

Studi Karakteristik Penjalaran Gelombang Tsunami Berdasarkan Pemodelan Hidrodinamika 2D di Kota Ambon, Provinsi Maluku

Mhd. Rayhan Azra*, Agus Anugroho Dwi Suryoputro dan Muhammad Helmi

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia
Email: rayhanazra80@gmail.com

Abstrak

Provinsi Maluku memiliki aktivitas seismisitas yang tinggi berpusat di Laut Banda. Seismisitas di Laut Banda berpotensi menyebabkan gempa bumi dengan magnitudo (M_w) ≥ 6 . Kota Ambon sebagai ibu kota Provinsi Maluku yang berhadapan langsung dengan Laut Banda telah terjadi 13 kali gempa bumi sejak tahun 1830. Pada 8 November 2023 pukul 04:53:50 di Laut Banda dengan koordinat 6,453°S dan 129,517°E telah terjadi gempa bumi pada kedalaman 10 km dengan M_w sebesar 7.15. Tujuan dilakukan penelitian adalah untuk mengetahui karakteristik penjalaran gelombang tsunami yang difokuskan pada Kota Ambon, yaitu ketinggian maksimal gelombang tsunami, penjalaran gelombang tsunami dan estimasi waktu tiba gelombang tsunami. Simulasi pada penelitian dibangun dengan pemodelan hidrodinamika 2D menggunakan perangkat lunak MIKE 21. Simulasi dijalankan dengan dua skenario pemodelan dengan skenario 1 berdasarkan kejadian gempa bumi pada tanggal 8 November 2023 dengan M_w sebesar 7.15 dan skenario 2 dijalankan dengan M_w sebesar 8.5 sebagai kemungkinan terburuk jika terjadi gempa bumi di titik yang sama. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa ketinggian maksimal gelombang tsunami terjadi di Teluk Ambon. Ketinggian maksimal gelombang tsunami pada skenario 1 di atas 0,7 m dengan estimasi waktu tiba gelombang tsunami adalah 26 menit dan penjalaran gelombang tsunami dimulai dari Tanjung Nusaniwe, seluruh selatan pesisir kota Ambon, kemudian pesisir tengah Kota Ambon hingga Teluk Ambon. Sedangkan ketinggian maksimal gelombang tsunami pada skenario 2 di atas 2,5 m dengan estimasi waktu tiba gelombang tsunami adalah 7 menit dan penjalaran gelombang tsunami dimulai dari seluruh pesisir selatan kota Ambon, kemudian pesisir tengah Kota Ambon hingga Teluk Ambon.

Kata kunci: Ambon, MIKE 21, Pemodelan Hidrodinamika 2D, Tsunami

Abstract

Study of Tsunami Wave Propagation Characteristics Based on 2D Hydrodynamic Modeling in Ambon City, Maluku Province

Maluku Province has high seismic activity centered in the Banda Sea. Seismicity in the Banda Sea has the potential to cause earthquakes with a magnitude (M_w) ≥ 6 . Ambon City as the capital of Maluku Province which directly faces the Banda Sea has experienced 13 earthquakes since 1830. On November 8, 2023 at 04:53:50 in the Banda Sea with coordinates 6.453° S and 129.517° E an earthquake occurred at a depth of 10 km with a M_w of 7.15. The purpose of the study was to determine the characteristics of tsunami wave propagation focused on Ambon City, namely the maximum height of the tsunami wave, tsunami wave propagation and estimated arrival time of the tsunami wave. The simulation in the study was built with 2D hydrodynamic modeling using MIKE 21 software. The simulation was run with two modeling scenarios with scenario 1 based on an earthquake event on November 8, 2023 with M_w of 7.15 and scenario 2 was run with M_w of 8.5 as the worst possibility if an earthquake occurs at the same point. The modeling results show that the maximum height of the tsunami waves occurred in Ambon Bay. The maximum height of the tsunami waves in scenario 1 is above 0.7 m with an estimated tsunami wave arrival time of 26 minutes and the propagation of the tsunami waves starts from Tanjung Nusaniwe, the entire southern coast of Ambon City, then the central coast of Ambon City to Ambon Bay. While the maximum height of the tsunami waves in scenario 2 is above 2.5 m with an estimated tsunami wave arrival time of 7 minutes and the propagation of the tsunami waves starts from the entire southern coast of Ambon City, then the central coast of Ambon City to Ambon Bay.

Keywords: Ambon, MIKE 21, 2D Hydrodynamic Modeling, Tsunami

PENDAHULUAN

Teori Pangea, bumi pada awalnya hanya tersusun atas satu kerak yang kemudian terpecah menjadi beberapa bagian lempeng (Beutel *et al.*, 2005). Hal ini diakibatkan pada lapisan atmosfer bumi, magma cair di

inti bumi terus memanaskan lapisan ini yang menyebabkan pergerakan terus menerus dari material penyusun lapisan bumi. Sehingga tercipta lempengan dalam bentuk lempeng bumi dan lempeng samudra. Lempeng samudra lebih tipis dan berat, sedangkan lempeng benua lebih tebal dan ringan. Akibat perbedaan ini, terjadi pergerakan lempeng tektonik yang menciptakan zona subduksi (Hidayati *et al.*, 2022). Zona subduksi ini berada di kawasan samudra. Pergerakan di zona subduksi dapat bergerak tidak lancar yang menyebabkan aktivitasnya terkunci sehingga terjadi pengumpulan energi yang pada suatu saat batuan pada lempeng tektonik tidak lagi kuat menahan gerakan tersebut sehingga terjadi pelepasan mendadak yang nantinya akan menyebabkan tsunami (Alviani, 2021). Dampak yang ditimbulkan oleh tsunami dapat disebut sebagai bencana alam yang berbentuk perpindahan badan air yang disebabkan oleh perubahan permukaan laut secara vertikal dengan tiba-tiba yang dapat menyebabkan gangguan pada elevasi muka air dan menciptakan gelombang besar yang dapat merusak diakibatkan oleh gangguan di area laut, salah satunya adalah karena aktivitas zona subduksi (Osborn & Boyce, 2008).

