

PENENTUAN CEPAT RAMBAT DAN *DECAY TIME* METEO-TSUNAMI AKIBAT ERUPSI VULKANIK HUNGA TONGA-HUNGA HA'APAI, TONGA 2022

^{1*)}Ni Made Aprillia Sekar Manggar Tika, ^{2*)}Tjipto Prastowo, ^{3*)}Muhammad Nurul Fahmi

^{1*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: ni.20049@mhs.unesa.ac.id

^{2*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: tjiptoprastowo@unesa.ac.id

^{3*)} Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: muhammadfahmi@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menganalisis kinematika perambatan gelombang tsunami lintas Samudera Pasifik akibat erupsi vulkanik Hunga Tonga–Hunga Ha’apai (HTHH), Tonga pada tanggal 15 Januari 2022 dalam perspektif kejadian serupa yang mungkin terjadi pada masa mendatang di Indonesia. Tujuan penelitian ini adalah menentukan kecepatan rambat *meteo-tsunami* dan *decay time* pada kasus tsunami HTHH, Tonga 2022. Berdasarkan *tsunami waveforms* yang direkam oleh stasiun pemantau dari berbagai lokasi mulai yang dekat (*near-field* ≤ 1300 km) sampai jauh (*far-field* > 1300 km), data *arrival times* dan/atau *observed travel times* untuk semua muka gelombang terekam dengan baik oleh stasiun pemantau. Komparasi dengan *estimated travel times* yang dihitung dengan pendekatan *shallow water* memberikan estimasi kecepatan *meteo-tsunami* dalam penelitian ini adalah (1110 ± 10) km/jam, setara dengan (308 ± 3) m/s, jauh lebih besar dari tipikal kecepatan tsunami konvensional sebesar 800 km/jam, setara dengan 220 m/s selama merambat dalam zona *near-field*. *Decay time* untuk kasus HTHH, Tonga 2022 ditentukan melalui grafik pelemahan amplitudo maksimum terhadap jarak dan waktu tempuh, di mana amplitudo maksimum meluruh cepat dalam zona *near-field* dan menurun secara gradual dalam zona *far-field*. Berdasarkan waktu tempuh untuk stasiun pemantau terjauh dari episenter, *decay time* kasus HTHH, Tonga 2022 ditemukan sebesar 570 menit yang setara dengan 9,5 jam. Kedua temuan dalam penelitian ini (kecepatan *meteo-tsunami* dan *decay time*) tidak berbeda signifikan dengan estimasi kecepatan *meteo-tsunami* berbasis simulasi model perambatan *meteo-tsunami* dan *travel time* dari temuan terdahulu yang relevan.

Kata Kunci: HTHH Tonga, *meteo-tsunami*, *travel time*, *decay time*, *near-field*, *far-field*

Abstract

This study analyzes the kinematics of trans-Pacific tsunami propagation due to volcanic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH), Tonga on January 15, 2022, within perspectives of a similar event that may happen in the future in Indonesia. The aims of this research are to calculate the speed of *meteo-tsunami* and decay time for the 2022 HTHH, Tonga case. Based on tsunami waveforms recorded by monitoring stations at varying distances from near-fields (≤ 1300 km) to far-fields (>1300 km), the data for arrival times and/or observed travel times of leading wavefronts were well documented. In accordance with estimated travel times, calculated from shallow water approximation, the *meteo-tsunami* speed was found to be (1110 ± 10) km/h equivalent to (308 ± 3) m/s, significantly higher than that for a typical, conventional tsunami of 800 km/h equivalent to 220 m/s during propagation in the near-field zone. The decay time for the 2022 HTHH, Tonga was calculated using maximum tsunami amplitude attenuation with respect to distance and travel time, where the amplitude was observed to decay rapidly in the near-field and to decrease gradually in the far-field. Based on the farthest station, the decay time for the 2022 HTHH tsunami was found to be 570 minutes or 9.5 hours. The two findings in the current work (the *meteo-tsunami* speed and the corresponding decay time) are in good agreement with those derived from numerical solutions for tsunami modelling from previous studies.

Keywords: HTHH Tonga, *meteo-tsunami*, *travel time*, *decay time*, *near-field*, *far-field*

I. PENDAHULUAN

Tsunami adalah bencana geologi yang dapat dipicu oleh berbagai sumber, baik sumber tektonik, misalnya gempa bawah laut atau longsor bawah laut (Gusman *et al.*, 2019; Nakata *et al.*, 2020; Nagai *et al.*, 2021; Felix *et al.*, 2022) maupun non-tektonik, misalnya erupsi vulkanik di laut (Paris, 2015). Dalam konteks *volcanism* di Indonesia, Giachetti *et al.* (2012) telah melaporkan *possible volcanic tsunami* akibat *flank collapse* dari Anak Rakata karena instabilitas lereng gunung. Lebih dari enam tahun kemudian, tanggal 22 Desember 2018 tsunami yang dibangkitkan oleh *flank collapse* dari Anak Rakata (Grilli *et al.*, 2019; Muhari *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2020; Heidarzadeh *et al.*, 2020) terjadi menyapu pantai Banten dan pantai selatan Lampung.

Dalam konteks tsunami global, *volcanic tsunami* terjadi karena dipicu oleh erupsi gunung api bawah laut Hunga Tonga–Hunga Ha'apai (HTHH), Tonga tanggal 15 Januari 2022 telah menarik perhatian peneliti dunia (Astafyeva *et al.*, 2022; Ghent and Crowell, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Pakoksung *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Keunikan dari tsunami HTHH adalah bukan sekedar tsunami akibat erupsi vulkanik. Erupsi vulkanik HTHH 2022 memicu perubahan tekanan udara yang sangat signifikan pada lapisan atmosfer yang dekat dengan permukaan laut sedemikian sehingga propagasi gelombang tsunami lintas Samudera Pasifik dikontrol sekaligus oleh dua sumber pemicu, yaitu sumber pertama (erupsi vulkanik) mengontrol kinematika perambatan tsunami (*volcanic tsunami*) dalam jangkauan medan dekat (*near-field regime*) dan sumber kedua (rambatan gelombang atmosfer) mengontrol kinematika perambatan tsunami (*meteo-tsunami*) dalam jangkauan medan jauh (*far-field regime*) (Ghent and Crowell, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022).

Tsunami HTHH merupakan contoh kasus yang tepat untuk mempelajari kinematika perambatan gelombang tsunami yang dipicu oleh aktivitas vulkanik. Aspek kinematik ini penting mengingat potensi bahaya *volcanic tsunami* (atau bahkan *meteo-tsunami*) di Indonesia masih ada karena beberapa gunung api berada di laut sehingga kejadian tsunami Selat Sunda 2018 mungkin saja terulang baik di lokasi yang sama maupun di lokasi yang berbeda. Selain itu, gelombang tsunami juga bisa dibangkitkan di perairan relatif dangkal seperti kasus tsunami Teluk Palu 2018 (Gusman *et al.*, 2019; Nakata *et al.*, 2020; Nagai *et al.*, 2021). Pelajaran penting dari kedua kasus di Indonesia tahun 2018 tersebut adalah sistem peringatan dini tsunami harus dibangun dengan instrumen pemantau dalam jumlah yang cukup memadai dan kondisi yang baik serta algoritma deteksi tsunami yang cepat dan akurat yang tidak bergantung pada jenis dan karakteristik sumber pemicu tsunami (Titov, 2021; Reid and Mooney, 2023).

