya oleh magnitudo gempa, tetapi juga oleh batimetri lokal, orientasi garis pantai, dan topografi pesisir, sehingga dapat menjadi dasar ilmiah untuk mitigasi bencana dan perencanaan evakuasi..

Kata kunci: Tsunami, Teluk Lampung, Pemodelan Numerik, JAGURS, *Nested Grid*, Waktu Tiba, Inundasi

## ABSTRACT

### SIMULATION OF TSUNAMI WAVE *PROPAGATION* IN LAMPUNG BAY USING VARIOUS EARTHQUAKE SCENARIOS

By

**M. NAUFAL AL FARABI**

Lampung Bay is a semi-enclosed coastal water body in southern Sumatra characterized by complex bathymetry and coastal morphology, making it susceptible to tsunami wave amplification. This study analyzes tsunami propagation characteristics, arrival time, maximum wave height, and inundation extent under three earthquake source scenarios: the Sunda Strait megathrust Mw 9.2, the Semangko Timur B fault Mw 7.5, and the Ujung Kulon A fault Mw 7.3. Numerical simulations were conducted using JAGURS software with a five-level nested grid configuration (2430–30 m resolution) constructed from GEBCO, DEMNAS, and BATNAS datasets. Source parameters were estimated using the Wells & Coppersmith (1994) scaling law for fault scenarios and Strasser et al. (2010) for the subduction scenario. Results show that the Mw 9.2 scenario produced the largest initial sea-floor deformation (7.6 m uplift), maximum wave height of 7.72 m at Sukaraja, and inundation area of 57.19 km<sup>2</sup>. The Mw 7.5 and Mw 7.3 scenarios produced substantially smaller inundation extents of 7.36 km<sup>2</sup> and 3.80 km<sup>2</sup>, respectively. Tsunami arrival times for the Mw 9.2 scenario ranged from 25.8 to 84.0 minutes, while the Mw 7.3 scenario recorded the earliest arrival of 9.1 minutes at Krakatau. Maximum wave amplification occurred in the inner bay due to energy convergence, shoaling, and resonance effects within the semi-enclosed geometry. These findings indicate that tsunami hazard in Lampung Bay is governed not only by earthquake magnitude, but also by local bathymetry, shoreline orientation, and low-lying coastal topography, providing a scientific basis for disaster mitigation and evacuation planning.

**Keywords:** Tsunami, Lampung Bay, Numerical Modelling, JAGURS, Arrival Time, Inundation

Judul Skripsi : Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami di  
Wilayah Teluk Lampung Dengan Variasi  
Skenario Gempa

Nama : *M. Naufal Al Farabi*

Nomor Pokok Mahasiswa : 2214221030

Jurusan/Program Studi : Perikanan dan Kelautan/Ilmue Kelautan

Fakultas : Pertanian



*Eko Efendi*  
Eko Efendi, S.T., M.Si.  
NIP 197803292003121001

*Haunan Afif*  
Haunan Afif, S.Si., M.Si.  
NIP 198710152010121003

2. Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan

Universitas Lampung

*Munti Sarida*  
Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D.  
NIP 198309232006042001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

Ketua

: **Eko Efendi, S.T., M.Si.**



Sekretaris

: **Hauman Afif, S.Si., M.Si.**



Penguji Bukan Pembimbing

: **Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si.**



**2. Dekan Fakultas Pertanian**



**Dr. Kuswanta Futas Hidayat, M.P.**  
NIP. 196411181989021002

Tanggal lulus ujian skripsi : 30 April 2026



KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS DAN TEKNOLOGI  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
FAKULTAS PERTANIAN  
JURUSAN PERIKANAN DAN KELAUTAN

*Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung 35145 Telp (0721) 704946 Fax (0721) 770347*

---

**PERNYATAAN ORISINALITAS**

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya, di dalam naskah skripsi yang berjudul “**Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami di Wilayah Teluk Lampung Dengan Variasi Skenario Gempa**” tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh pihak lain untuk mendapatkan karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebut dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata dalam naskah skripsi ini ditemukan dan terbukti terdapat unsur-unsur fabrikasi, falsifikasi, plagiat dan konflik kepentingan saya bersedia skripsi ini digugurkan dan gelar akademik yang telah saya peroleh (S1) dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003, Pasal 25 ayat 2 dan Pasal 70).

Bandar Lampung, 12 Juni 2026

Yang membuat pernyataan



M. Naufal Al farabi  
NPM. 2214221030

## **RIWAYAT HIDUP**

Penulis dilahirkan di Jambi pada tanggal 14 April 2004, sebagai anak pertama dari pasangan Bapak Fauzan Muslim dan Ibu Linda Trisna. Penulis memulai pendidikan formal di Taman Kanak-Kanak Golden Kids Jambi, kemudian melanjutkan pendidikan dasar di SDN 44/VII Sukasari I Kabupaten Sarolangun pada tahun 2010–2011 dan SD 204 IV Kota Jambi pada tahun 2011–2016. Selanjutnya penulis menempuh pendidikan di SMP Negeri 24 Kota Jambi dan SMA Negeri 4 Kota Jambi. Pada tahun 2022, penulis diterima sebagai mahasiswa Program Studi Ilmu Kelautan, Fakultas Pertanian, Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SBMPTN).

Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis pernah menjadi asisten praktikum pada mata kuliah Pemetaan dan SIG Kelautan serta Konservasi dan Rehabilitasi Ekosistem Laut. Penulis juga memiliki pengalaman magang di Balai Besar Perikanan Budidaya Laut (BBPBL) Lampung pada tahun 2023, magang di Loka Pengelolaan Sumberdaya Pesisir dan Laut (LPSPL) Serang pada tahun 2024, serta Praktik Umum di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Bandung pada tahun 2025 dengan judul "Pemodelan Tsunami Menggunakan Perangkat Lunak JAGURS". Selain itu, penulis juga melaksanakan Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sriwijaya Mataram, Kecamatan Bandar Mataram, Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2025.

Untuk orang tua.

## SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, Karena atas Rahmat dan hidayahnya sehingga skripsi dengan Judul ”*Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami di Wilayah Teluk Lampung dengan Variasi Skenario Gempa*” dapat diselesaikan dengan baik sebagai syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di Universitas Lampung.

Pada proses penyusunan skripsi, penulis menyadari sepenuhnya bahwa untuk menyelesaikan proses ini tidak mudah, banyak tantangan yang harus dihadapi. Namun, berkat doa, dukungan, dan bimbingan dari berbagai pihak semua kesulitan dapat teratasi dengan baik Dalam kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir Kuswanta Futas Hidayat, M.P. selaku Dekan FP Unila;
2. Munti Sarida, S.Pi., M.Sc., Ph.D. selaku Ketua Jurusan Perikanan dan Kelautan;
3. Eko Efendi, S.T., M.Si. selaku Koordinator Program Studi Ilmu Kelautan, Dosen Pembimbing Akademik dan Dosen Pembimbing Utama;
4. Haunan Afif, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Pembantu/Sekretaris;
5. Anma Hari Kusuma, S.I.K., M.Si. selaku Penguji Utama;
6. Fauzan Muslim, S.T. dan Linda Trisna, A.Md selaku Kedua orang tua.

Bandar Lampung,                      2026

M. Naufal Al farabi

## DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI</b> .....	viii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	x
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	x
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xii
<b>DAFTAR ISTILAH</b> .....	xiii
<b>I. PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan .....	3
1.3 Manfaat Penelitian .....	3
1.4 Kerangka Pikir Penelitian .....	4
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1 Tsunami .....	6
2.2 Gelombang Tsunami .....	8
2.2.1 Kecepatan Gelombang .....	9
2.2.2 Deformasi Gelombang .....	9
2.2.3 Penjalaran Gelombang .....	12
2.3 Pemodelan Tsunami .....	13
2.4 Penelitian Terdahulu .....	14
<b>III. METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	16
3.1 Waktu dan Tempat .....	16
3.1.1 Waktu Penelitian .....	16
3.1.2 Tempat Penelitian .....	16
3.2 Bahan dan Alat .....	17
3.2.1 Bahan .....	17
3.2.2 Alat .....	17
3.3 Rancangan Penelitian .....	17
3.3.1 Pengumpulan Data .....	20
3.3.2 Penentuan Zona Sumber .....	20
3.3.3 Penentuan Region Nested grid .....	22
3.3.4 Penentuan Lokasi <i>Tide gauge</i> .....	24
3.3.5 Simulasi Tsunami .....	26

<b>IV. HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	28
4.1 Initial Displacement .....	28
4.2 Karakteristik Gelombang.....	31
4.3 Pola Penjalaran Tsunami.....	33
4.3.1 Penjalaran Tsunami 30 menit .....	33
4.3.2 Penjalaran Tsunami 60 Menit.....	35
4.3.3 Penjalaran Tsunami 90 Menit.....	37
4.3.4 Penjalaran Tsunami 120 Menit.....	39
4.4 Tsunami Travel Time.....	41
4.5 Inundasi Tsunami .....	49
<b>V. SIMPULAN DAN SARAN</b> .....	57
5.1 Simpulan.....	57
5.2 Saran.....	57
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	58
<b>LAMPIRAN</b> .....	68

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Klasifikasi Sesar .....	7
2. Perbandingan perangkat lunak model tsunami. ....	15
3. Bahan penelitian beserta format dan sumbernya. ....	17
4. Alat penelitian beserta spesifikasi dan fungsinya. ....	17
5. <i>Region</i> beserta resolusi spasial (m) dan sumber datanya .....	24
6. Lokasi <i>tide gauge</i> . ....	25
7. Skenario dan Parameter Tsunami. ....	27
8. Tinggi maksimum gelombang dan waktu pada tiap <i>tide gauge</i> . ....	46

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Kerangka pikir.....	5
2. Interaksi lempeng samudra dan benua pada zona subduksi .....	6
3. Hubungan kedalaman dengan kecepatan dan panjang gelombang.....	9
4. Deformasi gelombang yang mengalami Refraksi.....	10
5. Difraksi gelombang di belakang rintangan.....	11
6. Ilustrasi efek deformasi gelombang saat mendekati pantai.....	12
7. Parameter tsunami.....	13
8. Peta Lokasi Penelitian .....	16
9. Alur Penelitian. ....	19
10. Nested grid.....	23
11. Konfigurasi Grid. ....	24
12. Sebaran tide gauge. ....	26
13. Vertical displacement tiap gempa (a & d) Sesar Semangko Mw 7,3, (b & e) Sesar Ujung Kulon Mw 7,5, (c & f). Megathrust Mw 9,2. ....	29
14. Profil gelombang P-P' skenario (a & d) Mw 7,3, (b & e) Mw 7,5, (c & f) Mw 9,2.....	31
15. Pola penjalaran gelombang tsunami pada periode waktu 30 menit, skenario (a & d) Mw 7,3, (b & e) Mw 7,5, (c & f) Mw 9,2. ....	34
16. Pola penjalaran gelombang tsunami pada periode waktu 60, skenario (a & d) Mw 7,3, (b & e) Mw 7,5, (c & f) Mw 9,2. ....	36
17. Pola penjalaran gelombang tsunami pada periode waktu 90 menit, skenario (a & d) Mw 7,3, (b & e) Mw 7,5, (c & f) Mw 9,2. ....	38
18. Pola penjalaran gelombang tsunami pada periode waktu 120 menit, skenario (a & d) Mw 7,3, (b & e) Mw 7,5, (c & f) Mw 9,2. ....	40
19. Tinggi muka laut saat tsunami pada <i>tide gauge</i> tiap Skenario .....	42
20. Grafik waktu tiba tsunami di setiap tide gauge pada skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2. ....	45
21. Luasan inundasi berdasarkan skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2. ....	50
22. Distribusi inundasi Teluk Betung dan Panjang skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2. ....	51
23. Distribusi inundasi Merak Belantung (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2... ..	52

24. Distribusi inundasi Tarahan dan Sebalang skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2. ....	53
25. Distribusi inundasi Padang Cermin skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 9,2.....	54
26. Output report model tsunami JAGURS skenario (a) Mw 7,3, (b) Mw 7,5, (c) Mw 7,3. ....	71

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Halaman
1. gridfile.dat .....	69
2. tsun.par .....	70
3. Luaran model.....	71

## DAFTAR ISTILAH

Batimetri	: Representasi kedalaman dan bentuk morfologi dasar laut yang digunakan dalam analisis oseanografi dan pemodelan tsunami.
Deformasi Dasar Laut	: Perubahan elevasi dasar laut akibat aktivitas tektonik yang dapat memicu perpindahan massa air laut.
Difraksi Gelombang	: Fenomena penyebaran dan pembelokan gelombang ketika melewati celah atau rintangan.
Dip	: Sudut kemiringan bidang sesar terhadap bidang horizontal yang diukur tegak lurus terhadap arah strike.
Displacement (Du)	: Besarnya perpindahan relatif pada bidang patahan akibat pelepasan energi gempa.
Episenter	: Titik di permukaan bumi yang berada tepat di atas pusat gempa (hiposenter).
Initial Displacement	: Kondisi awal perubahan muka laut yang dihasilkan oleh deformasi vertikal dasar laut akibat gempa.
Inundasi	: Proses masuknya air tsunami ke daratan yang menyebabkan genangan pada wilayah pesisir.
Magnitudo (Mw)	: Skala magnitudo gempa yang menggambarkan jumlah energi yang dilepaskan berdasarkan momen seismik.
Megathrust	: Gempa bumi besar yang terjadi pada zona subduksi akibat pergerakan antarlempeng tektonik.
Nested Grid	: Teknik pemodelan yang menggunakan beberapa tingkat resolusi grid untuk meningkatkan ketelitian simulasi pada area tertentu.
Parent Grid	: Grid utama dengan resolusi lebih kasar yang mencakup wilayah simulasi yang lebih luas.
Rake	: Sudut yang menunjukkan arah pergerakan relatif blok batuan pada bidang sesar.
Refleksi Gelombang	: Pemantulan energi gelombang akibat interaksi dengan pantai atau struktur pantai.