Di laut dalam, gelombang tsunami tidak berubah secara drastis dan cenderung kecil. Bahkan, kapal yang berada di sekitar titik terjadinya pergerakan lempeng tidak akan merasakan perubahan gelombang laut. Namun saat gelombang bergerak ke daratan, gelombang tersebut akan semakin tinggi seiring dengan berkurangnya kedalaman laut. Kecepatan gelombang tsunami bergantung pada kedalaman laut, bukan jarak dari sumber gelombang. Tsunami sering disebut sebagai gelombang pasang, namun berdasarkan penelitian para ahli kelautan, gelombang tsunami tidak ada hubungannya dengan pasang surut (Zhang *et al.*, 2024). Hal ini dikarenakan pasang surut air laut dipengaruhi oleh gaya tarik-menarik dari gravitasi bumi dengan benda langit seperti bulan dan matahari. Sedangkan gelombang tsunami bersifat transien dan tidak kontinu, dimana besaran gelombang tsunami akan semakin berkurang seiring bertambahnya waktu dan hanya bersifat sesaat di laut lepas yang kemudian besaran gelombangnya meningkat drastis saat mencapai perairan dangkal hingga menyebabkan kerusakan di daratan. Gelombang tsunami juga tidak dipengaruhi oleh angin yang hanya mempengaruhi partikel air bagian atas, sedangkan tsunami yang disebabkan oleh aktivitas tektonik dapat menggerakkan partikel di seluruh kolom air, baik di permukaan maupun dasar laut (Ghazi *et al.*, 2022).

Indonesia dilalui oleh lempeng tektonik Eurasia, Pasifik, dan Indo-Australia, serta Lempeng Laut Filipina yang berada diantaranya. Lempeng lempeng yang berada di kawasan ini merupakan zona subduksi dengan pergerakan yang aktif dengan sifat konvergen membentang dari selatan hingga timur Indonesia yang membentuk formasi lateral (Hall, 2012; Anderson, *et al.*, 2021). Sehingga hal ini menyebabkan aktifnya pergerakan lempeng di Indonesia yang menyebabkan tingginya frekuensi terjadi tsunami yang bersifat destruktif di beberapa wilayah Indonesia. Salah satu wilayah Indonesia yang memiliki zona subduksi aktif adalah Provinsi Maluku yang berada di kawasan Zona Subduksi Laut Banda.

Zona subduksi Laut Banda tercipta akibat kontinen Australia dan busur kepulauan Banda bertabrakan. Pergerakan terjadi di bagian selatan Timor *through* hingga Tanimbar *through*. Aktivitas pergerakan ini berpotensi menyebabkan gempa bumi dengan $M_w \geq 6$ dengan didominasi oleh pergerakan sesar *reverse* dan *strike-slip*. Pergerakan lempeng di kawasan Laut Banda diakibatkan penujaman yang relatif curam di bagian barat Busur Banda dan melandai ke arah timur mengikuti pelengkungan busur yang membentuk seperti sendok yang terbuka ke arah barat (Widada, 2016).

Aktifnya pergerakan lempeng di kawasan ini dibuktikan dengan seringnya terjadi gempa bumi di Provinsi Maluku, khususnya Kota Ambon. Berdasarkan catatan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) yang merilis Peta Indeks Risiko Bencana Indonesia, sejak tahun 1830 di Provinsi Maluku telah terjadi 33 kali gempa bumi, dengan 13 kali terjadi di Kota Ambon (Badan Nasional Penanggulangan Bencana, 2022). Pada *Catalogue of Tsunamis on The Western Shore of the Pacific Ocean* juga dituliskan bahwa dari tahun 1600 – 2015 sudah terjadi 85 kali bencana tsunami di Provinsi Maluku dan merupakan 40% dari total 210 kali bencana tsunami yang terjadi di Indonesia (Latue & Rakuasa, 2022).

Pembangunan Nasional Indonesia terfokus pada pembangunan ekonomi yang dibangun mulai dari tingkat kota hingga provinsi dengan memprioritaskan upaya pembangunan dan peningkatan kesejahteraan secara menyeluruh ke semua lapisan masyarakat. Salah satu daerah yang memiliki kontribusi besar adalah Provinsi Maluku (Samuel *et al.*, 2022). Menurut BPS Provinsi Maluku, tahun 2022 provinsi ini memiliki jumlah penduduk 1.900.914 jiwa. Kota Ambon sebagai ibu kota provinsi berkontribusi besar dalam perekonomian provinsi ini. Provinsi Maluku berhadapan langsung dengan Laut Banda yang memiliki aktivitas seismisitas tinggi. Kota Ambon dengan 347.644 jiwa penduduk yang mendukung aktivitas perekonomian. Potensi perekonomian Provinsi Maluku sangat tinggi, akan tetapi provinsi ini memiliki potensi bencana alam

Tsunami yang tinggi juga.

Pada 8 November 2023 pukul 04:53:50, di Laut Banda dengan koordinat $6,453^{\circ}\text{S}$ dan $129,517^{\circ}\text{E}$ telah terjadi gempa bumi pada kedalaman 10 km dengan magnitudo 7,15. Gempa bumi ini menghasilkan gelombang tsunami yang cukup tinggi di pesisir Kota Ambon. Kawasan ini memiliki potensi menyebabkan terjadinya gempa bumi dengan magnitudo yang lebih tinggi yang dapat memberikan dampak kerusakan. Sehingga penting untuk mengupayakan mitigasi bencana Kota Ambon. Untuk mendukung upaya mitigasi di daerah ini dibutuhkan kajian khusus mengenai karakteristik gelombang tsunami. Hasil penelitian ini mencakup penjalaran dan ketinggian maksimal gelombang tsunami hingga estimasi waktu tiba. Berdasarkan gempa bumi 8 November 2023, dijalankan simulasi dengan pemodelan hidrodinamika 2D menggunakan perangkat lunak MIKE 21. Diharapkan penelitian ini dapat menjadi salah satu penunjang untuk upaya mitigasi Kota Ambon.