Dalam konteks mitigasi bencana tsunami, kinematika perambatan tsunami selama berada di laut lepas (zona propagasi) ikut menentukan apa yang akan terjadi saat tsunami mendekat pantai (zona mitigasi). Berkaitan dengan hal ini, fokus perhatian yang pertama adalah apakah gelombang tsunami yang bergerak dengan *long wave speed* (kecepatan fase tsunami hanya ditentukan oleh kedalaman laut) yang diperoleh dari pendekatan *shallow water* cukup akurat untuk mendiskripsikan *travel time*. Fokus kedua adalah apakah besaran amplitudo maksimum tsunami bernilai konstan sejak fase pembangkitan tsunami pada zona generasi ataukah bervariasi terhadap *travel time* dan *travel distance* yang bergantung pada fase dinamik tsunami selama berada di jangkauan medan dekat dan medan jauh. Dengan mempertimbangkan semua aspek, pengetahuan tentang *travel time* dan *decay time* sebagai dua fokus utama penelitian ini adalah penting untuk mengantisipasi kedatangan tsunami di wilayah pesisir serta tsunami HTHH, Tonga 2022 digunakan sebagai contoh kasus *volcanic tsunami* untuk mengantisipasi bencana serupa di Indonesia pada masa yang akan datang.

Pendekatan yang umum digunakan untuk mendiskripsikan gerak gelombang tsunami di laut lepas adalah *shallow water approximation* yang dinyatakan pada bentuk persamaan (1) berikut,

$$c = \sqrt{gD} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan (1) di atas, tsunami bersifat non-dispersif dengan kecepatan yang bergantung pada kedalaman laut (Inazu and Saito, 2013; Tsai *et al.*, 2013; Watada *et al.*, 2014; Wang, 2015). Apabila nilai D diambil antara 4000-5000 m, maka rumusan *long wave speed* pada persamaan (1) tersebut di atas berkorelasi dengan kecepatan antara 200-220 ms⁻¹ (Santallanes *et al.*, 2022) yang seringkali digunakan untuk mendiskripsikan gerak gelombang tsunami di laut lepas.

Dalam kasus HTHH 2022, material vulkanik yang dilontarkan saat erupsi mempengaruhi struktur stabil lapisan atmosfer mulai dari troposfer (lapisan yang terdekat dengan permukaan Bumi) sampai dengan ionosfer (Astafyeva *et al.*, 2022; Ghent and Crowell, 2022; Ren *et al.*, 2023). Gangguan kestabilan lapisan atmosfer memicu pembangkitan gelombang atmosfer (Terry *et al.*, 2022) yang merambat sebagai *Lamb wave* (Kubota *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023) maupun *acoustic-gravity wave* (Hu *et al.*, 2023). Kedua jenis gelombang atmosfer ini merambat lebih cepat dari tsunami konvensional, yaitu dengan kecepatan dalam kisaran 300an m/s lebih, mendekati kecepatan bunyi di udara (Carvajal *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022).

Akibat interaksi laut-udara (Lynett *et al.*, 2022), maka terjadilah resonansi antara gelombang atmosfer dan gelombang tsunami di laut sehingga laju rambat *volcanic tsunami* (tsunami dalam medan dekat) dipercepat dari kecepatan tipikal ~ 220 m/s menjadi kecepatan gelombang atmosfer ~ 310 m/s. Tsunami jenis ini disebut dengan *meteo-tsunami*.

Dengan demikian, dalam konteks erupsi vulkanik HTHH 2022, ada dua jenis gelombang tsunami yang dibangkitkan yaitu *volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami*. Dalam hal ini, kinematika perambatan *volcanic tsunami* dikontrol penuh oleh erupsi vulkanik sedangkan aspek kinematik perambatan *meteo-tsunami* dikontrol oleh gelombang atmosfer (Ghent and Crowell, 2022; Heidarzadeh *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

Dalam konteks tsunami HTHH 2022, lokasi titik episenter adalah posisi puncak erupsi vulkanik HTHH. Segera sesudah fase pembangkitan, gelombang tsunami merambat ~ 2 jam pertama atau setara dengan jarak tempuh ~ 1600 km dalam jangkauan *near-fields* dengan energi yang melemah secara cepat, sebelum akhirnya merambat dengan energi yang melemah secara gradual dalam jangkauan *far-fields* (Maulidia dan Prastowo, 2023). Pola pelemahan energi gelombang tsunami yang berlangsung dalam dua tahap (Tang *et al.*, 2012) juga ditemui untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik yang dipicu oleh gempa tektonik bawah laut yang besar, yaitu Tohoku, Jepang 2011 dan Iquique, Chili 2014 (Prastowo and Cholifah, 2019).

Secara umum, pelemahan energi pada kasus tsunami lintas Samudera Pasifik terjadi dengan pola eksponensial (Rabinovich *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Rabinovich *et al.*, 2013) menurut rumusan

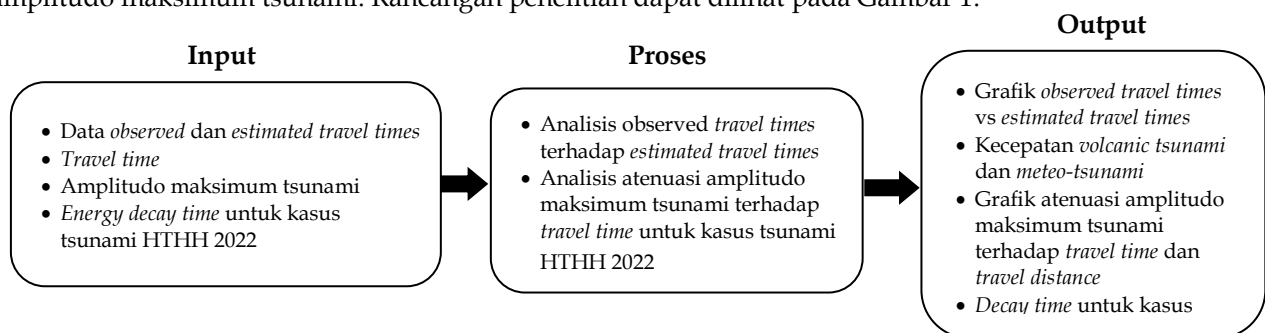
$$E(t) = E_0 e^{-\delta t} \quad (2)$$

di mana E_0 adalah energi tsunami saat awal, δ adalah koefisien dari atenuasi energi tsunami dan t adalah waktu *energy decay time*. Dalam konsep perambatan gelombang, energi ε yang dipindahkan adalah sebanding dengan kuadrat amplitudo A . Secara matematis bisa dituliskan $\varepsilon \sim A^2$. Oleh karena pengamatan energi relatif sulit dilakukan, maka pelemahan energi bisa direpresentasikan melalui monitoring amplitudo maksimum yang direkam oleh instrumen ukur dalam bentuk variasi elevasi muka laut. Pengamatan dengan instrumen ukur yang sensitif menunjukkan bahwa tsunami mengalami pelemahan amplitudo maksimum seiring dengan pertambahan jarak tempuh dari episenter (Inazu and Saito, 2013; Watada *et al.*, 2014).