Refraksi Gelombang	: Perubahan arah rambat gelombang akibat variasi kedalaman perairan.
Resampling	: Proses mengubah resolusi data spasial menjadi ukuran grid yang berbeda.
Run-up	: Ketinggian maksimum yang dicapai gelombang tsunami ketika mencapai daratan.
Scaling Law	: Hubungan empiris yang digunakan untuk memperkirakan dimensi patahan berdasarkan magnitudo gempa.
Seismic Moment ( $M_0$ )	: Parameter yang menggambarkan besarnya energi deformasi yang dilepaskan oleh suatu gempa bumi.
Shoaling	: Proses peningkatan tinggi gelombang dan penurunan panjang gelombang akibat berkurangnya kedalaman perairan.
Slip	: Besarnya pergeseran relatif yang terjadi pada bidang sesar selama proses gempa.
Strike	: Sudut orientasi bidang sesar yang diukur dari arah utara geografis searah jarum jam.
Subduksi	: Proses penunjaman satu lempeng tektonik ke bawah lempeng lainnya pada batas konvergen.
Subsidence	: Penurunan elevasi dasar laut atau permukaan tanah akibat deformasi tektonik.
Tide Gauge	: Instrumen atau titik pengamatan yang digunakan untuk merekam perubahan muka air laut terhadap waktu.
Topografi	: Representasi bentuk dan variasi elevasi permukaan daratan.
Uplift	: Pengangkatan vertikal dasar laut atau permukaan bumi akibat deformasi tektonik.
Virtual Tide Gauge	: Titik pengamatan muka air laut yang dibuat secara numerik dalam model untuk merekam karakteristik gelombang tsunami.
Zona Subduksi	: Wilayah pertemuan dua lempeng tektonik yang ditandai oleh penunjaman satu lempeng ke bawah lempeng lainnya.

## I. PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Tsunami merupakan salah satu bencana alam paling destruktif dan mematikan di dunia. Dampak yang ditimbulkan oleh bencana tsunami meliputi trauma bagi masyarakat, terganggunya aktivitas perekonomian dan bisnis, kerusakan sarana-prasarana di wilayah pesisir, kehilangan harta benda, dan korban jiwa (Vidyattama *et al.*, 2021). Berdasarkan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2025), Indonesia termasuk negara dengan tingkat kerawanan tsunami tertinggi di dunia karena terletak pada pertemuan tiga lempeng tektonik utama, yaitu Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik. Kondisi tektonik tersebut menyebabkan tingginya aktivitas gempa bumi bawah laut yang berpotensi menghasilkan tsunami.

Salah satu wilayah yang memiliki potensi tinggi terhadap bahaya tsunami adalah Teluk Lampung. Secara geografis, Teluk Lampung merupakan perairan semi-tertutup di bagian selatan Provinsi Lampung yang dikelilingi oleh beberapa wilayah administratif, yaitu Kota Bandar Lampung, Kabupaten Pesawaran, dan Kabupaten Lampung Selatan (Alhamidi *et al.*, 2018). Wilayah ini berada pada zona dengan aktivitas tektonik dan vulkanik yang cukup tinggi sehingga rentan terhadap bencana geologi antara lain gempa bumi, letusan gunung api, dan tsunami. Selain itu, Teluk Lampung juga menjadi kawasan strategis transportasi laut nasional, industri perikanan, dan wisata bahari yang memiliki nilai ekonomi tinggi (Soejarwo *et al.*, 2021). Dengan karakteristik tersebut, apabila terjadi tsunami pada kondisi saat ini, dampak yang ditimbulkan diperkirakan akan jauh lebih besar dibandingkan peristiwa sebelumnya.

Berdasarkan Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416 – 2021 (Badan Geologi, 2023), wilayah Lampung dan Selat Sunda telah beberapa kali mengalami tsunami yang umumnya dipicu oleh longsoran bawah laut dan gempa bumi. Peristiwa pertama tercatat pada 4 Mei 1851 di Teluk Betung, ketika gelombang setinggi  $\pm 1,5$  m terjadi akibat longsoran bawah laut. Kejadian serupa pada 9 Januari 1852. Pada 19 Juni 1930, gempa bumi kembali menyebabkan perubahan muka laut 0,5–1,5 m di Teluk Betung. Letusan besar Gunung Krakatau tahun 1883 menimbulkan tsunami dahsyat yang melanda pesisir Lampung dan Banten, diikuti peristiwa serupa pada 22 Desember 2018 akibat longsoran lereng Gunung Anak Krakatau (Darmawan *et al.*, 2020). Selain aktivitas vulkanik, potensi tsunami di Selat Sunda juga dapat dipicu oleh gempa *megathrust* di zona subduksi, seperti pada peristiwa Aceh 2004, Mentawai 2005, dan Pangandaran 2006 (Yudhicara, 2008). Hal ini menunjukkan bahwa wilayah tersebut masih memiliki potensi tinggi terhadap kejadian tsunami di masa mendatang.

Sejauh ini, sebagian besar penelitian mengenai tsunami di wilayah Selat Sunda berfokus pada peristiwa yang disebabkan oleh aktivitas vulkanik, seperti letusan Gunung Krakatau (Zakaria, 2024), memodelkan *run-up* tsunami akibat letusan Gunung Anak Krakatau menggunakan pendekatan numerik hidrodinamik di pesisir Bandar Lampung pada skenario yang menyerupai peristiwa tahun 1883. Namun, kajian yang secara khusus meneliti pemodelan tsunami akibat aktivitas tektonik yang berpotensi merambat hingga ke Teluk Lampung masih sangat terbatas. Kondisi ini menjadi penting untuk dikaji lebih lanjut, karena Teluk Lampung memiliki bentuk semi tertutup dengan konfigurasi batimetri yang kompleks (Susilohadi, 2019).

Metode penelitian mengenai tsunami banyak difokuskan pada pengamatan langsung di lapangan, analisis spasial, dan survei geomorfologi untuk memperoleh data terkait *run-up*, waktu tiba, dan inundasi. Pendekatan observasional ini dilakukan dengan mengukur tinggi genangan menggunakan GPS diferensial atau *drone*, serta mendokumentasikan garis puing dan jejak genangan yang tersisa pasca kejadian tsunami (Tsuji *et al.*, 2006). Selain itu, data waktu tiba gelombang dikumpulkan melalui catatan instrumen laut seperti *Tide gauge* dan *buoy DART*, ke-

mudian dibandingkan dengan keterangan saksi mata untuk memverifikasi kecepatan perambatan tsunami menuju pantai (Muhari *et al.*, 2012). Kajian mengenai sebaran genangan dilakukan dengan mengintegrasikan hasil pengukuran lapangan dan analisis citra satelit ke dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk memetakan pola inundasi serta area terdampak (Koshimura *et al.*, 2009).

Identifikasi bahaya tsunami dapat dilakukan melalui pendekatan pemodelan numerik yang membuat simulasi proses fisik, mulai dari pembangkitan gelombang, propagasi di laut terbuka, hingga *run-up* dan genangan di daratan (Jumadi *et al.*, 2025). Oleh karena itu, untuk memahami potensi bahaya tsunami, diperlukan kajian yang mampu menggambarkan gelombang tsunami terbentuk, merambat, dan berinteraksi dengan morfologi pantai. Pemodelan ini bertujuan untuk memperkirakan tinggi *run-up*, waktu tiba gelombang, serta pola penyebaran energi tsunami di sepanjang pesisir Teluk Lampung. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam penyusunan strategi mitigasi dan sistem peringatan dini tsunami di Provinsi Lampung secara lebih efektif dan berbasis data spasial.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menganalisis karakteristik model penjalaran gelombang tsunami dengan variasi skenario gempa
2. Untuk menganalisis estimasi waktu tiba gelombang, ketinggian maksimum, serta inundasi tiap skenario gempa.

## **1.3 Manfaat Penelitian**

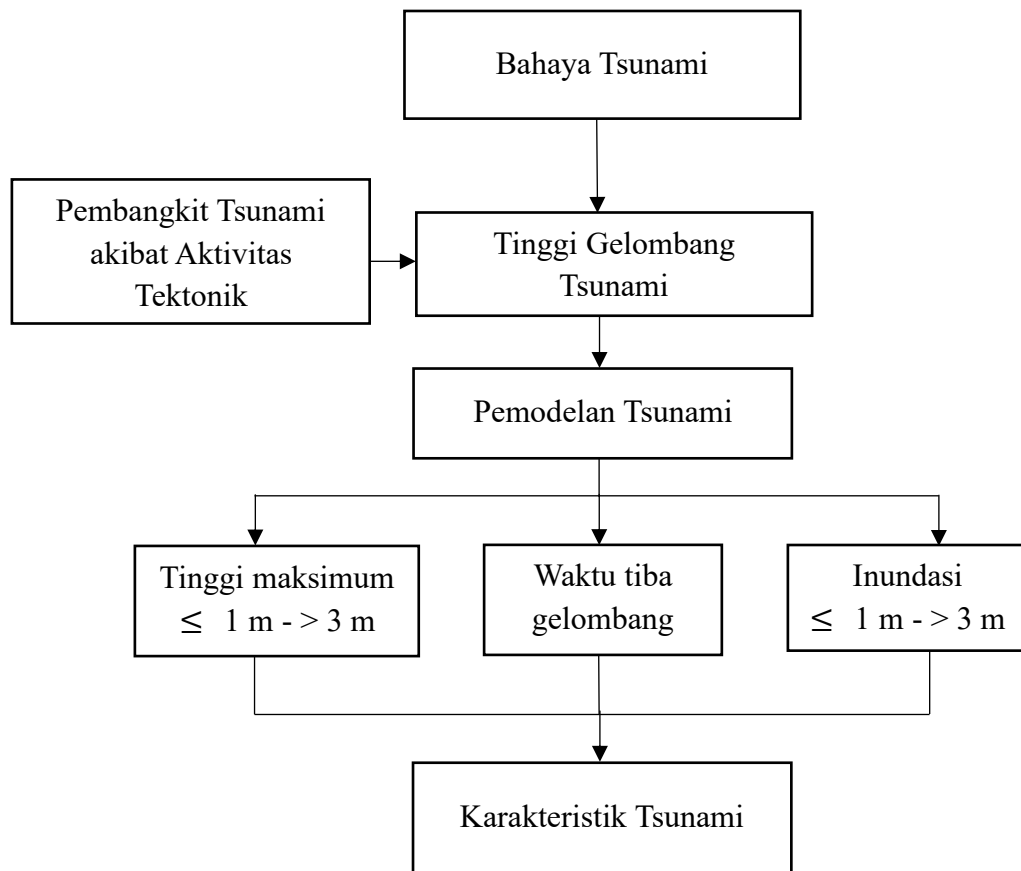
Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai karakteristik penjalaran gelombang tsunami berdasarkan variasi parameter gempa mulai dari episenter hingga ke arah daratan serta sebaran area yang terdampak tsunami, informasi tersebut dapat digunakan sebagai acuan bagi masyarakat dan pemerintah dalam upaya mitigasi bencana tsunami di masa mendatang di wilayah Teluk Lampung.

#### 1.4 Kerangka Pikir Penelitian

Bahaya utama tsunami terletak pada kekuatan dan kecepatannya yang mampu menerjang daratan dengan energi sangat besar, menghancurkan bangunan, infrastruktur, serta menenggelamkan wilayah pesisir dalam waktu singkat. Selain dampak fisik, tsunami juga menimbulkan kerugian sosial dan ekonomi yang signifikan, seperti hilangnya tempat tinggal, terputusnya jaringan transportasi, dan rusaknya ekosistem pesisir.

Pembangkit gelombang tsunami umumnya berasal dari gangguan besar yang terjadi di dasar laut, yang menyebabkan perpindahan massa air secara tiba-tiba. Penyebab tsunami dapat terjadi antara lain akibat gempa bumi, letusan gunung berapi bawah laut, tanah longsor laut. Pergeseran ini menghasilkan energi besar yang ditransfer ke air laut dan menciptakan gelombang tsunami. Energi yang dikandung gelombang tsunami praktis tidak mengalami redaman, sehingga mampu merambat puluhan ribu kilometer di lautan terbuka, seluruh massa air bergerak bersama dari permukaan sampai dekat ke dasar laut dan tidak terpengaruh oleh gelombang-gelombang lokal apapun, seperti yang disebabkan oleh angin atau pasang surut (Saito, 2017).

Model simulasi tsunami digunakan untuk pemetaan daerah rawan bencana berdasarkan perkiraan sumber pembangkit tsunami akibat aktivitas tektonik. Pemodelan ini bertujuan untuk memperoleh perkiraan waktu kedatangan tsunami di daratan, tinggi gelombang dan jauhnya redaman (*inundation*). Potensi bahaya tsunami diklasifikasikan didasarkan pada *run-up* maksimum seluruh skenario. Pengklasifikasian tingkat bahaya dibagi menjadi tiga kelas, yaitu rendah ( $\leq 1$  m), sedang (1-3 m), dan tinggi ( $> 3$  m) (Nugroho *et al.*, 2020). Level kedalaman inundasi berpotensi rendah jika  $\leq 1$  m, sedang 1 - 3 m, dan tinggi  $> 3$  m (Perka BNPB Nomor 02 Tahun 2012). Analisis bahaya tsunami dengan pemodelan tsunami diharapkan dapat menggambarkan tsunami sesuai dengan kondisi sebenarnya sehingga menghasilkan estimasi genangan yang tepat. Oleh karena itu, pemodelan ini tidak hanya perlu mempertimbangkan kondisi saat ini tetapi juga proyeksi masa depan dalam upaya mitigasi risiko bencana. Kerangka pikir penelitian ini disajikan pada Gambar 1.