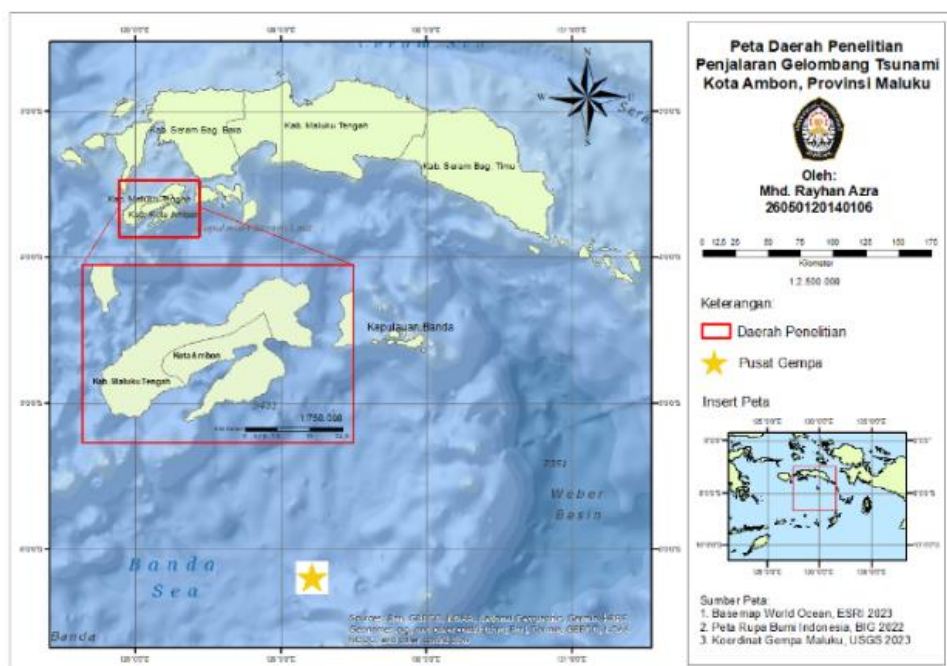
MATERI DAN METODE

Materi Penelitian

Penelitian dilakukan dengan perangkat lunak MIKE 21 dan pemodelan dilakukan berdasarkan kejadian gempa bumi 8 November 2023, pukul 04:50:53 di Laut Banda pada koordinat $6,453^{\circ}\text{S}$ dan $129,517^{\circ}\text{E}$ di kedalaman 10 km dengan magnitudo 7,15 (Gambar 1). Di kawasan ini telah terjadi 15 kali gempa bumi dengan magnitudo di atas 7,0 selama 100 tahun terakhir (USGS, 2023). Hal ini memungkinkan terjadinya kembali gempa bumi di lokasi yang sama dengan magnitudo yang lebih besar. Sehingga pada penelitian ini akan dijalankan skenario pemodelan dengan magnitudo 8,5 sebagai kemungkinan terburuk jika terjadi lagi gempa bumi di lokasi yang sama.

Metode Penelitian

Analisis pemodelan tsunami dilakukan dengan metode penelitian kuantitatif. Pemodelan tsunami menggunakan MIKE 21 menggunakan modul *flow model*. Penelitian ini menggunakan 2 skenario, skenario 1 menggunakan gempa bumi dengan magnitudo 7,15 dan skenario 2 dijalankan dengan magnitudo 8,5. Penelitian ini akan difokuskan pada Kota Ambon yang merupakan ibu kota Provinsi Maluku. Simulasi membutuhkan domain (mesh) yang terdiri dari data batimetri dan data parameter gempa bumi di titik terjadinya aktivitas tektonik sebagai *source* pembangkit tsunami. Pada penelitian ini gempa bumi berasal dari aktivitas pergerakan lempeng secara *stikre-slip* pada koordinat $6,453^{\circ}\text{S}$ dan $129,517^{\circ}\text{E}$ yang berjarak sekitar 333 km dari Kota Ambon.



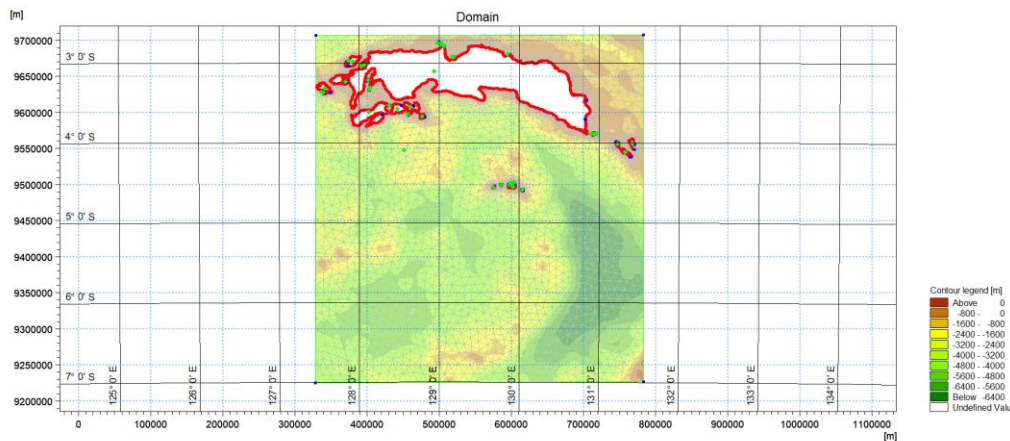
Gambar 1. Lokasi Penelitian

Tabel 1. *Source* Pembangkit Tsunami Mw 7.15

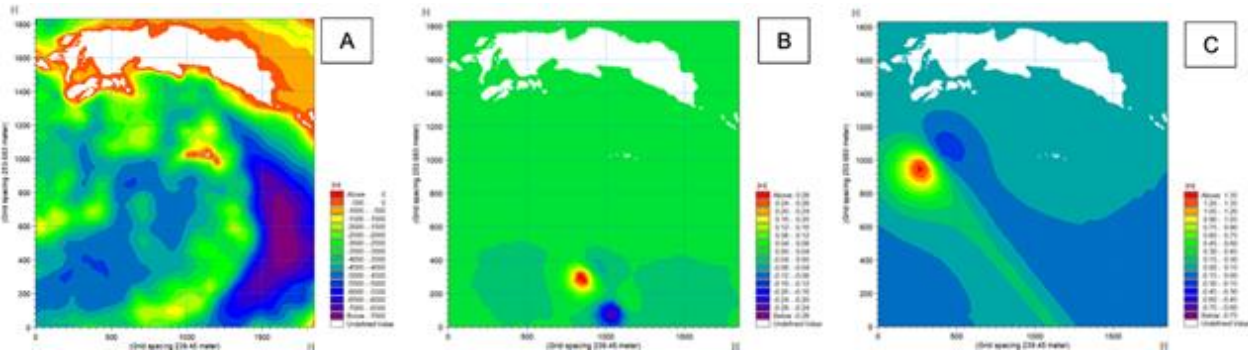
Mw	<i>Epicenter</i> (deg.)		<i>Depth</i> (km)	<i>Focal Mechanism</i>			<i>Dimension</i>		<i>Disloc.</i> (m)	<i>Rigidity</i> (Gpa)
	Lon.	Lat.		Strike	Dip	Slip	L(km)	W(km)		
7.15	129.5170	-6.4530	10	140	71	178	67.92	14.35	7.5	9