Dalam penelitian ini, *decay time* didefinisikan sebagai waktu yang dihitung saat tsunami dibangkitkan sejak *onset time* sampai saat merambat dengan amplitudo maksimum yang hampir konstan. Dalam hal ini, *onset time* diasumsikan sama dengan saat erupsi vulkanik HTHH terjadi tanggal 15 Januari 2022 jam 04:15 UTC (Santallanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Penelitian yang membahas *energy decay* (Rabinovich *et al.*, 2011; Fine *et al.*, 2012; Rabinovich *et al.*, 2013) menemukan bahwa energi tsunami dengan periode gelombang yang relatif kecil lebih cepat meluruh. Dalam hal ini, laju pelemahan energi tsunami dipengaruhi oleh batimetri dan topografi dasar laut (selain faktor eksternal yang berasal dari gangguan geofisik terkait kehadiran pulau di tengah laut). Rekaman DARTs dan *tide gauges* menunjukkan pelemahan energi secara eksponensial dengan '*e-folding time*' sebesar $1\pm 0,5$ hari untuk beberapa kasus tsunami lintas Samudera Pasifik (Rabinovich *et al.*, 2011; Rabinovich *et al.*, 2013; Davies *et al.*, 2020).

II. METODE

Data penelitian berupa data sekunder dari NCTR dan NCEI berupa *observed and estimated travel times*, amplitudo maksimum, *travel time* dan *travel distance* yang direkam oleh DARTs dan *tide gauges*. Data tersebut diolah dengan *spreadsheet* untuk membuat grafik *travel time* terhadap *travel distance* dan atenuasi amplitudo maksimum terhadap *travel time*. Nilai *energy decay time* bisa diperoleh dari persamaan empiris grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami. Rancangan penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Rancangan penelitian kinematika perambatan gelombang tsunami HTHH, Tonga 2022.

Data penelitian meliputi *observed and estimated travel times*, amplitudo maksimum, *travel time and distance* yang dikumpulkan dari DARTs dan *tide gauges* yang tersebar di Samudera Pasifik. Seluruh besaran diakses di <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2022tonga.html>. Perhitungan *travel distance* dilakukan dengan memasukkan data lokasi episenter tsunami (diasumsikan sama dengan lokasi puncak HTHH) dan stasiun pemantau melalui kalkulator online di <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128>. Perhitungan *travel distance* mengasumsikan bahwa Bumi berbentuk bola dengan radius 6.378 km dan masukan posisi geografis bernilai negatif berlaku untuk wilayah Bujur Barat dan Lintang Selatan. Selain dihitung dengan pendekatan *shallow water*, kecepatan tsunami HTHH bisa juga diperoleh dari asumsi kedalaman laut Samudera Pasifik 5000 m yang berkorelasi dengan kecepatan 800 km/jam (Prastowo *et al.*, 2018; Santellanes *et al.*, 2022).

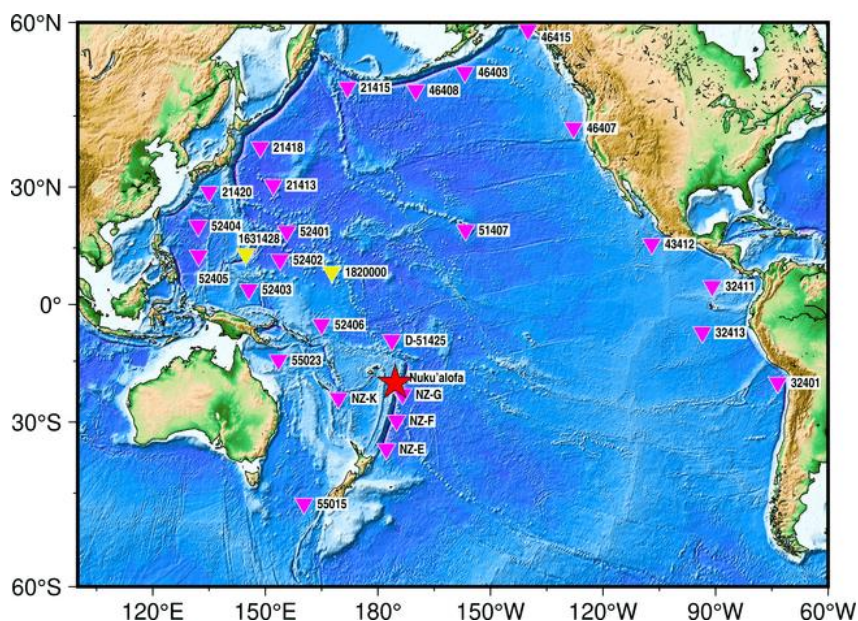
Estimated travel time dihitung dari hasil bagi antara *travel distance* dengan *long wave speed* yang hanya dipengaruhi oleh kedalaman laut. Data kedalaman laut diperoleh secara langsung dengan bantuan *Bathymetric Data Viewer* yang diakses di <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>. *Observed travel time* dan elevasi muka laut bisa dilihat melalui *tsunami waveform* yang diberikan oleh stasiun pemantau.

Pengolahan data menggunakan *spreadsheet* untuk membuat grafik: (1) *observed travel time* terhadap *estimated travel time*; (2) atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap *travel time* dan *travel distance*. Visualisasi grafik *observed travel time* terhadap *estimated travel time* dianalisis untuk membuktikan secara empiris eksistensi fenomena *early arrival* pada kasus perambatan *meteo-tsunami*. Visualisasi grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap *travel time* dianalisis untuk menentukan estimasi *decay time* secara empiris. Visualisasi grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap *travel distance* dianalisis untuk mempelajari *self-similarity* dengan grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap *travel time*.