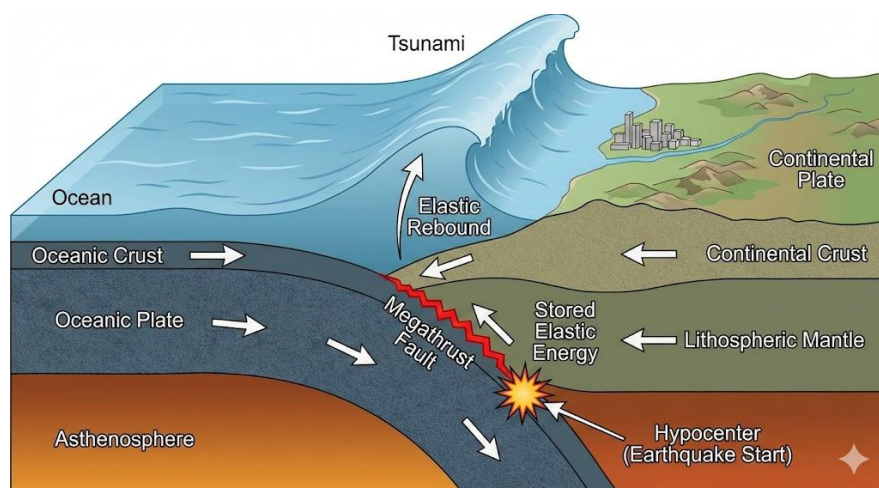


Gambar 1. Kerangka pikir.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Tsunami

Tsunami merupakan gelombang laut besar yang terjadi akibat pergeseran mendadak pada dasar laut, sehingga menyebabkan perubahan signifikan pada permukaan air laut. Fenomena ini umumnya dipicu oleh gempa bumi bawah laut yang menimbulkan perpindahan vertikal dasar laut, terutama gempa *Megathrust* (Rakuasa, 2023). Gempa *megathrust* terjadi di zona subduksi, yaitu wilayah pertemuan dua lempeng tektonik yang ditandai oleh pergerakan satu lempeng yang menunjam ke bawah lempeng lainnya. (Daniell *et al.*, 2017). Jenis gempa ini berpotensi menghasilkan guncangan berkekuatan besar yang dapat memicu terbentuknya tsunami dengan daya rusak tinggi. Pergeseran lempeng tersebut melepaskan energi dalam jumlah besar yang kemudian ditransfer ke kolom air laut, sehingga menciptakan gelombang tsunami (Behrens *et al.*, 2021). Ilustrasi gempa disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Interaksi lempeng samudra dan benua pada zona subduksi  
Sumber: FMIPA UNESA

Pemicu terjadinya tsunami tidak hanya berasal dari gempa *megathrust*, tetapi juga dapat disebabkan oleh aktivitas sesar (*fault*) yang menimbulkan gempa bumi bawah laut. Sesar merupakan bidang rekahan pada kerak bumi yang menjadi batas antara dua blok batuan atau lempeng tektonik yang saling bergeser (Liang *et al.*, 2023). Pergerakan batuan yang terjadi secara berulang di sepanjang sesar berperan dalam akumulasi dan pelepasan energi tektonik, sehingga membentuk sesar aktif yang berpotensi memicu gempa bumi besar dan membangkitkan tsunami (Brune & Thatcher, 2002). Berdasarkan arah dan karakteristik pergerakannya, terdapat tiga tipe utama sesar, yaitu sesar naik (*reverse fault*), sesar turun (*normal fault*), dan sesar geser (*strike-slip fault*). Selain itu, dikenal pula sesar miring (*oblique fault*) yang merupakan kombinasi antara pergerakan vertikal dan mendatar. Cronin (2004), mengklasifikasikan tipe-tipe sesar berdasarkan mekanisme pergerakannya yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Klasifikasi Sesar

No	<i>Rake slip</i>	Tipe Sesar
1	0° atau 180°	<i>Pure strike-slip</i>
2	90°	<i>Pure dip-slip reverse</i>
3	-90°	<i>Pure dip-slip normal</i>
4	-20° – 20°	<i>Left-lateral strike-slip</i>
5	20° – 70°	<i>Reverse left-lateral oblique</i>
6	70° – 110°	<i>Reverse</i>
7	110° – 160°	<i>Reverse right-lateral oblique</i>
8	-160° – 110°	<i>Right-lateral strike-slip</i>
9	-110° – 160°	<i>Normal right-lateral oblique</i>
10	-70° – 110°	<i>Normal</i>
11	-20° – 70°	<i>Normal left-lateral oblique</i>

Sumber: Cronin, 2004

Berdasarkan jarak sumber terhadap wilayah terdampak dan waktu tempuh gelombangnya, *Intergovernmental Oceanographic Commission* (2019) mengklasifikasikan tsunami menjadi tiga kategori, yaitu tsunami lokal, regional, dan jauh (*teletsunami*). Tsunami lokal merupakan tsunami yang bersumber dari lokasi terdekat dengan waktu tempuh gelombang kurang dari satu jam atau berjarak kurang dari 200 km dari sumbernya. Jenis tsunami ini umumnya disebabkan oleh gempa bumi, namun juga dapat dipicu oleh longsoran bawah laut atau aliran piroklastik dari letusan gunung berapi, dan secara historis sekitar 90% korban jiwa akibat tsunami disebabkan oleh tsunami lokal. Tsunami regional memiliki kemampuan un-

tuk menimbulkan kerusakan di wilayah geografis tertentu dalam jarak hingga sekitar 1.000 km dari sumber atau dengan waktu tempuh antara satu hingga tiga jam, dan dampaknya dapat dirasakan di beberapa negara pesisir dalam satu kawasan. Sementara itu, tsunami jauh (*teletsunami*) berasal dari sumber yang berjarak lebih dari 1.000 km dengan waktu tempuh lebih dari tiga jam dan dapat menjalar melintasi samudra hingga menimbulkan dampak signifikan di wilayah pesisir yang jauh dari sumbernya.

## 2.2 Gelombang Tsunami

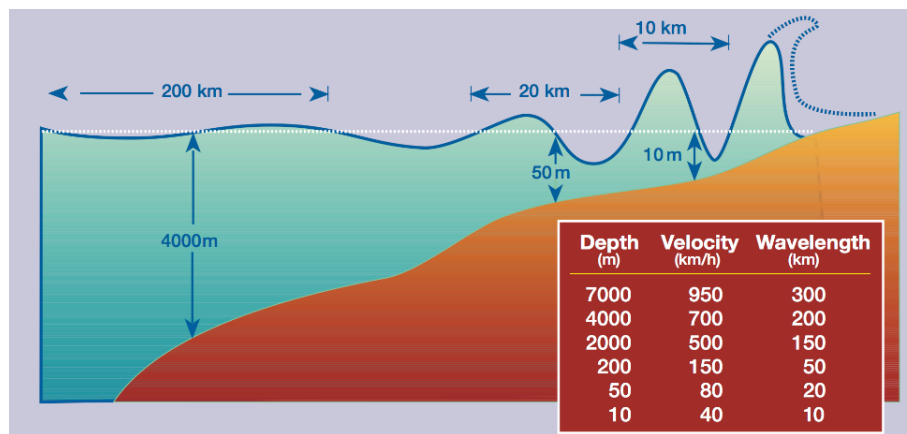
Gelombang tsunami dan gelombang laut biasa pada dasarnya memiliki kesamaan dalam hal parameter fisik yang digunakan untuk menggambarkan sifat gelombangnya. Parameter utama seperti panjang gelombang, kecepatan fase, periode, dan tinggi gelombang merupakan besaran penting yang juga digunakan untuk menjelaskan karakteristik gelombang tsunami (Röbke & Vött, 2017). Meskipun demikian, nilai dari parameter-parameter tersebut berbeda secara signifikan antara gelombang biasa dan tsunami. Gelombang laut biasa umumnya memiliki panjang gelombang yang relatif pendek, berkisar antara beberapa meter hingga ratusan meter, serta periode yang hanya beberapa detik. Sebaliknya, tsunami memiliki panjang gelombang yang sangat besar, mencapai ratusan kilometer, dengan periode yang bisa berlangsung antara 10 menit hingga lebih dari satu jam (Hu *et al.*, 2023).

Di perairan dalam, tsunami tidak dipengaruhi oleh pasang surut karena rentang pasang surut relatif kecil dibandingkan dengan kedalaman laut, dan arus pasang surut yang terjadi umumnya lemah (Tajalli-Bakhsh *et al.*, 2015). Hal ini dikarenakan pasang surut air laut dipengaruhi oleh gaya tarik-menarik dari gravitasi bumi dengan benda langit seperti bulan dan matahari (Hossain *et al.*, 2016). Sedangkan gelombang tsunami terbentuk oleh perpindahan massa air secara mendadak, ketika gelombang tersebut mencapai perairan dangkal, kecepatannya menurun. Akibatnya, tinggi gelombang meningkat secara signifikan dan dapat menimbulkan kerusakan besar ketika mencapai wilayah daratan (Shimozono, 2021).

### 2.2.1 Kecepatan Gelombang

Perbedaan antara gelombang laut biasa dan gelombang tsunami adalah kecepatan gelombang laut biasa bergantung pada panjang gelombang dan periode, sedangkan kecepatan tsunami hanya dipengaruhi oleh kedalaman medium yang dilaluinya (Tan *et al.*, 2012). Hal ini terjadi karena tsunami melibatkan pergerakan seluruh massa air dari permukaan hingga dasar laut. Konsekuensinya, tsunami dapat merambat dengan kecepatan yang sangat tinggi di laut dalam dan mengalami perubahan kecepatan yang signifikan saat mendekati pantai.

Kecepatan gelombang tsunami dipengaruhi oleh kedalaman laut. Gelombang bergerak lebih cepat di perairan yang lebih dalam dan kecepatannya menurun saat memasuki perairan dangkal. Kedalaman laut yang semakin dangkal menyebabkan perubahan drastis pada bentuk dan kecepatan gelombang (Varsoliwala & Singh, 2021). Penurunan kecepatan tersebut disebabkan oleh interaksi gelombang dengan dasar laut yang mengurangi energi perambatan. Fenomena ini, disebut sebagai *shoaling*, yang menyebabkan gelombang mengalami peningkatan tinggi dan penurunan panjang gelombang saat mendekati pantai. Hubungan kedalaman dengan kecepatan dan panjang gelombang disajikan pada gambar 3.



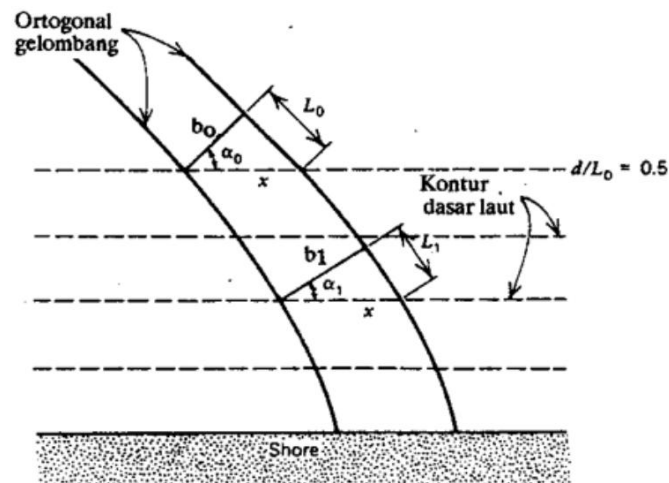
Gambar 3. Hubungan kedalaman dengan kecepatan dan panjang gelombang  
Sumber: IOC-UNESCO.org

### 2.2.2 Deformasi Gelombang

Gelombang yang bergerak dari perairan dalam menuju perairan dangkal mengalami perubahan bentuk sebagai respons terhadap berkurangnya kedalaman. Proses pendangkalan gelombang (*wave shoaling*) menghasilkan modifikasi pada

amplitudo, panjang gelombang, dan gradien gelombang, yang secara keseluruhan membentuk fenomena deformasi gelombang di zona transisi menuju pantai. (Eldrup & Andersen, 2020). Ketika gelombang memasuki wilayah pesisir, perbedaan kedalaman dan bentuk batas pantai mulai memengaruhi arah serta pola rambatannya. Kondisi ini kemudian menghasilkan proses refraksi, refleksi, dan difraksi (Triatmodjo, 1999).