Tabel 2. *Source* Pembangkit Tsunami Mw 8.5

Mw	<i>Epicenter</i> (deg.)		<i>Depth</i> (km)	<i>Focal Mechanism</i>			<i>Dimension</i>		<i>Disloc.</i> (m)	<i>Rigidity</i> (Gpa)
	Lon.	Lat.		Strike	Dip	Slip	L(km)	W(km)		
8.5	129.5170	-6.4530	10	140	71	178	501.19	34.28	22.5	9



Gambar 2. Domain Daerah Penelitian



Gambar 3. Input Data Batimetri (A) dan *Initial Condition* Tsunami Mw 7,15 (B) dan Mw 8,5 (C)

Metode Pembuatan Domain

Domain adalah batasan daerah penelitian untuk menjalankan pemodelan. Domain dibangun menggunakan sistem koordinat *Universal Transverse Mercator* (UTM). Batasan yang digunakan pada UTM Easting adalah 322234,59 hingga 805967,12 dan untuk UTM Northing adalah 9722879,57 hingga 9162293,43 dengan zona UTM adalah 52 S. Garis pantai diperoleh dari *google earth* dan data batimetri yang diperoleh dari BATNAS dengan resolusi 180 m x 180 m, kemudian dibangun menggunakan *triangular mesh* dengan jumlah *mesh* sebanyak 32335 kemudian di ineterpolasi (Gambar 2).

Metode Penentuan *Source* Pembangkit Tsunami

Terdapat sembilan parameter gempa bumi untuk menyusun *source* tsunami, yaitu titik episentrum, kedalaman episentrum, derajat kemiringan dari strike, dip, dan slip, dimensi sesar (panjang dan lebar), dislokasi, dan *rigidity* (Thingbaijam *et al.*, 2017; Satriadi *et al.*, 2018). Parameter ini diperoleh dari melalui USGS yang menampilkan data koordinat lokasi gempa bumi, *focal mechanism* (*strike*, *dip*, dan *slip*), dan

kedalaman gempa bumi. Koordinat terjadinya gempa bumi adalah 6,453°S dan 129,517°E dengan kedalaman 10 km. Kemudian untuk nilai dislokasi, *rigidity*, dan ukuran dimensi sesar didapatkan menggunakan ekspresi empiris yang diperoleh dari data seismik (Mw) melalui pendekatan Wells & Coppersmith (1994). Tabel 1 dan 2 menunjukkan *source* pembangkit tsunami.

Metode Pengaturan MIKE 21 FM

Simulasi dilakukan dengan menggunakan MIKE 21 *Flow Model* menggunakan modul *Hydrodynamic Only*. Pada *simulation period* menggunakan 120 *time step* yang dijalankan selama satu jam dengan interval 30 detik pada tanggal 8 November 2023. Kemudian untuk pengaturan input data batimetri dan *initial condition tsunami* yang digunakan ditampilkan dalam bentuk grid dengan ukuran grid 2000 x 2000 dengan jarak antar grid adalah 239,45 x 253,683 m. Yang kemudian *grid* ini di-*crop* sesuai dengan domain yang telah ditentukan sebelumnya. Pada pemodelan ini domain di-*crop* pada titik di sumbu x adalah 5, 1850 dan pada sumbu y adalah 50, 1880. Gambar 3 menunjukkan input data yang digunakan untuk menjalankan simulasi tsunami di Kota Ambon.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Menurut Yu (2014), *Sea Surface Height (SSH)* Tsunami adalah ketinggian permukaan laut saat terjadinya tsunami. Hasil SSH Tsunami nantinya dapat digunakan untuk memperkirakan besaran maksimum gelombang tsunami. Dalam pemodelan tsunami, pengolahan hasil SSH tsunami akan menghasilkan data propogasi tsunami yaitu perambatan dan hamburan yang secara sederhana disebut sebagai penjalaran gelombang tsunami hingga mencapai ke garis pantai. Menurut Abdillah & Muhsoni (2020), berdasarkan tinggi gelombangnya terdapat empat macam klasifikasi tsunami, yaitu sangat bahaya dengan ketinggian diatas 3 meter, bahaya dengan ketinggian diantara 1,5 meter dan 3 meter, cukup bahaya dengan ketinggian diantara 0,5 meter dan 1,5 meter, serta ketinggian di bawah 0,5 meter dikategorikan tidak bahaya.

Skenario 1

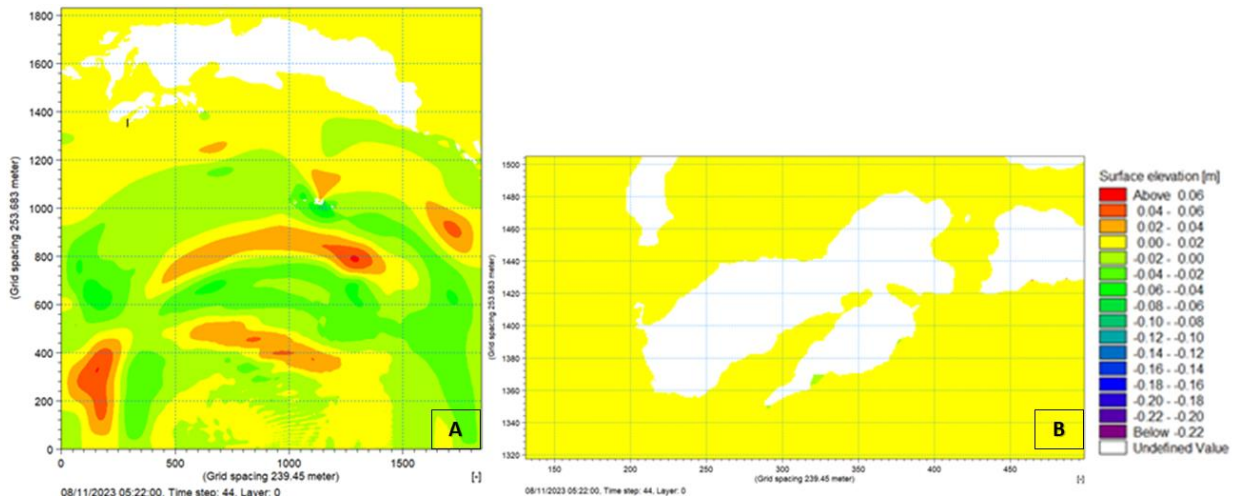
Kondisi awal elevasi permukaan Laut Banda yang terlihat bahwa permukaan laut masih dalam kondisi tenang dengan elevasi ketinggian permukaan laut sekitar 0 – 0.04 m (Gambar 4). Sedangkan di sekitar titik gempa bumi, elevasi permukaan laut naik hingga 0,28 m. Menurut Diposaptono & Budiman (2005), lempeng kerak bumi yang terdorong ke atas dan ke bawah memberi energi potensial pada massa air sehingga terjadi perubahan drastis pada permukaan air laut di titik tersebut. Energi yang dilepas ke dalam massa air itu menyebabkan timbulnya tsunami yang menyebabkan terjadinya perubahan elevasi permukaan laut. Proses terjadinya tsunami saat mencapai daratan ditandai dengan turunnya permukaan laut sebagai akibat aliran arus laut yang memusat ke dalam lempeng. Kemudian dalam waktu singkat setelah lempeng terisi penuh maka terjadi arus balik besar bersumber dari tengah samudra dalam bentuk gelombang laut.