Seluruh pembuatan grafik ditujukan untuk mempelajari apakah perambatan tsunami HTHH, Tonga 2022 yang dikontrol oleh *dual mechanism* (erupsi vulkanik bawah laut dan rambatan atmosfer) masih memenuhi prinsip fisika yang sama seperti kasus perambatan tsunami lintas Samudera Pasifik yang dipicu oleh gempa tektonik bawah laut, misalnya tsunami Tohoku, Jepang 2011 dan Iquique, Chili 2014 (Prastowo *et al.*, 2018).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

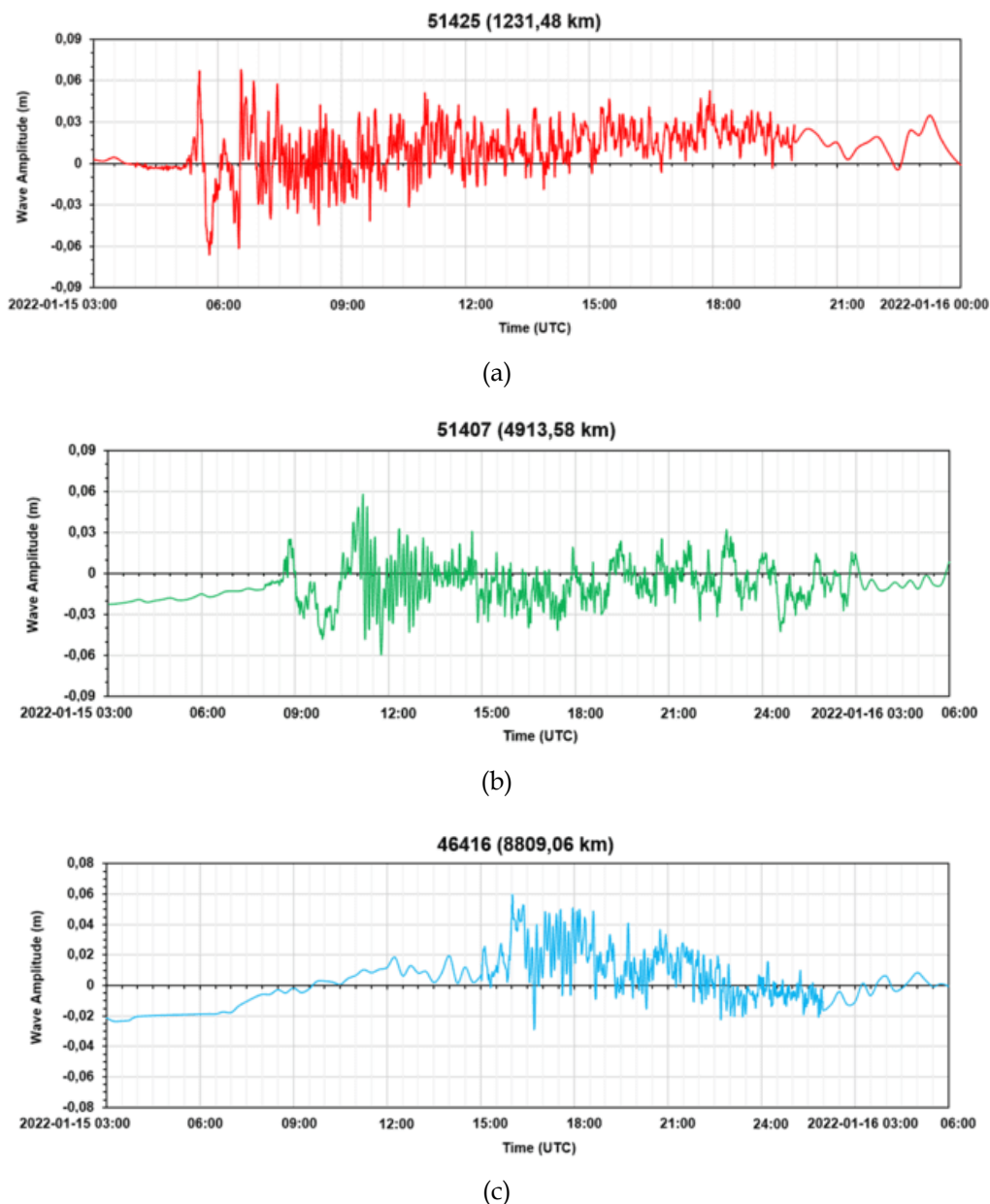
Kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dalam penelitian ini adalah tsunami akibat erupsi vulkanik HTHH, Tonga tanggal 15 Januari 2022 dengan koordinat episenter 20,54° LS dan 175,38° BB di wilayah belahan Bumi selatan (Heidarzadeh *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Pakoksung *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Data diperoleh dari instrumen pemantau elevasi muka laut (DARTs dan *tide gauges*) yang dikelola oleh NOAA dan tersebar di Samudera Pasifik (Gambar 2). Data diolah untuk menyelesaikan kedua masalah penelitian ini, yaitu karakteristik perambatan *volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami* serta *decay time* kasus HTHH, Tonga 2022.



Gambar 2. Lokasi episenter (bintang merah) erupsi vulkanik HTHH 2022 di wilayah selatan Pasifik. Beberapa contoh lokasi DARTs (segitiga merah muda) dan *tide gauges* (segitiga kuning) sebagai instrumen pemantau elevasi muka laut.

Pasca erupsi, gelombang tsunami merambat melintas Samudera Pasifik ke segala arah, di mana rambatan radiasi energi gelombang tsunami menyebar dari jangkauan *near-field* (≤ 1300 km) sampai *far-field* (> 1300 km). Selama gelombang tsunami berada dalam *far-field regime*, efek resonansi akibat interaksi laut-udara menguat. Penguatan efek resonansi tersebut mempercepat gerak *volcanic tsunami* dengan kecepatan tipikal 800 km/jam menjadi *meteo-tsunami* dengan kecepatan yang jauh lebih besar (Carvajal *et al.*, 2022; Kubota *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023).

Sebagai representasi perambatan *volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami*, maka *waveform* yang bersesuaian dengan rekaman data numerik dari stasiun pemantau (DARTs dan *tide gauges*) yang disediakan oleh NCEI diberikan sebagai contoh (Gambar 3) untuk memodelkan rambatan tsunami HTHH 2022. Dengan mengambil *onset time* untuk erupsi vulkanik HTHH pada jam 04:15 UTC (Carvajal *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023), maka *volcanic tsunami* dan *meteo-tsunami* bisa dideteksi oleh instrumen DARTs pada jam yang bersesuaian dengan *arrival time* atau *travel time* yang dibutuhkan untuk tiba di lokasi instrumen DART 51425 (*near-field*) serta DART 51407 dan 46416 (*far-field*).



Gambar 3. Tsunami waveform yang terekam oleh DART: (a) 51425 (*near-field*); (b) 51407 & (c) 46416 (*far-field*).

Visualisasi *tsunami waveform* seperti pada Gambar 3 (a-c) dengan jelas menunjukkan karakteristik perambatan tsunami HTHH 2022 melalui *the first peak* pada setiap *waveform* dari ketiga stasiun monitoring. DART 51425 adalah instrumen pemantau tsunami yang berada di barat laut Kota Apia, Samoa. Jarak pisah

antara instrument DART 51425 dan episenter tsunami HTHH 2022 adalah 1231,48 km yang termasuk dalam jangkauan *near-field* (Gambar 3a). Sinyal kedatangan tsunami yang terekam oleh DART 51425 menunjukkan bahwa amplitudo *volcanic tsunami* terdeteksi sesudah sekitar 1 jam 30 menit dihitung sejak *onset time*.