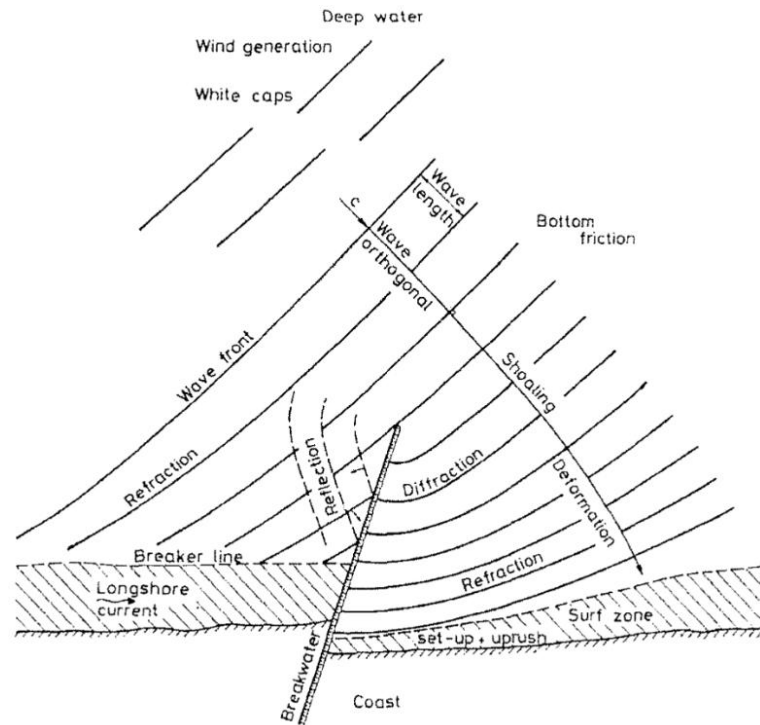
Refraksi terjadi ketika gelombang memasuki wilayah dengan kedalaman yang berubah-ubah. Ketika gelombang bergerak menuju perairan dangkal, interaksi dengan batimetri menjadi signifikan, sehingga bagian gelombang yang berada di atas daerah yang lebih dangkal mengalami perlambatan dibandingkan bagian yang berada di perairan lebih dalam. Perubahan arah gelombang karena refraksi tersebut menghasilkan konvergensi (penguncupan) atau divergensi (penyebaran) energi gelombang dan mempengaruhi energi gelombang yang terjadi di suatu tempat di daerah pantai (Ramdani *et al.*, 2014). Proses refraksi gelombang disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Deformasi gelombang yang mengalami Refraksi  
Sumber: Triatmodjo, 1999

Difraksi terjadi ketika terdapat perbedaan tinggi gelombang sepanjang puncak gelombang, sehingga energi berpindah dari zona dengan amplitudo lebih besar menuju area dengan amplitudo lebih kecil. Proses ini menjadi semakin signifikan ketika gelombang berinteraksi dengan rintangan seperti pemecah gelombang atau pulau, sehingga sebagian energi gelombang membelok mengelilingi





Gambar 6. Ilustrasi efek deformasi gelombang saat mendekati pantai  
Sumber: Svendsen and Jonsson, 1976

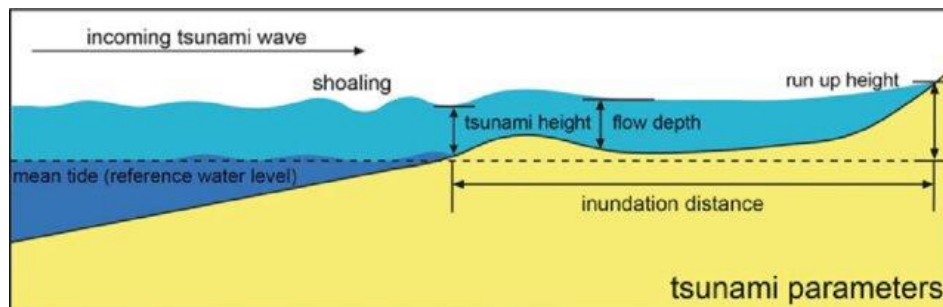
### 2.2.3 Penjalaran Gelombang

Mekanisme penjalaran gelombang tsunami merupakan proses berpindahnya energi dari sumber pembangkit menuju wilayah pesisir. Proses penjalaran gelombang tsunami secara umum dapat dibedakan menjadi tiga tahapan utama, yaitu zona sumber (*generation*), zona perambatan (*propagation*), dan inundasi (Satake, 2015). Tahap pertama disebut zona sumber (*generation*), yaitu saat terjadi deformasi dasar laut akibat aktivitas tektonik, seperti pergeseran sesar di zona subduksi, yang mengakibatkan perpindahan vertikal massa air laut. Perubahan tiba-tiba pada dasar laut tersebut menimbulkan gangguan pada kolom air di atasnya dan menghasilkan gelombang panjang yang menjalar ke segala arah.

Zona perambatan (*propagation*) merupakan tahap ketika gelombang tsunami yang telah terbentuk di daerah sumber mulai merambat melintasi samudra menuju kawasan pesisir. Pada fase ini, energi tsunami berpindah dalam bentuk gelombang panjang yang menjalar secara efisien dari pusat sumber. Kecepatan perambatan gelombang terutama ditentukan oleh kedalaman laut, sehingga gelombang bergerak lebih cepat pada perairan dalam (Heinrich *et al.*, 2001). Gelombang

tsunami umumnya tidak mengalami kehilangan energi yang signifikan karena karakteristiknya sebagai gelombang panjang, sehingga amplitudo tetap relatif kecil meskipun energi yang dibawanya besar. Kondisi ini berlangsung hingga gelombang mencapai perairan dangkal dan mulai mengalami perubahan karakteristik seiring memasuki fase *shoaling* (Heidarzadeh *et al.*, 2019).

Ketika mendekati pantai, gelombang tsunami memasuki *inundation zone*, yaitu daerah yang digenangi air laut saat gelombang mengalir ke daratan (Roro Setiowati *et al.*, 2023). Energi gelombang yang terakumulasi kemudian mendorong air laut ke daratan, menimbulkan genangan maupun potensi kerusakan besar di wilayah pesisir (Badan Geologi, 2023) Salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan sejauh mana gelombang menembus daratan adalah *horizontal inundation distance*, yang diukur secara horizontal dari posisi permukaan laut rata-rata. Parameter ini biasanya dinyatakan sebagai jarak maksimum untuk setiap segmen pantai, dan dapat berbeda antar daerah pantai atau pelabuhan, tergantung pada topografi, geomorfologi pesisir, dan karakteristik gelombang tsunami (Budiman *et al.*, 2024). Parameter tsunami ini disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Parameter tsunami  
Sumber: Reicherter, 2015

### 2.3 Pemodelan Tsunami

Pemodelan tsunami merupakan suatu pendekatan matematis dan numerik yang digunakan untuk mensimulasikan proses pembangkitan, penjalaran, hingga *run-up* gelombang tsunami yang terjadi akibat deformasi dasar laut sebagai dampak aktivitas tektonik, seperti gempa bumi. Melalui pemodelan ini, berbagai karakteristik fisik tsunami seperti tinggi gelombang, kecepatan rambat, waktu tiba, dan luas genangan dapat diperkirakan secara lebih akurat. Menurut Satake (2015), pemodelan tsunami memiliki peran penting dalam memahami dinamika gelom-

bang dari sumber hingga pesisir, sehingga hasilnya dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam upaya mitigasi bencana dan perencanaan tata ruang wilayah pesisir yang berisiko tinggi terhadap tsunami. Analisis bahaya tsunami melalui pendekatan pemodelan diharapkan mampu merepresentasikan kondisi sebenarnya di lapangan sehingga menghasilkan estimasi tinggi dan luas genangan yang mendekati realitas. (Charvet *et al.*, 2014). menegaskan bahwa prediksi tsunami yang akurat hanya dapat dicapai melalui penentuan tinggi *run-up*, dan (*inundation*) yang didukung oleh investigasi bukti geologi, data dampak tsunami masa lalu, serta identifikasi sumber-sumber potensial.

Tujuan utama dari pemodelan tsunami adalah untuk memperoleh gambaran spasial dan temporal mengenai potensi dampak tsunami di suatu wilayah pesisir. Melalui hasil pemodelan, informasi penting seperti sebaran tinggi gelombang, waktu tiba, dan luas genangan dapat diidentifikasi dengan lebih akurat. Data tersebut menjadi dasar dalam penyusunan peta bahaya tsunami (*tsunami hazard map*), sistem peringatan dini (*early warning system*), serta perencanaan jalur evakuasi bagi masyarakat di kawasan pesisir (Aljber *et al.*, 2024). Dengan demikian, pemodelan tsunami tidak hanya memiliki nilai akademis sebagai alat analisis ilmiah, tetapi juga bersifat aplikatif dalam mendukung upaya mitigasi dan pengurangan risiko bencana. Selain itu, pemodelan daerah rawan tsunami juga dapat dijadikan acuan dalam perencanaan tata ruang wilayah dan pengembangan infrastruktur yang lebih adaptif terhadap potensi bahaya tsunami (Rakuasa, 2023) .

## 2.4 Penelitian Terdahulu

Pemodelan tsunami telah banyak dikembangkan menggunakan berbagai perangkat lunak dengan pendekatan dan karakteristik yang berbeda. Perbandingan beberapa perangkat lunak pemodelan tsunami disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perbandingan perangkat lunak model tsunami.

No	Model	Kelebihan	Kekurangan	Referensi
1	COMCOT ( <i>Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model</i> )	Efisien untuk simulasi cepat dan studi skenario.	Kurang akurat dalam menangkap efek dispersi gelombang; grid kurang fleksibel.	Liu <i>et al.</i> , 1998
2	TUNAMI ( <i>Tohoku University Numerical Analysis Model</i> ) N-2	Struktur kode sederhana dan stabil; cepat dan ringan secara komputasi.	Tidak mempertimbangkan efek dispersi gelombang; kurang akurat untuk wilayah kompleks.	Imamura <i>et al.</i> , 1995
3	NEOWAVE	Akurat untuk <i>run-up</i> & breaking wave karena menggunakan model non-hidrostatik	Pengoperasian serta setup skenario tidak praktis; kompleksitas model	Yamazaki <i>et al.</i> , 2009
4	ANUGA	Resolusi fleksibel; akurat untuk simulasi genangan.	Beban komputasi besar; tidak efisien untuk simulasi skala samudra	Vandrie & Milevski, 2009

Secara umum, setiap perangkat lunak pemodelan tsunami memiliki keunggulan dan keterbatasan yang disesuaikan dengan tujuan serta skala penelitian. Putri (2023) melakukan penelitian tentang pemodelan tsunami di Kota Palu menggunakan JAGURS, yang menerapkan pendekatan persamaan *Boussinesq* dengan mempertimbangkan karakteristik gelombang panjang atau gelombang dispersif untuk berbagai skenario gempa. Kelebihan JAGURS antara lain dapat memperhitungkan pengaruh deformasi elastis bumi akibat beban gelombang tsunami, stratifikasi densitas air laut, sehingga simulasi yang dihasilkan lebih sesuai dengan data pengamatan gelombang di wilayah laut dalam (Baba *et al.*, 2017). Namun, keterbatasan JAGURS adalah membutuhkan komputasi yang cukup tinggi untuk simulasi skala besar, serta ketergantungan pada kualitas *data bathimetri* dan topografi yang digunakan, yang dapat mempengaruhi akurasi prediksi genangan di pesisir.

### III. METODOLOGI PENELITIAN

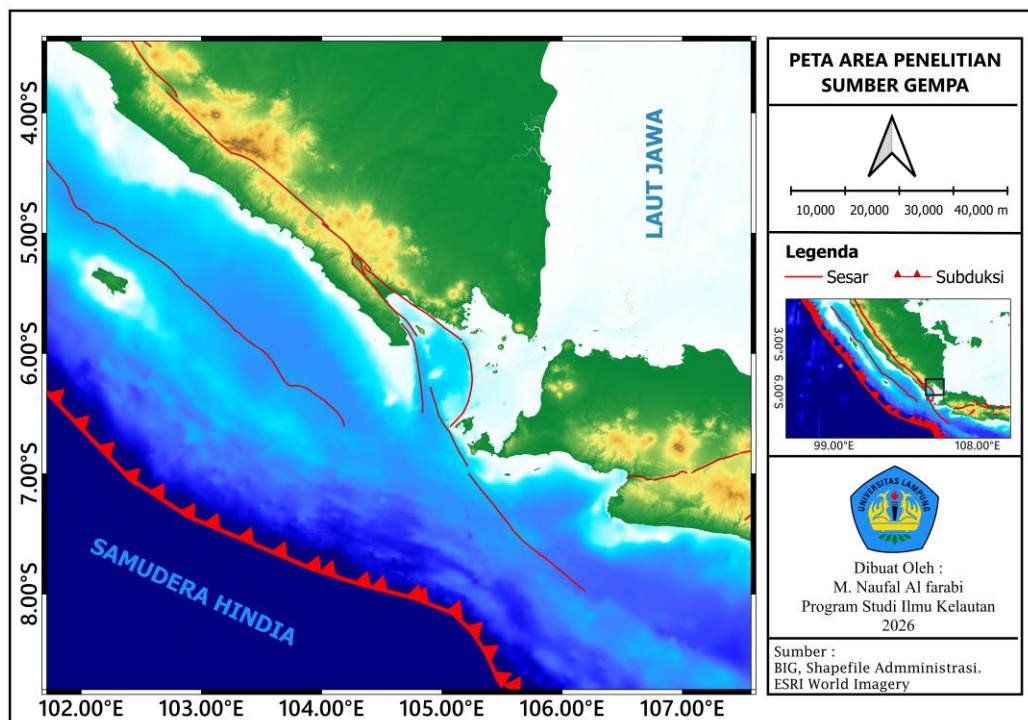
#### 3.1 Waktu dan Tempat

##### 3.1.1 Waktu Penelitian

Penelitian dilaksanakan selama tiga bulan, yaitu pada bulan Oktober hingga Desember 2025. Kegiatan meliputi tahap persiapan, pengumpulan data, dan analisis hasil penelitian. Rentang waktu penelitian tersebut ditetapkan agar dapat berjalan sesuai rencana.

##### 3.1.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) Bandung, Jawa Barat. Wilayah kajian berada di wilayah pesisir Teluk Lampung. Daerah penelitian disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Peta Lokasi Penelitian

### 3.2 Bahan dan Alat

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini sebagai berikut:

#### 3.2.1 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3:

Tabel 3. Bahan penelitian beserta format dan sumbernya.