Perubahan drastis elevasi permukaan laut setelah 22 menit terjadinya gempa bumi dengan penurunan muka air laut di perairan Kota Ambon hingga 0,02 meter. Penurunan muka air laut terlihat di Tanjung Nusinawe, Pantai Seri, dan Pantai Rutong. Kemudian terjadi kenaikan elevasi muka air laut selang 4 menit kemudian yang ditunjukkan pada Gambar 5. Hal ini menunjukkan gelombang tsunami pertama yang mencapai pesisir membutuhkan waktu 26 menit dengan ketinggian mencapai 0.075 m di Tanjung Nusaniwe, Pantai Seri, dan Pantai Rutong. Dan pada menit ke-28, gelombang tsunami mulai menjalar ke semua pesisir selatan Kota Ambon hingga ke Teluk Ambon yang terlihat pada Gambar 5 dengan ketinggian 0.08 m. Tsunami mulai menjalar dari Tanjung Nusaniwe hingga keseluruhan pesisir selatan Kota Ambon. Kemudian terus menjalar hingga ke bagian tengah Kota Ambon menuju Teluk Ambon. Ketinggian maksimal gelombang tsunami pada gempa bumi dengan magnitudo 7.15 ini terjadi di Jembatan Merah Putih yang menghubungkan semenanjung terpisah di tengah Kota Ambon pada kawasan Teluk Ambon dengan ketinggian di atas 0.7 m pada menit ke-54. Penjalaran gelombang tsunami di Kota Ambon lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 6. Grafik pada Gambar 9 menunjukkan besaran gelombang tsunami pertama di Kota Ambon dan besaran maksimal gelombang tsunami di Teluk Ambon.

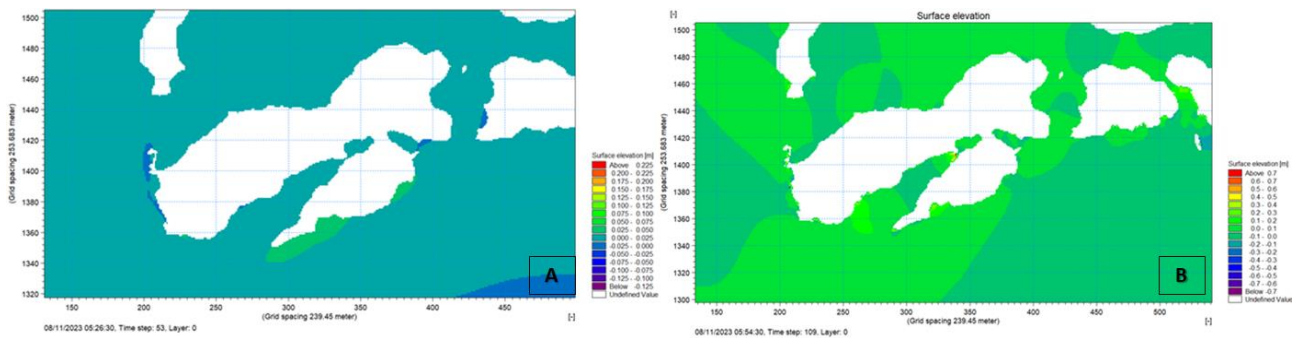
Skenario 2

Skenario 2 yang dijalankan dengan magnitudo 8,5 memiliki elevasi ketinggian permukaan laut yang berbeda dengan skenario akibat perbedaan panjang dan lebar dimensi sesar (Wells & Coppersmith, 1994).

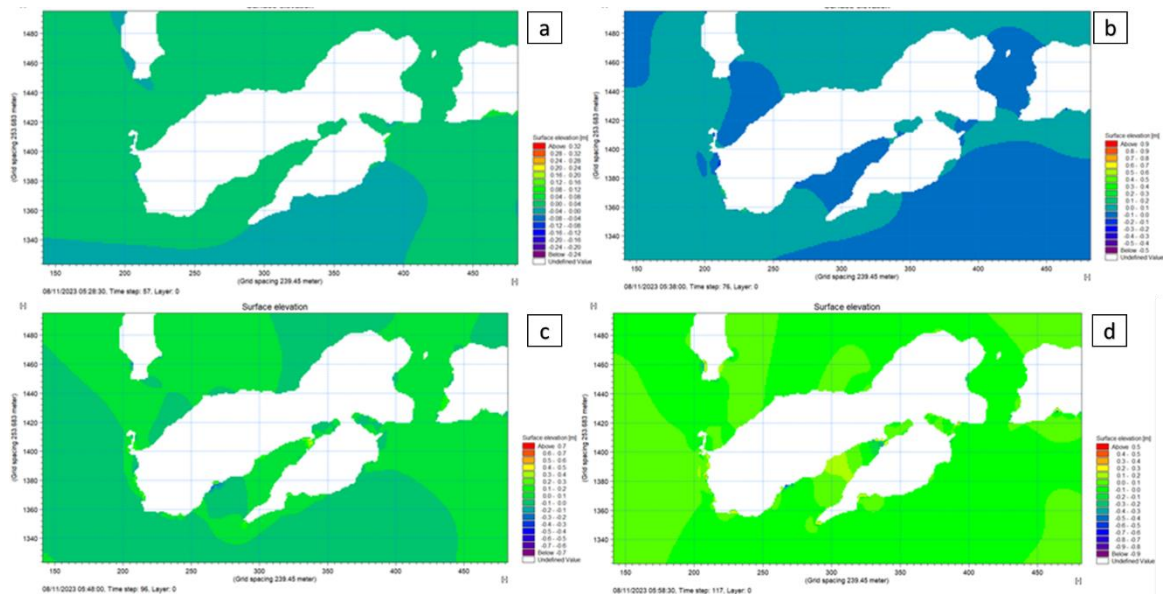
Gelombang tsunami yang disebabkan gempa bumi dengan magnitudo 8.5 memiliki penjaralan tsunami yang lebih cepat daripada magnitudo 7,15. Di sekitar area pergeseran lempeng, ketinggian elevasi permukaan laut