DART 51407 pada arah tenggara Honolulu Hawaii yang berada 4913,58 km (Gambar 3b) dan DART 46416 pada arah barat Vancouver Canada yang terletak 8809,06 km (Gambar 3c) dipilih secara acak sebagai pemantau tsunami dalam jangkauan *far-field*. *Far-field regime* memfasilitasi rambatan *meteo-tsunami* yang dipengaruhi oleh variasi cepat tekanan atmosfer. Tsunami jenis ini merambat dengan kecepatan yang jauh lebih besar daripada kecepatan tipikal 800 km/jam (Carvajal *et al.*, 2022; Kubota *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023). DART 51407 merekam *meteo-tsunami* pertama kali sesudah 4 jam 30 menit dari *onset time* dan DART 46416 mendeteksi *meteo-tsunami* sesudah 8 jam. Berdasarkan estimasi *arrival time* dari rekaman *waveform* di lokasi DART 51407 dan DART 46416, maka *meteo-tsunami* terbukti bergerak lebih cepat dari *volcanic tsunami*. Meskipun *waveform* yang diberikan DARTs dan *tide gauges* merupakan indikator yang baik bagi kehadiran *meteo-tsunami*, namun demikian *waveform of a single record* dari masing-masing DART atau *tide gauge* tersebut kurang akurat jika digunakan untuk menentukan kecepatan *meteo-tsunami*.

Bahasan rambatan gelombang tsunami HTHH, Tonga 2022 dari *near-field* sampai *far-field* mengungkap fakta bahwa gelombang tsunami HTHH bergerak dengan kecepatan yang berbeda yang mencerminkan dualitas mekanisme pemicu, yaitu erupsi vulkanik dan rambatan gelombang atmosfer (Gusman *et al.*, 2022; Heidarzadeh *et al.*, 2022; Schnepf *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Akumulasi data lapangan dari total 14 instrumen DARTs dan *tide gauges* yang tersebar di perimeter Samudera Pasifik (Tabel 1) memberikan konfirmasi bahwa gangguan atmosfer yang diteruskan ke permukaan laut melalui peristiwa resonansi berkontribusi signifikan terhadap kinematika perambatan *meteo-tsunami* dalam jangkauan *far-field* (Lynett *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

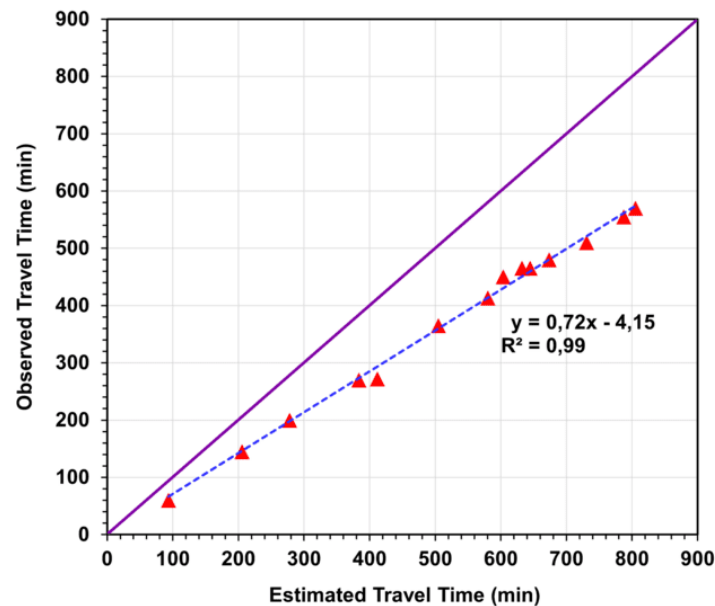
Tabel 1. Data *observed travel time* terhadap *estimated travel time* untuk kasus HTHH, Tonga 2022.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Jarak Tempuh (km)	<i>Estimated Travel Time</i> (min)	<i>Observed Travel Time</i> (min)
1	51425	9,51° LS	176,26° BB	1231,48	93,29	60
2	52406	5,37° LS	164,99° BT	2711,79	205,44	145
3	55015	46,95° LS	160,34° BT	3668,61	277,93	200
4	52403	4,04° LU	145,61° BT	5063,24	383,58	270
5	52401	19,24° LU	155,73° BT	5434,20	411,68	272
6	21413	30,52° LU	152,12° BT	6663,12	504,78	365
7	21420	28,90° LU	135,02° BT	7657,80	580,14	413
8	21415	50,15° LU	171,90° BT	7968,34	603,66	450
9	46403	52,66° LU	156,78° BB	8345,36	632,22	465
10	43412	16,00° LU	106,99° BB	8507,03	644,47	465
11	32413	7,43° LS	93,48° BB	8888,98	673,41	480
12	32411	4,95° LU	90,86° BB	9643,38	730,56	510
13	32401	20,50° LS	73,43° BB	10393,63	787,40	555
14	42409	25,90° LU	89,28° BB	10631,76	805,44	570

A. Penentuan Kecepatan Meteo-Tsunami Kasus HTHH 2022

Informasi teks pada Tabel 1 tersebut masih belum memberikan gambaran jelas tentang estimasi kecepatan *meteo-tsunami* dalam jangkauan *far-field*. Oleh karena itu, diperlukan konversi dari informasi teks menjadi informasi visual sebagai alternatif untuk mengilustrasikan penyimpangan kecepatan gelombang tsunami terhadap pertambahan jarak tempuh. Gambar 4 menyajikan perbedaan jarak tempuh yang terukur sebagai perbedaan waktu tempuh gelombang tsunami antara prediksi oleh *long wave theory* berbasis

pendekatan *shallow-water (estimated travel time)* dan data lapangan secara *real-time (observed travel time)* yang terekam di titik lokasi instrumen ukur DART atau *tide gauge* (segitiga merah).



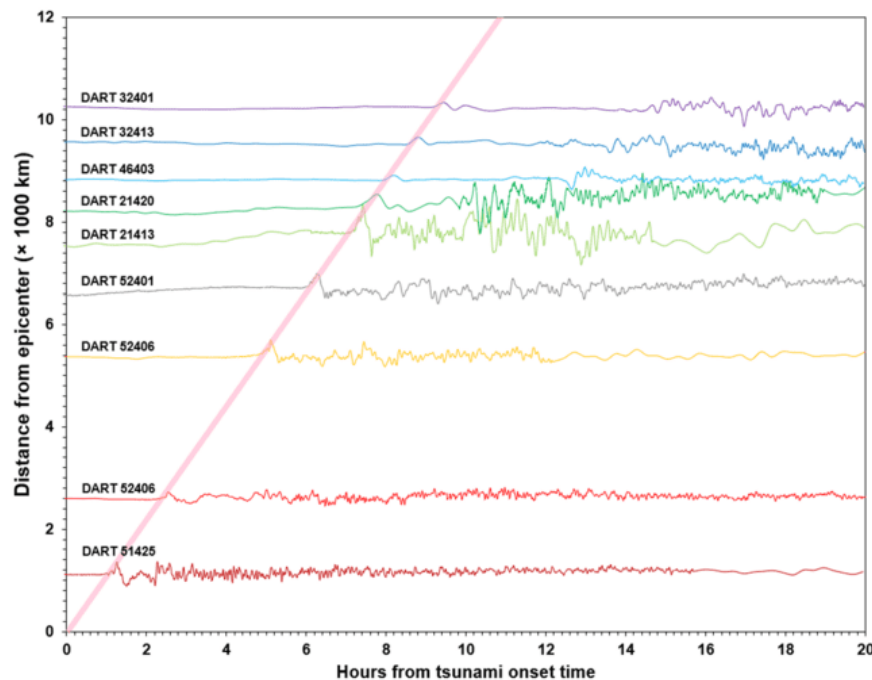
Gambar 4. Grafik *observed travel time* terhadap *estimated travel time* pada kasus HTHH, Tonga 2022.