No	Bahan	Format	Sumber
1	Data Batimetri	GeoTIFF	<a href="https://gebco.net">https://gebco.net</a>
2	Data Digital Elevation Model (DEM)	GeoTIFF	<a href="https://tanahair.indonesia.go.id/">https://tanahair.indonesia.go.id/</a>
3	Data Peta Rupa Bumi (RBI) Indonesia	Shapefile	<a href="https://tanahair.indonesia.go.id/">https://tanahair.indonesia.go.id/</a>
4	Model deformasi	GRD Surfer	Multideform.exe
5	Koordinat <i>Tide gauge</i>	Text	Google Earth

#### 3.2.2 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 4:

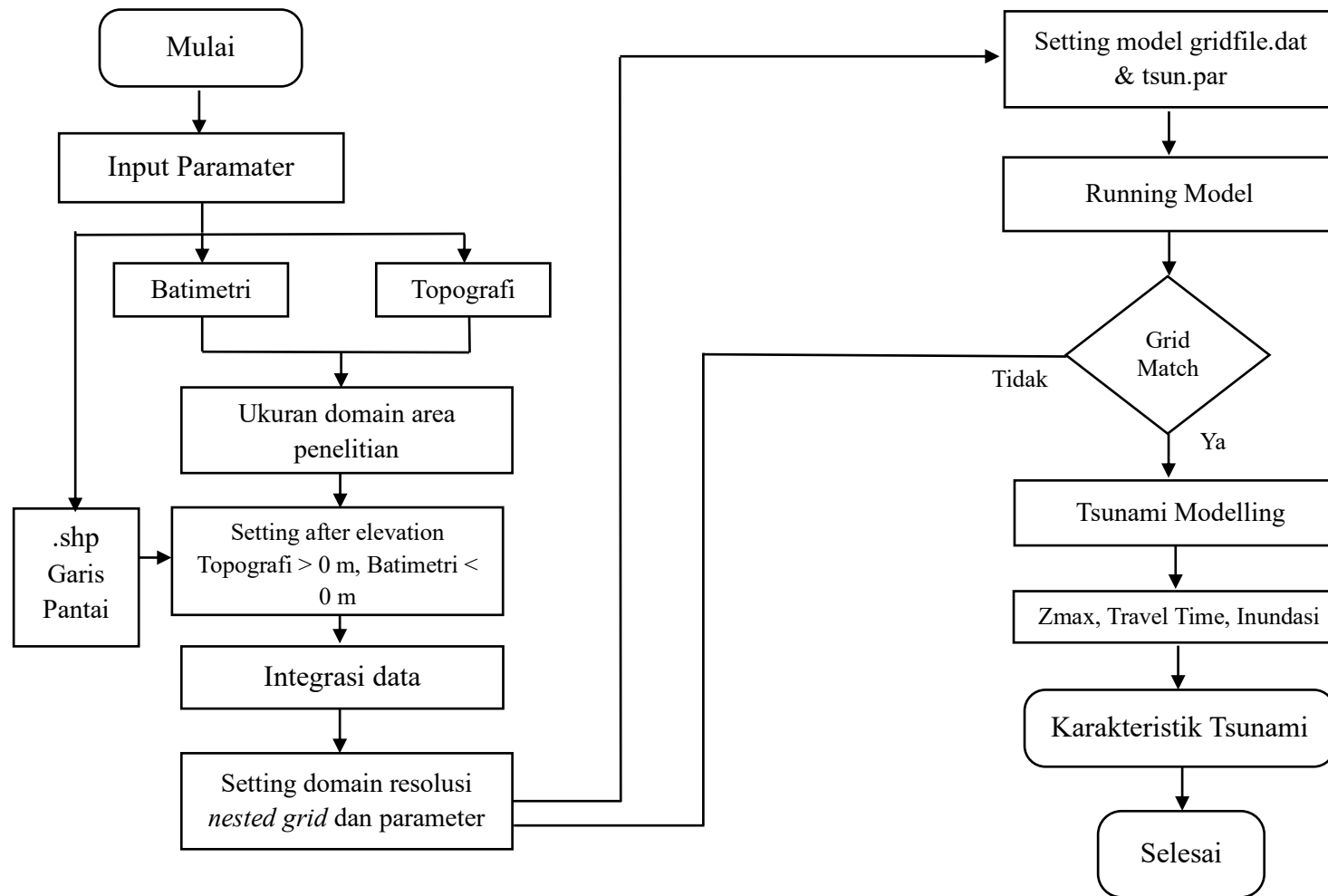
Tabel 4. Alat penelitian beserta spesifikasi dan fungsinya.

No	Alat	Spesifikasi	Fungsi
1	Laptop	HP Victus 16 S1111ax	Digunakan untuk menunjang kegiatan riset; mengolah data.
2	Perangkat lunak QGIS	Versi 3.42.1 & 2.14.18	Digunakan untuk mengolah data spasial; pembuatan peta Lokasi dan data Batimetri
3	Perangkat lunak JAGURS	Versi 0520	Digunakan untuk membuat model penjalanan Tsunami
4	Perangkat lunak Global Mapper	Versi 26	Digunakan untuk resample grid region
5	Perangkat lunak GMT	Versi 6.3.0	Digunakan untuk visualisasi data
6	Perangkat lunak Surfer	Versi 13	Digunakan untuk proses gridding

### 3.3 Rancangan Penelitian

Berikut ini merupakan rangkaian tahapan penelitian yang dilakukan pada studi berjudul “*Simulasi Penjalanan Gelombang Tsunami di Wilayah Teluk Lampung dengan Variasi Skenario Gempa*”. Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan numerik untuk mensimulasikan proses pembangkitan dan penjalanan gelombang tsunami akibat variasi parameter sumber gempa. Simulasi dilakukan

melalui beberapa tahapan utama, yaitu pengumpulan data, penentuan zona sumber gempa sebagai skenario pembangkit tsunami, penentuan region *nested grid* untuk meningkatkan resolusi spasial pada area kajian, penentuan lokasi virtual *Tide gauge* sebagai titik observasi, serta pelaksanaan simulasi tsunami untuk memperoleh parameter tinggi muka air dan dinamika gelombang. Setiap tahapan dirancang secara terintegrasi guna menghasilkan model yang representatif serta numerik yang akurat terhadap karakteristik penjalaran gelombang tsunami di wilayah Teluk Lampung. Alur penelitian secara lengkap disajikan dalam bentuk diagram pada Gambar 9.



Gambar 9. Alur Penelitian.

### 3.3.1 Pengumpulan Data

Penelitian ini dilakukan pengumpulan data sekunder dengan cara mengunduh data Peta RBI (Rupa Bumi Indonesia) yang meliputi Kota Bandarlampung, Kabupaten Pesawaran dan Kabupaten Lampung Selatan. DEM (*Digital Elevation Model*) area sekitaran Teluk Lampung dan Data Batimetri perairan Teluk Lampung. Pengunduhan data RBI, DEM, dan batimetri dapat dilakukan melalui laman Ina-Geoportal yang merupakan portal data spasial nasional yang dikembangkan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) Indonesia, dengan alamat <https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/>. Pada halaman website Ina-Geoportal data yang dipilih yaitu RBI per wilayah, DEMNAS dan BATNAS. Sebagai data tambahan, penelitian ini juga mengunduh data batimetri skala yang lebih luas milik GEBCO melalui website <https://www.gebco.net/>.

### 3.3.2 Penentuan Zona Sumber

Penentuan zona sumber gempa dilakukan untuk membangun model deformasi dasar laut sebagai pembangkit awal (*Initial Displacement*) gelombang tsunami (Okada, 1985). Zona sumber dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan potensi aktivitas seismik yang dapat menghasilkan deformasi dasar laut di wilayah sekitar Selat Sunda dan Teluk Lampung. Setelah zona sumber ditentukan, tahap berikutnya adalah penentuan parameter gempa agar mengetahui karakteristik arah penjalaran gelombang, serta dampak tsunami yang terjadi di wilayah pesisir.

Pembuatan zona sumber tsunami memerlukan penentuan parameter utama, meliputi magnitudo gempa, lokasi episentrum, kedalaman, dimensi patahan, dan geometri bidang patahan. Magnitudo menentukan besar energi seismik yang dilepaskan selama proses *rupture*, sedangkan episentrum menunjukkan posisi permukaan dari lokasi awal terjadinya gempa. Kedalaman fokus menggambarkan seberapa dekat sumber gempa terhadap dasar laut, yang berpengaruh pada besarnya deformasi vertikal yang dapat membangkitkan tsunami. Dimensi patahan terdiri atas panjang dan lebar bidang *rupture* yang menentukan luas area sumber serta besaran deformasi yang dihasilkan. Sedangkan geometri patahan menurut (Pranata, 2010), parameter bidang patahan mencakup *strike*, *dip*, dan *rake*. *Strike*

( $\phi$ ) adalah arah garis horizontal pada bidang sesar miring, diukur dari utara ke timur searah jarum jam ( $0^\circ$ – $360^\circ$ ). *Dip* ( $\delta$ ) menunjukkan kemiringan bidang sesar terhadap horizontal, diukur tegak lurus terhadap *strike*, dengan rentang  $0^\circ$ – $90^\circ$ . *Rake* ( $\lambda$ ) adalah sudut antara arah *slip* dan garis jurus pada bidang sesar, menunjukkan arah pergerakan relatif antar blok batuan, dengan nilai antara  $-180^\circ$  hingga  $180^\circ$ .

Dalam pemodelan ini, sumber tsunami ditentukan berdasarkan skenario gempa maksimum yang berasal dari struktur sesar aktif dan zona subduksi disekitar wilayah penelitian yang telah diidentifikasi oleh Pusat Studi Gempa Nasional (Pusat Studi Gempa Nasional, 2024). Segmen *megathrust* Sunda dipilih sebagai skenario gempa dalam penelitian ini karena segmen tersebut menyimpan potensi *rupture* besar yang dapat menghasilkan tsunami regional (Supendi *et al.*, 2022). Dua sesar lokal, Sesar Ujung Kulon A dan Sesar Semangko Timur B dipilih sebagai skenario gempa dalam penelitian ini karena berada disekitar struktur geologi aktif selat sunda yang berpotensi menimbulkan tsunami lokal (Susilohadi, 2019).

Adapun Skenario *Megathrust* Sunda memiliki magnitudo  $M_w$  9,2 dengan *dip*  $30^\circ$ , *strike*  $302^\circ$ , dan *rake*  $90^\circ$ . Skenario Ujung Kulon A memiliki magnitudo  $M_w$  7,3 dengan *dip*  $90^\circ$ , *strike*  $310^\circ$ , dan *rake*  $180^\circ$ . Skenario Semangko Timur B memiliki magnitudo  $M_w$  6,9 dengan *dip*  $90^\circ$ , *strike*  $330^\circ$ , dan *rake*  $180^\circ$ . Kedalaman sumber gempa ditetapkan sebesar 10 km untuk gempa sesar dan 15 km untuk gempa *megathrust*. Hal ini mengacu pada nilai umum kedalaman gempa dangkal yang digunakan dalam pemodelan tsunami yaitu 10 – 15 km (Afif & Cipta, 2015; Amirudin *et al.*, 2021; Ayunda *et al.*, 2020; Popoji *et al.*, 2024; Redyansyah, R., Satriadi, A., Saputro, 2017; Santosa & Bagus, 2014). Kedalaman 10 km mewakili bagian atas bidang patahan (*shallow portion*) tempat deformasi vertikal paling besar terjadi dan paling efektif dalam membangkitkan tsunami karena langsung menggeser dasar laut. Nilai ini dianggap sebagai kompromi ideal, (Gibbons *et al.*, 2022) menyatakan bahwa kedalaman 10 km menghasilkan amplitudo gelombang paling realistis.

Ketiga skenario tersebut kemudian dimodelkan dengan menerapkan hukum skala (*scaling law*) untuk menentukan parameter sumber gempa, khususnya

panjang (L) dan lebar (W) bidang patahan. Pendekatan ini digunakan untuk memperkirakan dimensi fisik patahan berdasarkan magnitudo maksimum dari masing-masing skenario gempa, sehingga diperoleh representasi sumber yang realistis secara geometri. Skenario pembangkit sesar menggunakan Wells & Coppersmith (1994). Sementara itu, skenario Zona Subduksi Sunda (Mmax 9,2) dimodelkan menggunakan hukum skala yang dikembangkan khusus untuk zona subduksi oleh Strasser *et al.*, (2010):

*Scaling law* skenario sesar dihitung melalui persamaan (1) dan (2) (Wells & Coppersmith, 1994):

$$\log_{10}(L) = -2.57 + 0.62 \times Mw \quad (1)$$

$$\log_{10}(W) = -0.76 + 0.27 \times Mw \quad (2)$$

*Scaling law* skenario subduksi dihitung menggunakan persamaan (3) dan (4) (Strasser *et al.*, 2010):

$$\log_{10}(L) = -2.477 + 0.585 \times Mw \quad (3)$$

$$\log_{10}(W) = -0.882 + 0.351 \times Mw \quad (4)$$

Setelah mendapatkan estimasi dimensi patahan, langkah berikutnya adalah menentukan nilai *Displacement* ( $D_u$ ). Untuk mendapatkan nilai *Displacement* ( $D_u$ ) perlu mencari nilai *Seismic moment* ( $M_0$ ) dari Gempa yang terjadi dengan cara sebagai berikut :

*Seismic moment* ( $M_0$ ) dihitung melalui persamaan (5) (Hanks & Kanamori, 1979):

$$\log_{10}(M_0) = 1.5Mw + 9.1 \quad (5)$$

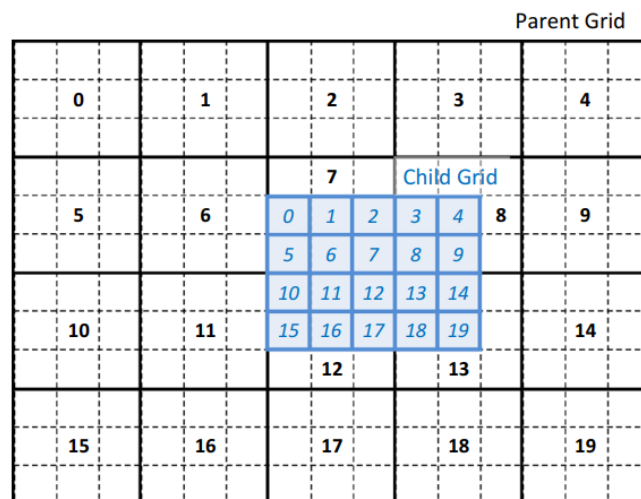
*Displacement* ( $D_u$ ) dihitung menggunakan persamaan (6) (Aki, 1966):

$$D_u = \frac{M_0}{(\mu \cdot A)} \quad (6)$$

### 3.3.3 Penentuan Region Nested grid

Pemodelan ini menggunakan grid Cartesian karena memiliki kestabilan numerik yang baik serta efisiensi komputasi yang tinggi dalam simulasi gelom-

bang tsunami. Selain itu, model JAGURS yang digunakan dalam penelitian ini berbasis grid terstruktur, sehingga pendekatan ini lebih sesuai untuk diterapkan. Penggunaan nested grid memungkinkan peningkatan resolusi secara bertahap dari skala regional hingga lokal, sehingga mampu merepresentasikan detail batimetri dan topografi pesisir secara lebih akurat tanpa meningkatkan beban komputasi secara signifikan. Pengaturan grid kasar ditempatkan pada domain dengan cakupan area yang luas (*parent grid*), sedangkan grid beresolusi lebih halus digunakan pada domain dengan area yang lebih sempit (*children grid*) agar detail topografi dan batimetri pesisir dapat direpresentasikan dengan lebih baik (Wang, 2009). Pada konsep *nested grid*, ukuran antargrid dibuat berbeda dengan rasio spasi grid berupa bilangan ganjil 1:3 untuk menjaga kontinuitas propagasi gelombang antar domain (Oktaviani *et al.*, 2012). Komposisi *Nested grid* disajikan pada Gambar 10.