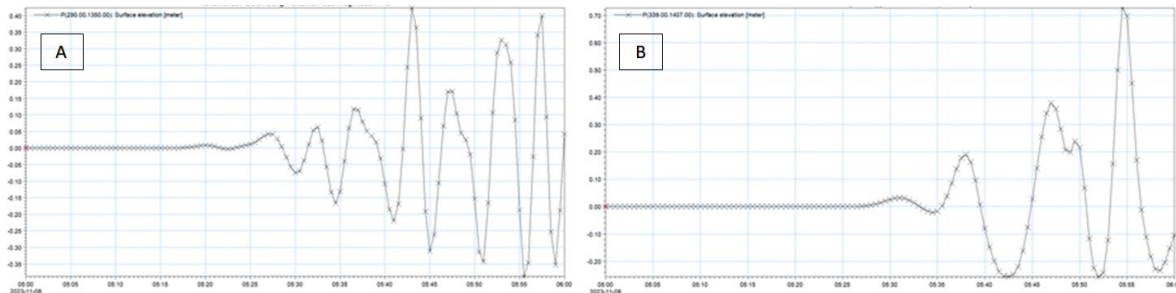
Gambar 4. Kondisi Penurunan Muka Air Laut Pertama *Full Area* (A) dan di Kota Ambon (B) pada Gempa Bumi Mw 7,15



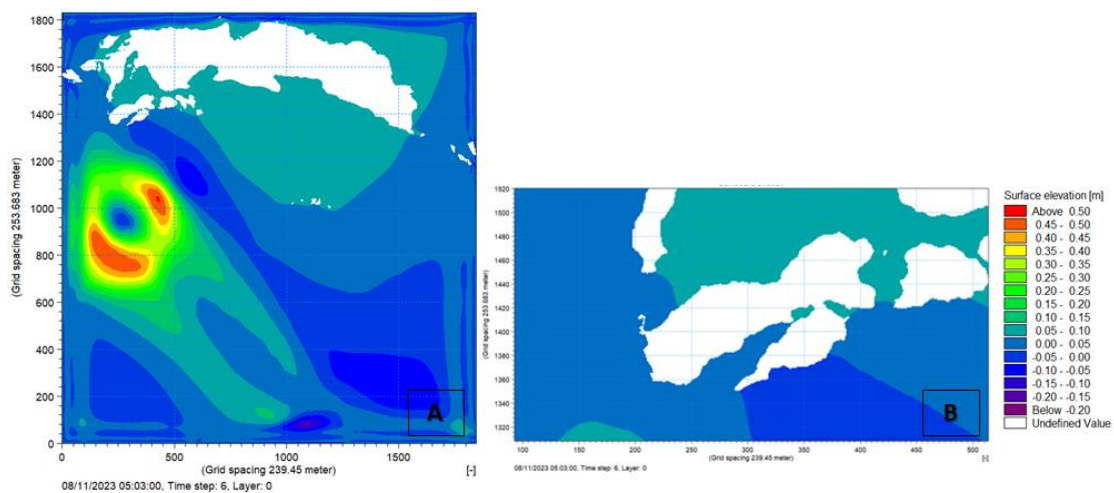
Gamba 5. Gelombang Pertama (step 53) dan Tinggi maksimal (step 109) Tsunami Setelah Penurunan Muka Air Laut M 7,15 di Kota Ambon



Gambar 6. Penjaralan Tsunami Menuju Seluruh Pesisir Kota Ambon Mw 7,15 (pada menit ke-28 (a), 38 (b), 48 (c), dan 58 (d))



Gambar 7. Grafik Penjalaran Besaran Gelombang Tsunami pada Magnitude 7,15 (A) awal penjalaran dan (B) gelombang tertinggi



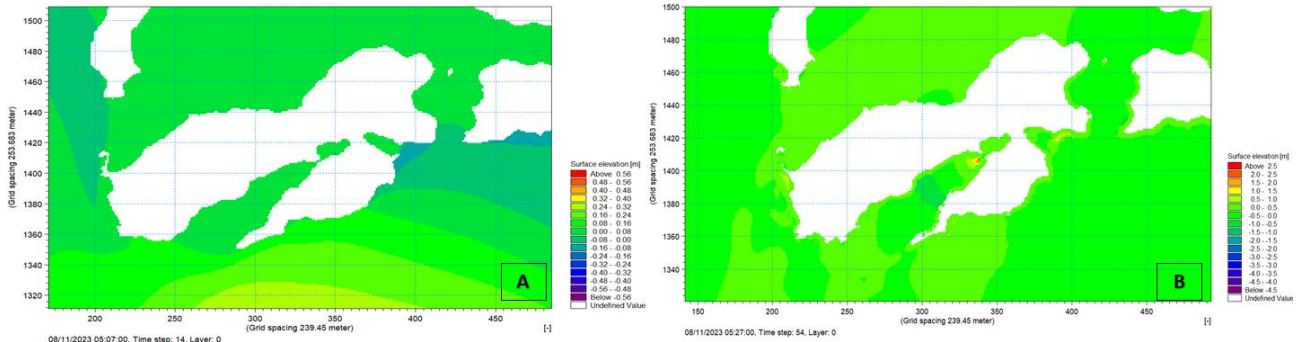
Gambar 8. Kondisi Penurunan Muka Air Laut Pertama di Kota Ambon pada Gempa Bumi M 8,5