Secara teknis, tiap-tiap titik ukur *observed travel time* (segitiga merah pada Gambar 4) diperoleh melalui *the first peak of the leading wave* yang diberikan oleh *waveform* yang terekam stasiun pemantau. Nilai terukur *observed travel time* secara sistematis selalu lebih kecil dari nilai prediksi, di mana penyimpangan dari garis ungu menjadi semakin besar seiring dengan pertambahan jarak tempuh yang terukur sebagai waktu tempuh. Sejak tsunami bergerak sekitar 1,67 jam atau setara sejauh 1300 km dari episenter kecepatannya semakin besar (relatif terhadap kecepatan tsunami konvensional yaitu 800 km/jam) karena dikontrol oleh rambatan gelombang Lamb pada lapisan atmosfer.

Garis biru putus-putus adalah *best fit* untuk data lapangan (segitiga merah). Persamaan regresi linier dari garis biru adalah $y = 0,72x - 4,15$ dimana gradien garis 0,72 digunakan untuk estimasi kecepatan *meteo-tsunami* sebagai akibat gangguan pada troposfer yang diteruskan ke permukaan laut via resonansi. Dengan mengadopsi kecepatan 800 km/jam sebagai kecepatan tipikal tsunami konvensional termasuk *volcanic tsunami* akibat erupsi vulkanik HTHH 2022 (Santallanes *et al.*, 2022; Maulidia dan Prastowo, 2023), maka kecepatan *meteo-tsunami* pada kasus tsunami HTHH 2022 adalah sekitar 1111 km/jam = 308 m/s. Kecepatan sebesar itu sesuai dengan temuan terdahulu, baik yang merujuk pada kecepatan *meteo-tsunami* (Kubota *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023) maupun merujuk pada kecepatan gelombang Lamb pada lapisan atmosfer (Carvajal *et al.*, 2022; Gusman *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023).

Tabel 1 dan Gambar 4 tersebut saling melengkapi dengan memberikan informasi untuk menyimpulkan bahwa *meteo-tsunami* benar hadir dalam jangkauan *far-field* (> 1300 km). Berbasis perambatan *meteo-tsunami* inilah selisih antara *estimated travel time* dan *observed travel time (time difference)* ditemukan positif, di mana semua nilai waktu tempuh teramati lebih kecil dari nilai waktu tempuh yang diperkirakan. Hal ini juga menunjukkan bahwa kecepatan *meteo-tsunami* lebih besar dari kecepatan *volcanic tsunami*.

Gambar 5 menawarkan alternatif teknik estimasi kecepatan *meteo-tsunami* dengan *a series of waveforms* dari 9 instrumen DARTs disusun urut dari paling dekat dengan sumber yaitu DART 51425 sampai paling jauh dengan sumber yaitu DART 32401. Garis lurus berwarna pink pada Gambar 5 merupakan plot amplitudo maksimum *meteo-tsunami* terhadap waktu tempuh dengan skala berbeda mengikuti data numerik dari stasiun pemantau masing-masing. Plot garis tersebut disesuaikan dengan ukuran sumbu horisontal (waktu tempuh dimulai sejak tsunami *onset-time*) terhadap sumbu vertikal (jarak stasiun pemantau dari lokasi episenter). Apabila ditarik garis lurus mengikuti *the first peak* dari *waveform* masing-masing, maka kemiringan garis lurus tersebut membuktikan bahwa *meteo-tsunami* tiba di stasiun pemantau secara bergiliran seiring pertambahan jarak dan waktu tempuh. Berdasarkan skala dan satuan yang digunakan untuk sumbu vertikal dan horisontal, kecepatan *meteo-tsunami* HTHH 2022 ditemukan sebesar 1121 km/jam = 311 m/s, konsisten dengan temuan berdasarkan Gambar 4 dengan perbedaan hanya dalam 10 km/jam = 3 m/s yang jauh lebih kecil dari batas ketidakpastian maksimum yang bisa diterima, yaitu 10%.



Gambar 5. Grafik *a series of waveform* yang memperlihatkan sinyal kedatangan *meteo-tsunami* yang terdeteksi oleh DARTs dari berbagai posisi stasiun pemantau yang terdistribusi *over* perimeter Samudera Pasifik dari yang paling dekat (51425) hingga yang paling jauh (32401) berurutan dari bawah membentuk formasi yang mengilustrasikan gerak gelombang tsunami menjauhi sumber.

Berdasarkan estimasi kecepatan *meteo-tsunami* yang dihitung dari Gambar 4 dan Gambar 5 di atas, maka tidak ada perbedaan yang signifikan. Kecepatan *meteo-tsunami* HTHH, Tonga 2022 dalam penelitian ini dilaporkan sebagai $(1110 \pm 10) \text{ km/jam} = (308 \pm 3) \text{ m/s}$. Sebagai komparasi, beberapa publikasi terdahulu telah melaporkan bahwa kecepatan gelombang Lamb pada troposfer adalah dalam rentang $1100\text{-}1200 \text{ km/jam} = 310\text{-}330 \text{ m/s}$ (Astafyeva *et al.*, 2022; Carvajal *et al.*, 2022; Gusman *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Kecepatan gelombang Lamb memiliki nilai yang kurang lebih sama atau sedikit lebih besar dari kecepatan *meteo-tsunami* sebab mekanisme resonansi akibat interaksi laut-udara bermula dari rambatan gelombang Lamb yang menginduksi perambatan *meteo-tsunami* di permukaan laut (Carvajal *et al.*, 2022; Ghent and Crowell, 2022; Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023).

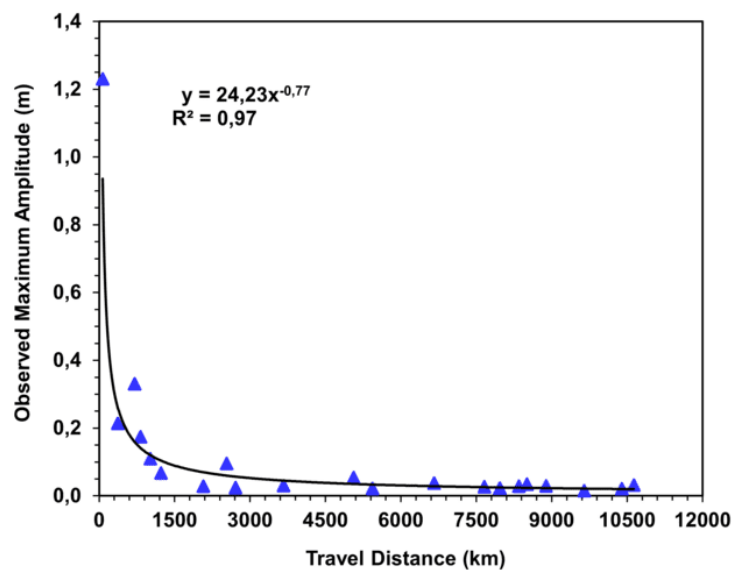
B. Penentuan Decay Time Kasus Tsunami HTHH 2022

Data amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus HTHH, Tonga 2022 menunjukkan amplitudo maksimum tsunami mengalami pelemahan seiring dengan penambahan jarak dan waktu tempuh. Pelemahan amplitudo maksimum diukur terhadap variabel rentang jarak dan waktu tempuh karena *travel distance* dan *travel time* adalah variabel penting untuk diskripsi gerak gelombang tsunami dari sumber menuju ke lokasi yang jauh. Gambar 6 dan Gambar 7 menunjukkan pelemahan amplitudo maksimum terhadap jarak dan waktu tempuh.