Gambar 10. *Nested grid*

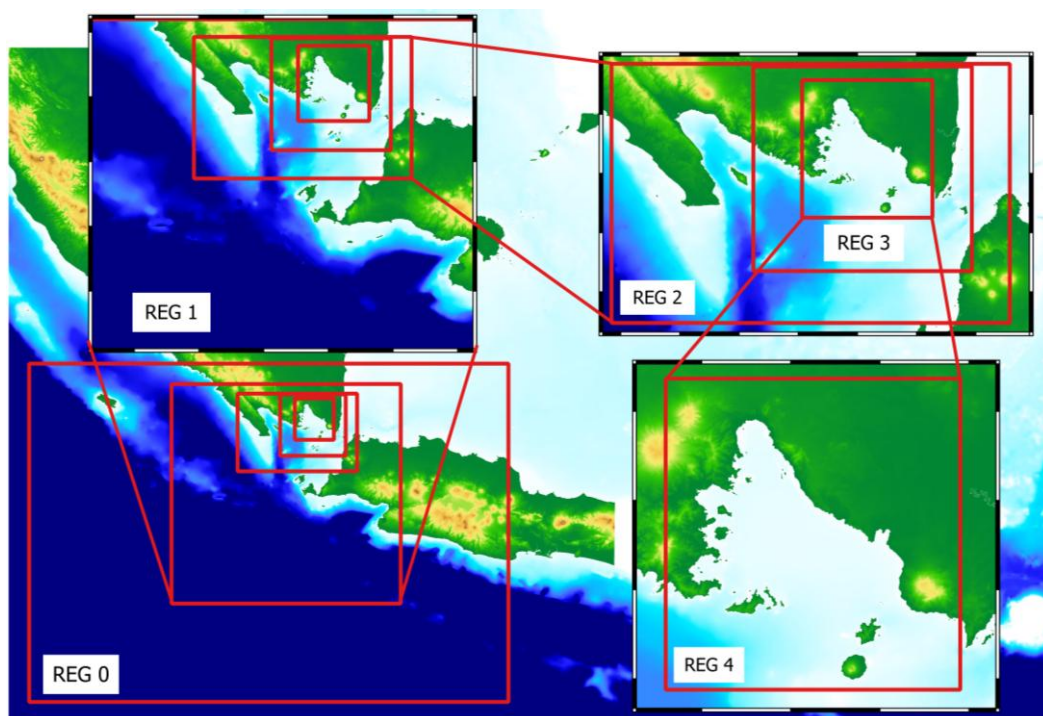
Sumber: Baba *et al.*, 2015

Dalam penerapannya, digunakan enam tingkat grid yang berbeda, meliputi Region 0 dengan resolusi 2430 m, Region 1 sebesar 810 m, Region 2 sebesar 270 m, Region 3 sebesar 90 m, Region 4 sebesar 30 m. Konfigurasi ini memungkinkan perhitungan parameter penting tsunami, seperti tinggi *run-up*, waktu tiba, dan luas genangan, dilakukan dengan lebih akurat, terutama di kawasan pesisir yang memiliki kontur topografi kompleks (Baba *et al.*, 2015). Secara keseluruhan, jumlah *nested grid* yang digunakan adalah sebanyak lima buah yang disajikan pada tabel 5.

Tabel 5. Region beserta resolusi spasial (m) dan sumber datanya

Region	Resolusi spasial (m)	Sumber data
0	2430	GEBCO
1	810	Resample GEBCO Region 0
2	270	Resample GEBCO Region 1
3	90	Resample GEBCO Region 2
4	30	Mosaic DEMNAS dan BATNAS

Dalam penyusunannya, Region 0 hingga Region 3 dibuat menggunakan data GEBCO dengan resolusi spasial 2430 sebagai basis data global yang mencakup area sumber dan wilayah perambatan tsunami di laut lepas. Sementara itu, Region 4 menggunakan data dari Badan Informasi Geospasial (BIG), yaitu BATNAS (Batimetri Nasional) dan DEMNAS (Digital Elevation Model Nasional), dengan resolusi spasial 30 meter. Konfigurasi grid yang digunakan disajikan pada Gambar 11.



Gambar 11. Konfigurasi Grid.

### 3.3.4 Penentuan Lokasi *Tide gauge*

Stasiun pasang surut (*tide gauge*) digunakan untuk mengetahui bentuk pergerakan gelombang tsunami terhadap waktu tiba di wilayah daratan. Penempatan

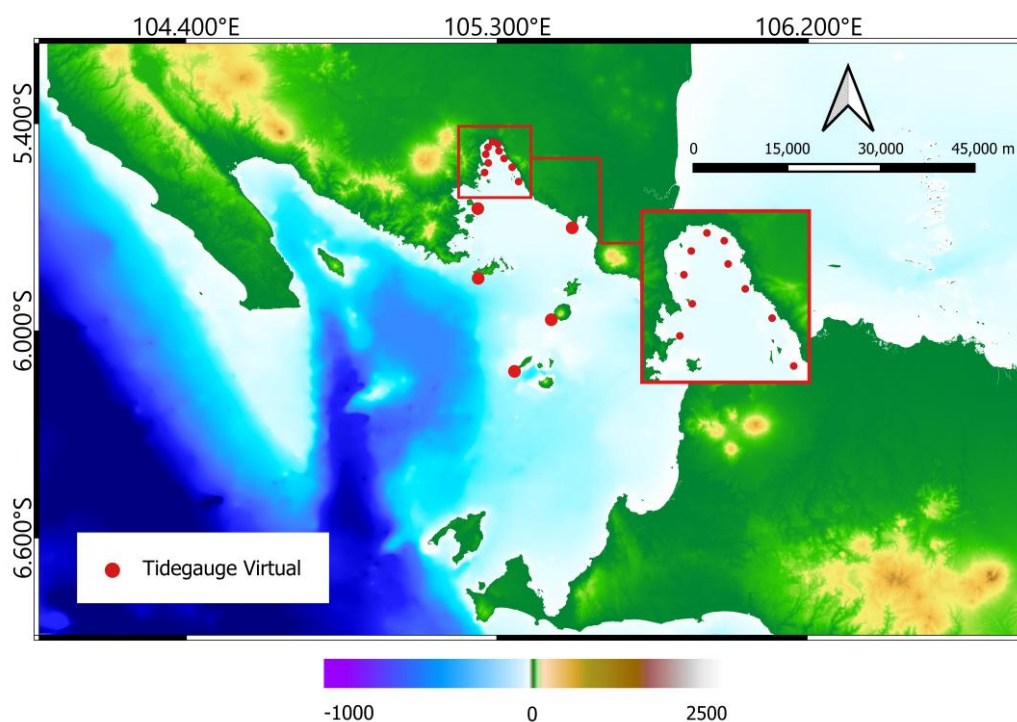
*virtual Tide gauge* perlu mempertimbangkan jarak yang tepat dari garis pantai agar data yang diperoleh tetap akurat dan dapat digunakan dengan baik dalam pemodelan tsunami. Menurut Peng *et al.* (2025) disarankan untuk membangun stasiun virtual pada rentang 5–15 km dari pantai, sebagai kompromi antara kedekatan lokasi dan kualitas data yang dihasilkan. Lokasi *tide gauge* disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Lokasi *tide gauge*.

No	Nama Lokasi	Koordinat X (UTM)	Koordinat Y (UTM)
1	Krakatau	539123,0	9316908,0
2	Pulau_Legundi	527173,9	9353507,9
3	Pulau_Sebesi	550604,1	9340255,8
4	Kelagian	527053,1	9375840,1
5	Sari_Ringgung	529220,4	9387378,7
6	Merak_Belantung	557292,0	9369676,2
7	Tarahan	540128,1	9384498,1
8	Tangkil	530406,7	9390451,5
9	Pasir_Putih	538059,0	9389075,7
10	PPI_Lempasing	529609,1	9393228,4
11	Srengsem	535482,1	9391877,8
12	Kota_Karang	530310,0	9395501,7
13	Panjang_Port	533842,0	9394262,0
14	Way_Lunik	533470,8	9396487,9
15	Sukaraja	531814,7	9397225,3

Setiap *tide gauge* mampu merepresentasikan perubahan karakteristik gelombang sepanjang lintasan propagasi dari laut dalam menuju pantai serta menunjukkan pengaruh geometri teluk terhadap konsentrasi energi gelombang (Heidarzadeh *et al.*, 2019; Shimozono, 2021). Secara umum, penempatan *tide gauge* disebar pada lokasi yang merata dan tidak saling berdekatan, sehingga setiap titik mampu merepresentasikan kondisi wilayah yang berbeda (Sriyanto *et al.*, 2022). Dengan demikian, konfigurasi 15 titik *tide gauge* yang digunakan dalam penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang komprehensif mengenai waktu tiba, tinggi gelombang, serta variasi karakteristik tsunami di wilayah Teluk Lampung. Selain itu, titik-titik di kawasan pelabuhan dan permukiman padat dipilih untuk menganalisis potensi dampak tsunami pada wilayah berisiko

tinggi (Li *et al.*, 2012). Sebaran *Tide gauge* pada penelitian ini disajikan pada Gambar 12.



Gambar 12. Sebaran *tide gauge*.

### 3.3.5 Simulasi Tsunami

Sebelum menjalankan simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak JAGURS, terlebih dahulu dilakukan penyusunan data dan parameter yang diperlukan. Data yang dimasukkan meliputi skenario sumber tsunami, *nested grid* pada masing-masing region, serta *virtual Tide gauge* yang seluruhnya dikonfigurasi dalam skrip *gridfile.dat*. Durasi simulasi tsunami dijalankan selama 10.800 detik (3 jam) dengan tujuan untuk menangkap seluruh fase penjalaran gelombang tsunami, mulai dari pembangkitan di sumber hingga interaksi gelombang di wilayah pesisir. Rentang waktu ini dipilih agar seluruh titik pengamatan *tide gauge* dapat merekam waktu tiba dan tinggi gelombang maksimum secara optimal, termasuk kemungkinan terjadinya gelombang susulan serta efek refleksi dan resonansi di dalam Teluk Lampung yang diatur pada file skrip parameter *tsun.par*.

Hasil simulasi berupa data elevasi muka air laut dan *virtual Tide gauge* dalam format *.grd*. Data tersebut kemudian diekstraksi dan divisualisasikan menggu-

nakan perangkat lunak Generic Mapping Tools (GMT). Selanjutnya, hasil output dianalisis menggunakan QGIS untuk menentukan waktu tiba gelombang tsunami, tinggi maksimum gelombang, serta luas area genangan. Hasil akhir pemodelan disajikan dalam bentuk snapshot dan grafik, kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik penjalaran gelombang tsunami pada masing-masing skenario gempa. Skenario dan parameter tsunami disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Skenario dan Parameter Tsunami.

Skenario	Episenter	Mag. (Mw)	D (km)	L (m)	W (m)	$\delta$ ( $^{\circ}$ )	$\varphi$ ( $^{\circ}$ )	$\lambda$ ( $^{\circ}$ )	Du (m)
<i>Megathrust</i>	-5,83 ; 103.18	9,2	15	1294,40	450,55	30	310	90	13,6
Semangko Timur B	-6,20 ; 104.83	7,5	10	120,23	18,41	90	335	60	10,1
Ujung Kulon A	-6,38 ; 104.90	7,3	10	90,36	16,26	90	330	60	7,6

Keterangan:

Mag: Magnitudo

D : *Depth*

L : *Length*

W : *Width*

$\delta$  : *Dip*

$\varphi$  : *Strike*

$\lambda$  : *Rake*

Du : *Displacement*

## V. SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Variasi skenario gempa memengaruhi karakteristik penjalaran tsunami, yang ditunjukkan oleh perbedaan *initial displacement*, arah propagasi, serta distribusi energi gelombang. Skenario dengan magnitudo lebih besar menghasilkan penjalaran tsunami yang lebih luas dan menunjukkan kecenderungan konsentrasi energi di wilayah dalam Teluk Lampung.
2. Perbedaan skenario gempa juga memengaruhi waktu tiba gelombang, tinggi gelombang maksimum, serta luas inundasi. Wilayah pesisir yang berhadapan langsung dengan sumber tsunami cenderung mengalami waktu tiba lebih cepat, sedangkan wilayah bagian dalam teluk mengalami amplifikasi gelombang akibat pengaruh batimetri dan morfologi pesisir. Skenario dengan magnitudo lebih tinggi menghasilkan tinggi gelombang dan luas genangan yang lebih besar dibandingkan skenario lainnya.