naik hingga 1,35 m yang lebih tinggi 1,07 m dari gempa bumi yang dibangkitkan oleh magnitudo 7,1. Sedangkan perairan di sekitar Kota Ambon masih terlihat stabil dengan ketinggian elevasi permukaan laut di sekitar 0 – 0,15 m. Pada Gambar 8, terlihat bahwa 3 menit setelah terjadinya gempa bumi terjadi penurunan muka air laut di perairan Kota Ambon hingga 0,10 m di sepanjang pesisir selatan Kota Ambon. Kemudian gelombang tsunami pertama datang selang 4 menit setelahnya dengan besaran gelombang tsunami adalah 0,16 m di sepanjang pesisir selatan Kota Ambon yang ditunjukkan Gambar 9. Gelombang tsunami terus menjaral dari Tanjung Nusaniwe di bagian barat daya Kota Ambon hingga ujung timur Kota Ambon dengan kenaikan besaran gelombang yang signifikan seperti yang terlihat pada Gambar 10. Kemudian menjaral hingga ke Teluk Ambon pada menit ke-18. Ketinggian maksimum gelombang tsunami terjadi di Teluk Ambon. Ketinggian maksimum gelombang tsunami di Kota Ambon terjadi di Jembatan Merah Putih dengan besaran gelombang tsunami di atas 2,5 m pada menit ke-27 seperti yang terlihat pada Gambar 10. Ketinggian maksimum gelombang tsunami pada skenario 1 dan 2 terjadi di titik yang sama, yaitu di Jembatan Merah Putih pada kawasan Teluk Ambon. Hal ini disebabkan karena penyempitan penjalaran gelombang pada kawasan teluk. Hal ini sesuai dengan persamaan kontinuitas mengenai kekekalan massa air pada modul DHI, yang menyatakan bahwa untuk air yang tidak dapat dimampatkan yaitu air laut, besaran gelombang akan meningkat saat melalui media yang sempit. Grafik pada Gambar 11 menunjukkan besaran gelombang tsunami pertama di Kota Ambon dan besaran maksimal gelombang tsunami yang terjadi di Teluk Ambon.

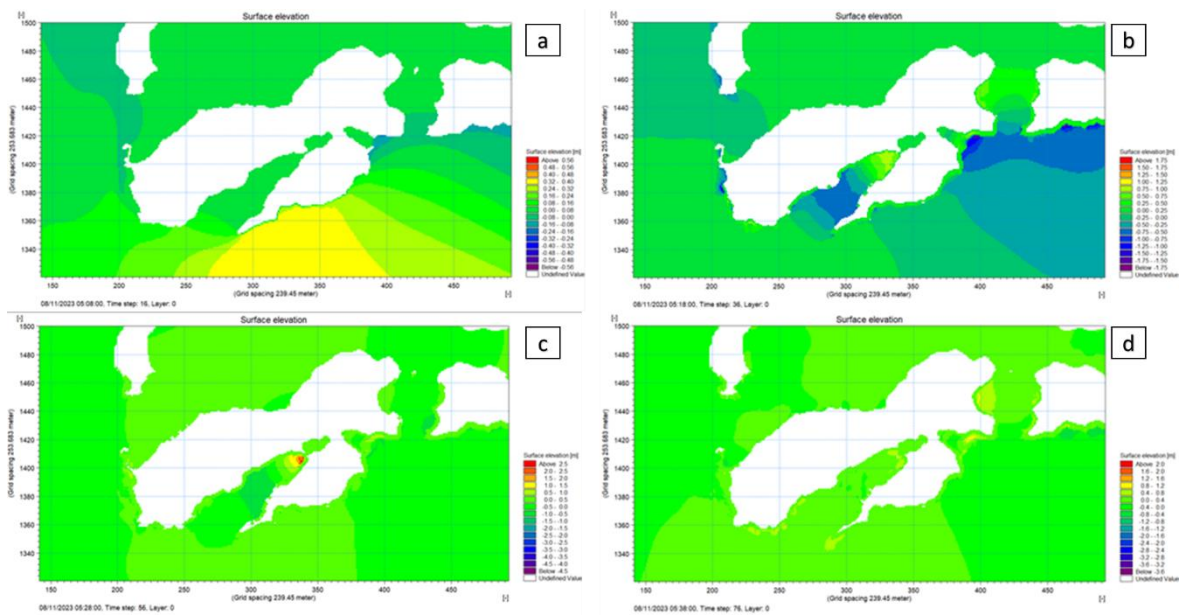
Estimasi Waktu Tiba Tsunami

Estimasi waktu tiba tsunami dipengaruhi oleh kekuatan magnitudo gempa bumi yang terjadi dan bathimetri di perairan tersebut. Pada gempa bumi dengan magnitudo 7,15 tsunami membutuhkan waktu 26 menit hingga mencapai pesisir. Sedangkan pada gempa bumi 8,5 membutuhkan waktu 7 menit hingga mencapai pesisir. Gelombang tsunami pada skenario 2 datang 19 menit lebih cepat dibandingkan skenario 1. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan magnitudo gempa bumi mempengaruhi estimasi waktu tiba tsunami.

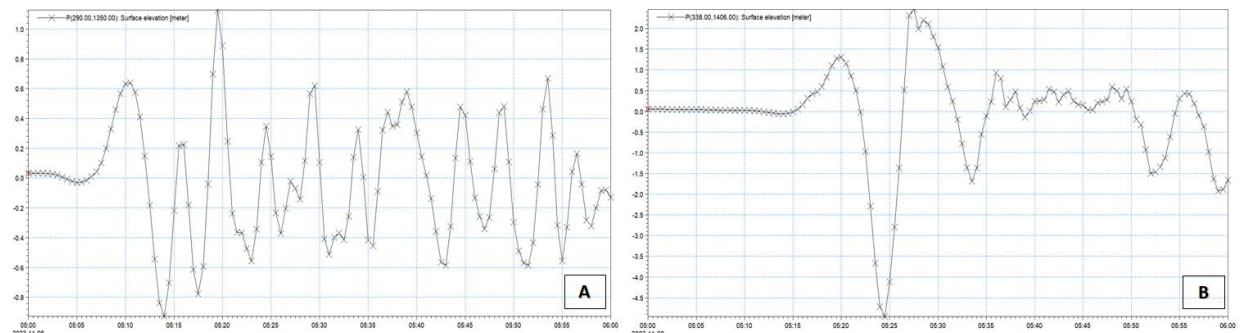
Berdasarkan data dari USGS (2023), di lokasi terjadinya gempa bumi pada skenario 1, lempeng Australia bergerak ke arah utara-timur laut terhadap Sunda dengan kecepatan sekitar 73 mm/tahun yang memungkinkan terjadinya kembali gempa bumi pada titik yang sama. Di sekitar kawasan ini telah terjadi 15 kali gempa bumi dengan magnitudo yang lebih dari 7. Oleh karena itu, penelitian yang dijalankan pada skenario 2 dapat dijadikan sebagai acuan untuk mengupayakan mitigasi bencana di Kota Ambon sebagai kemungkinan terburuk jika terjadi gempa bumi pada titik yang sama dengan magnitudo yang lebih besar.