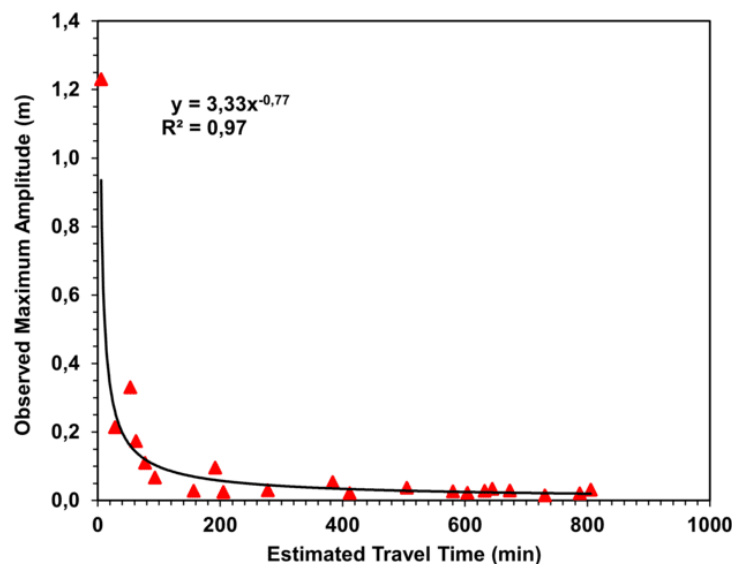
Grafik pada Gambar 6 menunjukkan pelemahan energi tsunami yang terukur sebagai pelemahan amplitudo maksimum tsunami yang dapat diamati melalui variasi elevasi muka laut. Amplitudo maksimum tsunami mengalami pelemahan secara cepat dalam jangkauan *near-field*, dimulai dari sekitar sumber sampai kurang dari 1500 km dari episenter, kemudian melemah secara gradual saat berada dalam jangkauan *far-field* sampai 10500 km . Tahap pertama pelemahan amplitudo ditandai dengan konversi energi potensial menjadi energi kinetik. Pada tahap ini, hampir seluruh energi mekanik yang tersedia diubah menjadi energi kinetik.

Similaritas bentuk ditemukan saat membuat plot amplitudo maksimum terhadap *estimated travel time* pada Gambar 7. Amplitudo maksimum tsunami meluruh dengan cepat selama 100 menit pertama, kemudian melemah secara gradual hingga berharga hampir konstan sampai sekitar 800 menit sejak *the onset time*. Similaritas kedua grafik pada Gambar 6 dan Gambar 7 memberikan sejumlah fakta menarik sebagai berikut. Amplitudo maksimum melemah secara cepat dalam selang waktu 100 menit pertama (Gambar 7) yang

berkorespondensi dengan jarak kurang dari 1500 km (Gambar 6) adalah relevan dengan batas atas pada jangkauan *near-field* yang ditemukan sebelumnya pada Gambar 4, yaitu sekitar 1300 km. Koinsidensi temuan tersebut sesuai dengan substansi Figure 3 (Dogan *et al.*, 2022) yang menceritakan kecepatan pulsa gelombang tekanan barometrik adalah antara 800-900 km/jam (*conventional tsunami speed*) pada menit ke 100.



Gambar 6. Grafik *observed maximum amplitude* terhadap *travel distance* pada kasus HTHH, Tonga 2022.



Gambar 7. Grafik *observed maximum amplitude* terhadap *estimated travel time* pada kasus HTHH, Tonga 2022.

Dalam penelitian ini, pelemahan amplitudo maksimum ditemukan merupakan a *fitted power function* baik terhadap *travel distance* maupun *travel time*, sesuai dengan temuan penelitian terdahulu (Dogan *et al.*, 2022) namun tidak sesuai dengan temuan pelemahan energi tsunami yang merupakan fungsi eksponensial turun (Rabinovich *et al.*, 2011; Rabinovich *et al.*, 2013). Data amplitudo maksimum terhadap *travel distance* juga mengungkap fakta bahwa titik ukur terendah pada Gambar 6 sekitar 10500 km yang berkorelasi dengan *antipodal point* pada posisi 10020 km untuk rambatan gelombang atmosfer (Dogan *et al.*, 2022).

Secara keseluruhan, bentuk grafik pelemahan amplitudo maksimum terhadap variasi jarak dan waktu tempuh menyerupai bentuk grafik yang dilaporkan oleh Prastowo and Cholifah (2019) yang digunakan sebagai basis untuk menentukan *decay time*. Pada tahap awal saat tsunami masih berada dalam jangkauan *near-field*, pelepasan energi mekanik yang tersedia untuk pembangkitan gelombang tsunami didominasi keruntuhan energi potensial menjadi energi kinetik (Tang *et al.*, 2012). Dalam konteks HTHH, Tonga 2022,

energi kinetik yang dimaksud adalah energi gerak gelombang *volcanic-tsunami*. Pada tahap lanjut saat tsunami berada dalam jangkauan *far-field*, hampir seluruh energi mekanik yang tersedia telah diubah menjadi energi gerak gelombang *meteo-tsunami*. Pada tahap ini, tsunami mengalami fase di mana amplitudo maksimum berharga relatif konstan.

Pada tahap kedua di mana gelombang tsunami berada dalam zona *far-field*, perambatan tsunami dikontrol oleh gangguan atmosferik yang didominasi oleh (atmospheric) Lamb wave sehingga *volcanic tsunami* mengalami percepatan gerak menjadi *meteo-tsunami*. Dalam hal ini, kecepatan tipikal tsunami konvensional sebesar 800 km/jam = 220 m/s tidak lagi berlaku. Oleh karena itu, data lapangan *observed travel time* lebih bisa dipercaya daripada data *estimated travel time* (pada zona ini) yang dihitung berbasis kecepatan tipikal untuk tsunami konvensional. Dengan demikian, waktu tempuh terukur terlama pada zona ini yaitu 570 menit atau 9,5 jam (terekam oleh DART 42409 berjarak 10361,76 km dari lokasi episenter) merupakan estimasi terbaik untuk *decay time*. Hasil tersebut tidak berbeda signifikan dengan estimasi waktu tempuh terlama ($10,0 \pm 0,5$) jam yang diperoleh dari model peta kontur *travel time* dari Hu *et al.* (2023) untuk rambatan Lamb wave (diasumsikan setara dengan rambatan *meteo-tsunami*).