### 5.2 Saran

Berdasarkan dari hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya menggunakan data Digital Elevation Model (DEM) beresolusi tinggi ( $\leq 10$  m) untuk meningkatkan akurasi pemodelan, serta mengintegrasikan hasil simulasi tsunami dengan data pendukung lainnya guna menghasilkan peta bahaya dan risiko yang lebih komprehensif sebagai dasar penataan ruang, perencanaan evakuasi, dan strategi mitigasi bencana di wilayah pesisir.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abdelhafeez, M., Park, H., Sherif, M., Ghanem, A., & Moon, D.-S. (2025). Effects of tsunami wave and bathymetric parameters on hydrodynamic forces and structural fragility. *Journal of Building Engineering*, *115*, 115077. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2025.115077>
- Afif, H., & Cipta, A. (2015). Tsunami hazard map in eastern Bali. *AIP Conference Proceedings*, *1658*. <https://doi.org/10.1063/1.4915041>
- Aki, K. (1966). Generation and propagation of G waves from the Niigata earthquake of June 16, 1964. Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, *44*, 73–88.
- Alhamidi, Pakpahan, V. H., & Simanjuntak, J. E. S. (2018). Analysis of tsunami disaster resilience in Bandar Lampung Bay Coastal Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *158*(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/158/1/012037>
- Aljber, M., Lee, H. S., Jeong, J. S., & Cabrera, J. S. (2024). Tsunami inundation modelling in a built-in coastal environment with adaptive mesh refinement: the onagawa benchmark test. *Journal of Marine Science and Engineering*, *12*(1). <https://doi.org/10.3390/jmse12010177>
- Amirudin, M. R., Pujiastuti, D., & Agustian, M. R. (2021). Pengaruh variasi magnitudo dan titik sumber terhadap ketinggian, waktu tempuh dan inundasi gelombang tsunami di kabupaten pesisir selatan sumatera barat. *Jurnal Fisika Unand (JFU)*, *10*(3), 384–391.
- Anjasmara, I. M., Mauradhia, A., & Susilo. (2019). *Surface deformation and earthquake potential in Surabaya from GPS campaigns data*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, *389*, 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/389/1/012032>
- Aperus, R., Pujiastuti, D., Billyanto, R., & Panjang, P. (2016). Pemodelan tinggi dan waktu tempuh gelombang tsunami berdasarkan data historis gempa bumi Bengkulu 4 Juni 2000 di pesisir Pantai Bengkulu. *Jurnal Fisika Unand*, *5*(4), 364–370. <https://doi.org/10.25077/jfu.5.4.364-370.2016>

- Aranguiz, R., Catalán, P. A., Cecioni, C., Bellotti, G., Henriquez, P., & González, J. (2019). Tsunami resonance and spatial pattern of natural oscillation modes with multiple resonators. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124, 7797–7816. <https://doi.org/10.1029/2019JC015206>
- Ayunda, G., Ismanto, A., Hariyadi, H., Sugianto, D. N., & Helmi, M. (2020). Analisis Penjalaran *Run-up* Gelombang Tsunami Menggunakan Pemodelan Numerik 2D di Pesisir Kota Bengkulu. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3), 253–260. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i3.8572>
- Baba, T., Takahashi, N., Kaneda, Y., Ando, K., & Matsuoka, D. (2015). Parallel implementation of dispersive tsunami wave modeling with a nesting algorithm for the 2011 Tohoku tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, 172(12), 3455–3472. <https://doi.org/10.1007/s00024-015-1049-2>
- Baba, T., Allgeyer, S., Hossen, J., Cummins, P. R., Tsushima, H., Imai, K., Yamashita, K., & Kato, T. (2017). Accurate numerical simulation of the far-field tsunami caused by the 2011 Tohoku earthquake, including the effects of Boussinesq dispersion, seawater density stratification, elastic loading, and gravitational potential change. *Ocean Modelling*, 111, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.01.002>
- Badan Geologi. (2023). *Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416 - 2021*. Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2025). *Indeks risiko bencana Indonesia* (Vol. 3). Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2012). *Peraturan Kepala Badan Nasional Penanggulangan Bencana Nomor 2 Tahun 2012 tentang Pedoman Umum Pengkajian Risiko Bencana*. BNPB.
- Behrens, J., Løvholt, F., Jalayer, F., Lorito, S., Salgado-Gálvez, M. A., Sørensen, M., Abadie, S., Aguirre-Ayerbe, I., Aniel-Quiroga, I., Babeyko, A., Baiguera, M., Basili, R., Belliazzi, S., Grezio, A., Johnson, K., Murphy, S., Paris, R., Rafliana, I., De Risi, R., ... Vyhmeister, E. (2021). Probabilistic tsunami hazard and risk analysis: a review of research gaps. *Frontiers in Earth Science*, 9(April), 1–28. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.628772>
- Brune, J. N., & Thatcher, W. (2002). Strength and energetics of active fault zones. In W. H. K. Lee, H. Kanamori, P. C. Jennings, & C. Kisslinger (Eds.), *International handbook of earthquake and engineering seismology, Part A* (Vol. 81A, pp. 569–588). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(02\)80238-8](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(02)80238-8)
- Budiman, M. J., Sutoyo, & Syafiudin, M. F. (2024). Pemetaan kerentanan bahaya tsunami dengan pemodelan inundansi (Studi kasus : Kabupaten Bantul). *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 9(2), 157–166. <https://doi.org/10.29244/jsil.9,2.157-166>
- Charvet, I., Ioannou, I., Rossetto, T., Suppasri, A., & Imamura, F. (2014). Empirical fragility assessment of buildings affected by the 2011 Great East Japan

- tsunami using improved statistical models. *Natural Hazards*, 73(2), 951–973. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1118-3>
- Cheng, A. C., Suppasri, A., Pakoksung, K., *et al.* (2023). Resonance characteristics and impact of the 2006 Pingtung tsunami in southern Taiwan. *Geoscience Letters*, 10, 17. <https://doi.org/10.1186/s40562-023-00271-0>
- Cronin, M. A. (2004). A model of knowledge activation and insight in problem solving. *Complexity*, 9(5), 17–24. <https://doi.org/10.1002/cplx.20031>
- Daniell, J. E., Schaefer, A. M., & Wenzel, F. (2017). Losses associated with secondary effects in earthquakes. *Frontiers in Built Environment*, 3(June), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00030>
- Darmawan, H., Mutaqin, B. W., Harijoko, W., Wibowo, A., Edi, H., & Nia Haerani Mamay Surmayadi, Syarifudin, Raditya Jati, S. and W. A. (2020). Topography and structural changes of Anak Krakatau due to the December 2018 catastrophic events. *Indonesian Journal of Geography*, 52(3), 402–410.
- Dean, R. G., & Dalrymple, R. A. (1984). *Water wave mechanics for engineers and scientists*. (2nd ed.). World Scientific Publishing. <https://doi.org/10.1029/eo066i024p00490-06>
- Dielforder, A., Bocchini, G. M., & Hampel, A. (2025). Importance of forearc topography for the triggering of aftershocks of megathrust earthquakes: Insights from mechanical models and the Tohoku-Oki and Maule earthquakes. *Solid Earth*, 16, 593–618. <https://doi.org/10.5194/se-16-593-2025>
- Eldrup, M. R., & Andersen, T. L. (2020). Numerical study on regular wave shoaling, de-shoaling and decomposition of free/bound waves on gentle and steep foreshores. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/JMSE8050334>
- Fujii, Y., & Satake, K. (2024). Modeling the 2022 Tonga eruption tsunami recorded on ocean bottom pressure and tide gauges around the Pacific. *Pure and Applied Geophysics*, 181, 1793–1809. <https://doi.org/10.1007/s00024-024-03477-1>
- Gibbons, S. J., Lorito, S., de la Asunción, M., Volpe, M., Selva, J., Macías, J., Sánchez-Linares, C., Brizuela, B., Vöge, M., Tonini, R., Lanucara, P., Glimsdal, S., Romano, F., Meyer, J. C., & Løvholt, F. (2022). The sensitivity of tsunami impact to earthquake source parameters and Manning friction in high-resolution inundation simulations. *Frontiers in Earth Science*, 9(757618), 1–23. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.757618>
- Gusman, A. R., Supendi, P., Nugraha, A. D., Power, W., Latief, H., Sunendar, H., *et al.* (2019). Source model for the tsunami inside Palu Bay following the 2018 Palu earthquake, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, 46, 8721–8730. <https://doi.org/10.1029/2019GL082717>
- Gusman, A. R., Roger, J., Power, W., Fry, B., & Kaneko, Y. (2022). The 2021 Loyalty Islands earthquake (Mw 7.7): Tsunami waveform inversion and implications for tsunami forecasting for New Zealand. *Earth and Space Science*,

9, e2022EA002346. <https://doi.org/10.1029/2022EA002346>

- Hamamoto, S., Ito, L., Yoneyama, N., & Tokai, A. (2021). Case study for the predictive environmental risk assessment of hexamethylenetetramine release to the Yodo River during a massive tsunami attack. *Water*, *13*(4), 549. <https://doi.org/10.3390/w13040549>
- Hanks, T. C., & Kanamori, H. (1979). A moment magnitude scale. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, *84*(B5), 2348–2350. <https://doi.org/10.1029/JB084iB05p02348>
- Haz, A. A., Zakaria, A., Tugiono, S., & Joko, D. (2022). Studi difraksi gelombang melalui breakwater tenggelam dengan variasi panjang gelombang. *Jurnal Rekayasa Sipil Dan Desain*, *9*(4), 933–942. <https://doi.org/10.23960/jrsdd.v9i4.2207>
- Heidarzadeh, M., Muhari, A., & Wijanarto, A. B. (2019). Insights on the Source of the 28 September 2018 Sulawesi Tsunami, Indonesia Based on Spectral Analyses and Numerical Simulations. *Pure and Applied Geophysics*, *176*(1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2065-9>
- Heidarzadeh, M., Gusman, A. R., Ishibe, T., Sabeti, R., & Šepić, J. (2022). Estimating the eruption-induced water displacement source of the 15 January 2022 Tonga volcanic tsunami from tsunami spectra and numerical modelling. *Ocean Engineering*, *259*, 112165. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112165>
- Heinrich, P. H., Piatanesi, A., & Hébert, H. (2001). Numerical modelling of tsunami generation and propagation from submarine slumps: The 1998 Papua New Guinea event. *Geophysical Journal International*, *145*(1), 97–111. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2001.00336.x>
- Hidayah, Z., Rohmah, N., & Wardhani, M. (2022). Coastal vulnerability study on potential impact of tsunami and community resilience in Pacitan Bay, East Java. *Forum Geografi*, *36*(1). <https://doi.org/10.23917/forgeo.v36i1.17160>
- Hossain, S. M., Rafi, S. H., Rokonuzzaman, M., & Wahed, M. A. (2016). An Enhanced Tsunami Detection System. *International Journal of Innovation and Scientific Research*, *21*(1), 103–109.
- Hu, G., Li, L., Ren, Z., & Zhang, K. (2023). The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *23*(2), 675–691. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-675-2023>
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2019). *Tsunami glossary*, 2019 (IOC Technical Series No. 85). UNESCO. <https://aquadocs.org/handle/1834/42083>
- Jumadi, J., Priyono, K. D., Amin, C., Saputra, A., Gomez, C., Lam, K. C., Rohman, A., Patel, N., Sattar, F., Nawaz, M., & Wardani, K. S. (2025). Tsunami risk mapping and sustainable mitigation strategies for megathrust earthquake scenario in Pacitan coastal areas, Indonesia. *Sustainability*, *17*(6), Article 2564. <https://doi.org/10.3390/su17062564>

- Khoiridah, S., Ibad, M. I., & Setyonegoro, W. (2017). Validasi potensi tsunami berdasarkan estimasi durasi patahan dan pemodelan tsunami di wilayah Barat Sumatra (studi kasus: Gempa bumi Nias 2005 dan Mentawai 2010). *Oseanologi dan Limnologi di Indonesia*, 2(1), 39–54. <https://doi.org/10.14203/oldi.2017.v2i1.17>
- Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., & Imamura, F. (2009). Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Aceh, Indonesia. *Coastal Engineering Journal*, 51(3), 243–273. <https://doi.org/10.1142/S0578563409002004>
- Latifah, A. L., Tofany, N., & Alphalevy, M. R. J. (2024). Landslide-generated wave simulation using coupled multi-phase flow and Boussinesq-type models. *Ocean Engineering*, 297, 117461. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117461>
- Li, F., Bicknell, C., Lowry, R., & Li, Y. (2012). A comparison of extreme wave analysis methods with 1994–2010 offshore Perth dataset. *Coastal Engineering*, 69, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.05.006>
- Liang, S., Li, Z., Zhang, W., & Gao, Y. (2023). The characteristics of strike-slip faults and their control on hydrocarbon distribution in deep carbonate reservoirs of the central Sichuan Basin. *Frontiers in Earth Science*, 1–16. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1064835>
- Liu, W., Qian, F., Ning, Y., & Cheng, R. (2024). 2DH numerical study of solitary wave processes around an idealized reef-fringed island. *Water*, 16(14), 1991. <https://doi.org/10.3390/w16141991>
- Maravelakis, N., Kalligeris, N., Lynett, P., Vassilis, S., & Synolakis, C. E. (2014). A study of wave amplification in the Venetian harbor of Chania, Crete. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 59. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.waves.59>
- Millar, O., Ma, L., & Karpadakis, I. (2025). Tsunami-induced loads on coastal structures: Experimental investigation and prediction. *Ocean Engineering*, 312, 121762. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121762>
- Miyashita, T., Nishino, A., Ho, T. C., *et al.* (2023). Multi-scale simulation of subsequent tsunami waves in Japan excited by air pressure waves due to the 2022 Tonga volcanic eruption. *Pure and Applied Geophysics*, 180, 3195–3223. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03332-9>
- Mueller, C., Power, W., Fraser, S., & Wang, X. (2015). Effects of rupture complexity on local tsunami inundation: Implications for probabilistic tsunami hazard assessment by example. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 120, 488–502. <https://doi.org/10.1002/2014JB011301>
- Muhari, A., Imamura, F., Suppasri, A., & Mas, E. (2012). Tsunami arrival time characteristics of the 2011 East Japan tsunami obtained from eyewitness accounts, evidence and numerical simulation. *Journal of Natural Disaster Science*, 34(1), 91–104. <https://doi.org/10.2328/jnds.34.91>