Gamba 9. Gelombang Pertama (step 14) dan Tinggi maksimal (step 54) Tsunami Setelah Penurunan Muka Air Laut Mw 8,5 di Kota Ambon



Gambar 10. Penjalaran Tsunami Menuju Seluruh Pesisir Kota Ambon M 8.5 (pada menit ke-8 (a), 18 (b), 28 (c), dan 38 (d))



Gambar 11. Grafik Penjalaran Besaran Gelombang Tsunami pada Magnitudo 8,5 (A) awal penjalaran dan (B) gelombang tertinggi

KESIMPULAN

Gempa bumi yang terjadi di scenario 1 membutuhkan waktu 26 menit hingga mencapai daerah pesisir Kota Ambon. Daerah pertama yang terdampak gelombang tsunami adalah Tanjung Nusaniwe dengan besaran gelombang tsunami adalah 0.075 m. Gelombang pertama tsunami di scenario 2 datang lebih cepat 19 menit daripada skenario yaitu pada menit ke-7. Kawasan pertama yang terdampak gelombang tsunami mencapai hingga seluruh pesisir selatan Kota Ambon yang mana ini lebih luas daripada tsunami yang dibangkitkan magnitude 7.15 yang hanya mencapai Tanjung Nusaniwe saja. Ketinggian gelombang pertama tsunami melebihi 0.16 m. Hal ini menunjukkan bahwa kekuatan magnitude gempa bumi berpengaruh kepada besaran gelombang tsunami yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah, I. F. & Muhsoni, F. F. 2020. Pemetaan Risiko Tsunami Berdasarkan Skenario Ketinggian Tsunami Di Kecamatan Pasirian Kabupaten Lumajang Provinsi Jawa Timur. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 1(4): 486-497. <https://doi.org/10.21107/juvenil.v1i4.8946>.
- Alviani, P. 2021. *Buku Pintar Penanggulangan Tsunami*. Diva Press. Yogyakarta.
- Anderson, J. G., Biasi, G. P., Angster, S. & Wesnousky, S. G. 2021. Improved Scaling Relationships for Seismic Moment and Average Slip of Strike - Slip Earthquakes Incorporating Fault - Slip Rate, Fault Width, and Stress Drop. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 111(5): 2379–2392. <https://doi.org/10.1785/0120210113>.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPD). 2022. Indeks Risiko Bencana Indonesia (RBI) Tahun 2022. Jakarta: Pusat Data, Informasi dan Komunikasi Kebencanaan Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Beutel, E. K., Nomade, S., Fronabarger, A. K. & Renne, P. R. 2005. Pangea's complex breakup: A new rapidly changing stress field model. *Earth and Planetary Science Letters*, 236(1-2): 471-485. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.021>.
- Diposaptono, S. & Budiman. 2005. *Tsunami*. Buku Ilmiah Populer. Bogor.
- Ghazi, Z. M., Abbood, I. S. & Hejazi, F. 2022. Dynamic evaluation of jack-up platform structure under wave, wind, earthquake and tsunami loads. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 7(1): 41-57. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2021.04.005>.
- Hall, R. 2012. Late Jurassic–Cenozoic reconstructions of the Indonesian region and the Indian Ocean. *Tectonophysics*, 570-571: 1-41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.04.021>.
- Hidayati, M. P., Purnama, A. Y. & Setyawan, D. N. 2022. *E-Modul Fisika Berbasis Mitigasi Bencana Gempa Bumi*. Deepublish. Yogyakarta.
- Latue, P. C. & Rakuasa, H. 2022. Dinamika Spasial Wilayah Rawan Tsunami di Kecamatan Nusaniwe, Kota Ambon, Provinsi Maluku. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*, 3(2): 77-87. <https://doi.org/10.23960/jgrs.2022.v3i2.98>.
- Osborne, M. P. & Boyce, N. P. 2008. *Tsunami dan Bencana Alam Lainnya*. Nuansa Cendekia. Bandung.
- Samuel, E. J. J., Engka, D. S. & Rorong, I. P. F. 2022. Analisis Potensi Perekonomian Kepulauan Maluku. *Jurnal Berkala Ilmiah Efisiensi*, 22(8): 61-72.
- Satriadi, A., Helmi, M. & Redyansah. 2018. Numerical Modeling of Tsunami in Jember Regency. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology & Environmental Sciences*, 20(3): 87-91.
- Thingbaijam, K. K. S., Mai, P. M. & Goda, K. 2017. New Empirical Earthquake Source - Scaling Laws. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107(5): 2225 - 2246. <https://doi.org/10.1785/0120170017>.
- United States Geological Survey. 2023. Earthquake Hazards Program. www.usgs.gov. Diakses pada 12 November 2023 dari <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us700019h4/moment-tensor>.
- Wells, D. L. & Coppersmith, K. J. 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4): 974-1002. <https://doi.org/10.1785/BSSA0840040974>.
- Widada, S. 2016. Analisis Dimensi Fraktal Kejadian Gempa Di Laut Banda Indonesia. *Jurnal Kelautan Tropis*, 19(2): 108-114. <https://doi.org/10.14710/jkt.v19i2.837>.

- Yu, K. 2014. Tsunami-wave parameter estimation using GNSS-based sea surface height measurement. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(5): 2603-2611. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2362113>.
- Zhang, B., Ye, J., Zhou, H., Jeng, D. & Guo, Y. 2024. Enhancing tsunami modelling by using N-waves and the measured topography of coral reef: A study in the South China Sea. *Coastal Engineering*, 193: 104601. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2024.104601>.