- Mulia, I. E., Heidarzadeh, M., & Satake, K. (2022). Effects of depth of fault slip and continental shelf geometry on the *generation* of anomalously long-period tsunami by the July 2020 Mw 7.8 Shumagin (Alaska) earthquake. *Geophysical Research Letters*, *49*, e2021GL094937. <https://doi.org/10.1029/2021GL094937>
- Nugroho, P. C., Pinuji, S. E., Yulianti, S. G., Syauqi, Shabrina, F. Z., & Septian, R. T. (2020). *Modul teknis penyusunan kajian risiko bencana gelombang ekstrem dan abrasi*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB).
- Okada, Y. (1985). Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *75*(4), 1135–1154.
- Oktaviani, N., Basith, A., & Kongko, W. (2012). *Pemodelan spasial landaan tsunami menggunakan variasi lokasi sumber dan magnitud gempa studi kasus Kota Padang*. In Proceedings of the 1st Conference on Geospatial Science and Engineering (Vol. 1). Yogyakarta.
- Pakoksung, K., Suppasri, A., & Imamura, F. (2023). Tsunami wave characteristics from the 1674 Ambon earthquake event based on landslide scenarios. *Geotechnics*, *3*(3), 700–718. <https://doi.org/10.3390/geotechnics3030038>
- Pakoksung, K., Ram-Indra, T., Inseepong, N., Polsomboon, P., Xu, M., Laonamsai, J., & Chuenchum, P. (2025). Resonance analysis of landslide-induced tsunamis using a two-layer model in Ambon Bay, Indonesia. *Ocean Engineering*, *313*, 123407. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.123407>
- Park, H., Cox, D. T., Lynett, P. J., Wiebe, D. M., & Shin, S. (2013). Tsunami *inundation* modeling in constructed environments: A physical and numerical comparison of free-surface elevation, velocity, and momentum flux. *Coastal Engineering*, *79*, 9–21. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.04.002>
- Peng, F., Deng, X., Shen, Y., & Cheng, X. (2025). The International Altimetry Service 2024 (IAS2024) coastal sea level dataset and first evaluations. *Earth System Science Data*, *17*(4), 1441–1460. <https://doi.org/10.5194/essd-17-1441-2025>
- Popoji, R. M., Tamuntuan, G. H., & Pasau, G. (2024). Pemodelan penjalaran gelombang tsunami dan inundasi di daerah Bolaang Mongondow Selatan sebagai akibat gempa pada zona selatan subduksi ganda Laut Maluku (studi kasus: Desa Salongo dan Desa Pinolosian). *Jurnal LPPM Bidang Sains dan Teknologi*, *9*(2), 85–93.
- Pranata, D. A. (2010). Analisis mekanisme fokus gempa bumi di Meulaboh (Nanggroe) (No Publikasi 0110-07-6119; 1111 FIS s)[Skripsi, Universitas Islam Negeri Syarif Hidayatullah Jakarta]. Repository UIN Syarif Hidayatullah Jakarta.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2024). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman*. (1st ed.). Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Putri, A. I. K. (2023). Pemodelan daerah bahaya tsunami di Kota Palu dengan

variasi parameter gempa (Skripsi tidak dipublikasikan). Universitas Gadjah Mada.

- Qiu, X., Li, L., Li, F., Zheng, T., Cao, J., & Wang, P. (2026). Sustained tsunami-wave excitations and oscillations in the lagoon of a semienclosed atoll island in the South China Sea. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 19(1), 2507752. <https://doi.org/10.1080/19942060.2025.2507752>
- Rakuasa, H. (2023). Modeling of Tsunami Prone Areas in Kairatu Barat District, Seram Bangian Barat Regency. *International Journal of Multidisciplinary Approach Research and Science*, 2(01), 1–9. <https://doi.org/10.59653/ijmars.v2i01.287>
- Redyansyah, R., Satriadi, A., Saputro, S. (2017). Pemodelan penjalaran gelombang tsunami dan analisa daerah jangkauan di Teluk Sumbreng, Trenggalek. *Oseanografi*, 6(1), 295–304. <http://ejournals1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Reicherter, K. (2015). Tsunamis as Paleoseismic Indicators. *Encyclopedia of Earthquake Engineering*, 26(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35344-4>
- Ren, Z., Higuera, P., & Liu, P. L.-F. (2023). On tsunami waves induced by atmospheric pressure shock waves after the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano eruption. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2022JC019166. <https://doi.org/10.1029/2022JC019166>
- Röbke, B. R., & Vött, A. (2017). The tsunami phenomenon. *Progress in Oceanography*, 159(September), 296–322. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2017.09.003>
- Roro Setiowati, A., Sabri, L., & Sukmono, A. (2023). Analisis Tingkat Risiko Tsunami Kota Ambon Dengan Metode Analytical Hierarchy Process (Ahp). *Jurnal Geodesi Undip Januari*, 12(1), 30–39.
- Ruffini, G., Codato, C., Briganti, R., *et al.* (2026). A methodology for tsunami inundation numerical simulations relying on inputs from probabilistic databases. *Natural Hazards*, 122, 109. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07892-y>
- Saito, T. (2017). Tsunami generation: Validity and limitations of conventional theories. *Geophysical Journal International*, 210(3), 1888–1900. <https://doi.org/10.1093/gji/ggx275>
- Sandanbata, O., Satake, K., Takemura, S., Watada, S., Maeda, T., & Kubota, T. (2024). Enigmatic tsunami waves amplified by repetitive source events near Sofugan volcano, Japan. *Geophysical Research Letters*, 51, e2023GL106949. <https://doi.org/10.1029/2023GL106949>
- Santosa, M. I. I., & Bagus, J. (2014). Pemodelan tsunami berdasarkan parameter mekanisme sumber gempa bumi dari analisis waveform tiga komponen gempa bumi mentawai 25 oktober 2010. *Jurnal Sains Dan Seni Pomits*, 3(2), 86–91. [www.ngdc.noaa.gov](http://www.ngdc.noaa.gov).

- Satake, K. (2015). Tsunamis. *Treatise on Geophysics: Second Edition*, 4, 477–504. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-53802-4.00086-5>
- Shimozono, T. (2021). Tsunami *propagation* kernel and its applications. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 21(7), 2093–2108. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-2093-2021>
- Soejarwo, P. A., Rusdi, R., Kodiran, T., & Muawanah, U. (2021). Estimation of communities and tourists willingness to pay for tsunami disaster mitigation of marine tourism in the kalianda coastal area, south lampung regency. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 19(1), 1–9. <https://doi.org/10.14710/jil.19.1.1-9>
- Sorensen, R. M. (2006). Basic coastal engineering (3rd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-23332-5>
- Sriyanto, S. P. D., Angmalisang, P. A., & Manu, L. (2022). Optimal tide gauge location for tsunami validation in the Lembeh Island, North Sulawesi. *Indonesian Journal on Geoscience*, 9(3), 315–327. <https://doi.org/10.17014/ijog.9.3.315-327>
- Strasser, F. O., Arango, M. C., & Bommer, J. J. (2010). Scaling of the source dimensions of interface and intraslab subduction-zone earthquakes with moment magnitude. *Seismological Research Letters*, 81(6), 941–950. <https://doi.org/10.1785/gssrl.81.6.941>
- Sugawara, D. (2021). Numerical modeling of tsunami: Advances and future challenges after the 2011 Tohoku earthquake and tsunami. *Earth-Science Reviews*, 211, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103498>
- Supendi, P., Widiyantoro, S., Rawlinson, N., Wibowo, A., Priyobudi, P., Palgunadi, K. H., Nugraha, A. D., Imran, I., Marliyani, G. I., Daryono, D., Prayitno, B. S., Sadly, M., Karnawati, D., Sari, N., & Sugiharto, A. (2022). Analysis of the 2021 semangko bay earthquake sequence in southern sumatra, indonesia, using broadband seismic network data. *Seismological Research Letters*, 93(3), 1373–1381. <https://doi.org/10.1785/0220210304>
- Suppasri, A., Leelawat, N., Latcharote, P., Roeber, V., Yamashita, K., Hayashi, A., Ohira, H., Fukui, K., Hisamatsu, A., Nguyen, D., & Imamura, F. (2017). The 2016 Fukushima earthquake and tsunami: Local tsunami behavior and recommendations for tsunami disaster risk reduction. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 21, 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.12.016>
- Susilohadi. (2019). Shallow seismic atlas of northeastern Sunda Strait and Lampung Bay. *Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi Kelautan*.
- Svendsen, I. A., & Jonsson, I. G. (1976). Hydrodynamics of coastal regions. Technical University of Denmark.
- Tajalli-Bakhsh, T. S., Grilli, S. T., & Grilli, A. (2015). Dynamic tidal effects on tsunami coastal hazard in large estuaries: Case of the Chesapeake Bay/James River, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(9).

- Tan, A., Chilvery, A. K., Dokhanian, M., & Crutcher, S. H. (2012). Tsunami *propagation* models based on first principles. *Tsunami - Analysis of a Hazard - From Physical Interpretation to Human Impact*.  
<https://doi.org/10.5772/50508>
- Takagi, H., Siddiq, N. L., Tanako, F., & De La Rosa, D. P. B. (2024). Locally amplified tsunami in Iida Bay due to the 2024 Noto Peninsula earthquake. *Ocean Engineering*, *306*, 118180.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118180>
- Tappin, D. R. (2021). The continuing underestimated tsunami hazard from submarine landslides. In M. Sassa, C. Canuti, & Y. Yin (Eds.), *Understanding and reducing landslide disaster risk* (pp. 343–350). Springer.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-030-60196-6\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-60196-6_24)
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik pantai*. Beta Offset.
- Tsuji, Y., Tanioka, Y., Matsutomi, H., Nishimura, Y., Kamataki, T., Murakami, Y., Sakakiyama, T., Moore, A., Gelfenbaum, G., Nugroho, S., Waluyo, B., Sukanta, I., Triyono, R., & Namegaya, Y. (2006). Damage and Height Distribution of Sumatra Earthquake-Tsunami of December 26, 2004, in Banda Aceh City and its Environs. *Journal of Disaster Research*, *1*(1), 103–115.  
<https://doi.org/10.20965/jdr.2006.p0103>
- Umar, E. P. (2016). Mekanisme sumber gempa bumi (*focal mechanism*) Manokwari. *Jurnal Geomine*, *4*(1). <https://doi.org/10.33536/jg.v4i1.38>
- Umeda, S., Yuhi, M., Arita, M., & Ninomiya, J. (2025). Characteristics of tsunami *propagation* around the northern to western coasts of Noto Peninsula, Japan, generated by the 2024 Noto Peninsula earthquake. *Coastal Engineering Journal*, *67*(4), 699–720. <https://doi.org/10.1080/21664250.2025.2560748>
- Varsoliwala, A. C., & Singh, T. R. (2021). Mathematical modeling of tsunami wave *propagation* at mid ocean and its amplification and *run-up* on shore. *Journal of Ocean Engineering and Science*, *6*(4), 367–375.  
<https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.03.003>
- Vidyattama, Y., Merdikawati, N., & Tadjoeeddin, M. Z. (2021). Aceh tsunami: Long-term economic recovery after the disaster. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, *66*(September), 102606.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102606>
- Wang, X. (2009). *User manual for COMCOT version 1.7* (First draft).
- Wang, Y., Zamora, N., Quiroz, M., Satake, K., & Cienfuegos, R. (2021). Tsunami resonance characterization in Japan due to trans-Pacific sources: Response on the bay and continental shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, *126*(6), e2020JC017037. <https://doi.org/10.1029/2020JC017037>
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., & Muhari, A. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java, Indonesia. *Scientific Reports*, *10*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>

- Weiss, R., Dura, T., & Irish, J. L. (2022). Modeling coastal environmental change and the tsunami hazard. *Frontiers in Marine Science*, 9, 871794. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.871794>
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, *rupture* length, *rupture* width, *rupture* area, and surface displacement. *Bulletin - Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002. <https://doi.org/10.1785/bssa0840040974>
- Xie, P., & Du, Y. (2023). Tsunami wave *generation* in Navier–Stokes solver and the effect of leading trough on wave *run-up*. *Coastal Engineering*, 183, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104293>
- Yamaguchi, T., & Uehara, K. (2026). Impacts of bathymetry on the *propagation* of tsunamis in the Sea of Japan. *Coastal Engineering Journal*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/21664250.2026.2622775>
- Yamazaki, Y., Kowalik, Z., & Cheung, K. F. (2009). Depth-integrated, non-hydrostatic model for wave breaking and *run-up* Yoshiki. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 65, 473–497. <https://doi.org/10.1002/flid>
- Yuan, Y., Li, H., Wei, Y., Shi, F., Wang, Z., Hou, J., *et al.* (2021). Probabilistic tsunami hazard assessment (PTHA) for southeast coast of Chinese mainland and Taiwan Island. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126, e2020JB020344. <https://doi.org/10.1029/2020JB020344>
- Yudhicara, Y. (2008). Tsunamigenik di Selat Sunda: Kajian terhadap katalog Tsunami Soloviev. *Indonesian Journal on Geoscience*, 3(4), 241–251. <https://doi.org/10.17014/ijog.vol3no4.20086>
- Zaitunah, A., Kusmana, C., Jaya, I. N. S., & Haridjaja, O. (2012). Kajian potensi daerah genangan akibat tsunami di Pantai Ciamis, Jawa Barat (study on the potential of *inundation* area by tsunami in Ciamis coastal of West Java). *Foresta: Indonesian Journal of Forestry*, 1(1), 1–6.
- Zakaria, A., Tugiono, S., & Ashruri, A. (2024). Simulation of tsunami wave *propagation* due to volcanic and tectonic earthquakes. *Proceedings of the 1st International Conference on Industry Science Technology and Sustainability (IConISTS 2023)* (Advances in Engineering Research, Vol. 235). Atlantis Press. [https://doi.org/10.2991/978-94-6463-475-4\\_26](https://doi.org/10.2991/978-94-6463-475-4_26)
- Zhao, E., Wu, Y., Jiang, F., Wang, Y., Zhang, Z., & Nie, C. (2024). Numerical investigation on the influence of the complete tsunami-like wave on the tandem pipeline. *Ocean Engineering*, 295, 116697. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.116697>