IV. KESIMPULAN

Pasca erupsi dahsyat, gelombang tsunami HTHH Tonga 2022 dibangkitkan dan merambat melintasi Samudera Pasifik ke segala arah. Rambatan tsunami ini dibagi menjadi dua *regimes*, yaitu *near-field* (≤ 1300 km) dan *far-field* (> 1300 km). Dengan bantuan instrumen DARTs dan *tide gauges*, tsunami HTHH ditemukan bergerak dengan kecepatan konvensional 800 km/jam = 220 m/s selama berada dalam jangkauan *near-field* (*volcanic tsunami*) dan 1110 ± 10 km/jam = 308 ± 3 m/s selama berada dalam jangkauan *far-field* (*meteo-tsunami*). Dua kecepatan yang berbeda untuk kedua tsunami tersebut merefleksikan dualitas mekanisme pemicu, yaitu erupsi vulkanik yang mengontrol *volcanic tsunami* dan rambatan Lamb wave yang mengontrol *meteo-tsunami*. Kecepatan *meteo-tsunami* yang ditemukan dalam penelitian ini tidak jauh berbeda dengan temuan terdahulu (Carvajal *et al.*, 2022; Gusman *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2022; Santallanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

Pelemahan amplitudo maksimum terhadap jarak dan waktu tempuh untuk tsunami HTHH Tonga 2022 mengikuti hukum *a power function* (Dogan *et al.*, 2023) yang meluruh dengan cepat dalam zona *near-field* dan menurun secara gradual dalam zona *far-field*. Penentuan *decay time* untuk kasus tsunami HTHH Tonga 2022 diambil dari lokasi DART terjauh dari episenter yang merekam *travel time* sebesar 570 menit atau 9,5 jam, tidak berbeda signifikan dengan estimasi waktu tempuh yang diperoleh dari model kontur *meteo-tsunami travel time* dari Hu *et al.* (2023).

UCAPAN TERIMA KASIH

Tim penulis ingin mengungkapkan terima kasih kepada dua lembaga yang berperan penting, yaitu NOAA Center for Tsunami Research (NCTR) dan National Centers for Environmental Information (NCEI), atas ketersediaan data numerik dan elevasi muka laut yang digunakan untuk menyelesaikan masalah dalam penelitian ini. Data informasi tersebut dapat diakses melalui <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/> dan <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/dart/2022tonga.html>, juga kepada pihak pengelola situs <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128> atas fasilitas perhitungan akurat yang diberikan untuk menentukan jarak pisah antara episentral dan lokasi stasiun pemantau secara *online*. Terima kasih kepada *reviewers* sekaligus dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan yang bersifat membangun terhadap penulisan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Astafyeva, E., Maletckii, B., Mikesell, T. D., Munaibari, E., Ravanelli, M., Coisson, P., Manta, F. and Rolland, L. 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letter*, Vol. 49, Issue 10.
- Carvajal, M., Sepúlveda, I., Gubler, A. and Garreaud, R. 2022. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 6, pp. 1-4.
- Davies, G., Romano, F. and Stefano, L. 2020. Global dissipation models for simulating tsunamis at far-field coasts up to 60 hours post-earthquake: multi-site tests in Australia. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 8, Article 598235.

- Dogan, G. G., Yalciner, A. C., Annunziato, A., Yalciner, B. and Necmioglu, O. 2023. Global propagation of air pressure waves and consequent ocean waves due to the January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Ocean Engineering*, Vol. 267, No. 113174.
- Felix, R. P., Hubbard, J. A., Bradley, K. E., Lythgoe, K. H., Li, L. and Switzer, A. D. 2022. Tsunami hazard in Lombok and Bali, Indonesia due to the Flores back-arc thrust. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 22, Issue 5, pp. 1665-1682.
- Fine, I. V., Kulikov, E. A. and Cherniawsky, J. Y. 2012. Japan's 2011 tsunami: characteristic of wave propagation from observations and numerical modelling. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170, Issue 6-8, pp. 1295-1307.
- Ghent, J. N. and Crowell, B. W. 2022. Spectral characteristics of ionospheric disturbances over the Southwestern Pacific from the 15 January 2022 Tonga eruption and tsunami. *Geophysical Research Letter*, Vol. 49, Issue 20.
- Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K. and Ontowirjo, B. 2012. Tsunami hazard related to a flank collapse of Anak Krakatau volcano, Sunda Strait, Indonesia. *Geological Society of London: Special Publication*, Vol. 361, pp. 79-90.
- Gusman, A. R., Supendi, P., Nugraha, A. D., Power, W., Latief, H., Sunendar, H., Widiyantoro, S., Daryono, Wiyono, S. H., Hakim, A., Muhari, A., Wang, X., Burbidge, D., Palgunadi, K., Hamling, I. and Daryono, M. R. 2019. Source model for tsunami inside Palu Bay following the 2018 Palu earthquake, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 15, pp. 8721-8730.
- Gusman, A. R., Roger, J., Noble, Chris., Wang, X., Power, W. and Burbidge, D. 2022. The 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano air-wave generated tsunami. *Pure and Applied Geophysics*.
- Grilli, S. T., Tappin, D. R., Carey, S., Watt, S. F. L., Ward, S. N., Grilli, A. R., Engwell, S. L., Zhang, C., Kirby, J. T., Schambach, L. and Muin, M. 2019. Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 11946.
- Heidarzadeh, M., Ishibe, T., Sandanbata, O., Muhari, A. and Wijanarto, A. B. 2020. Numerical modeling of the subaerial landslide source of the 22 December 2018 Anak Krakatoa volcanic tsunami, Indonesia. *Ocean Engineering*, Vol. 195. No. 106733.
- Heidarzadeh, M., Gusman, A. R., Ishibe, T., Sabeti, R. and 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*, Vol. 261, No. 112165.
- Ho, T-C., Mori, N. and Yamada, M. 2023. Ocean gravity waves generated by the meteotsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets and Space*, Vol. 75, No. 25.
- Hu, G., Li, L., Ren, Z. and Zhang, K. 2023. The characteristics of the 2022 Tonga volcanic tsunami in the Pacific Ocean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 23, Issue 2, pp. 675-691.
- Inazu, D. and Saito, T. 2013. Simulation of distant tsunami propagation with a radial loading deformation effect. *Earth Planets Space*, Vol. 65, Issue 8, pp. 835-842.
- Kubota, T., Saito, T. and Nishida, K. 2022. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, Vol. 377, Issue 6601, pp. 91-94.
- Lynett, P., McCann, M., Zhou, Z., Renteria, W., Borrero, J., Greer, D., Fa'anunu, O., Bosserelle, C., Jaffe, B., Selle, S. L., Ritchie, A., Snyder, A., Nasr, B., Bott, J., Graehl, N., Synolakis, C., Ebrahimi, B. and Cinar, G. E. 2022. Diverse tsunamigenesis triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, Vol. 609, Issue 7928, pp. 728-743.
- Maulidia, D. dan Prastowo, T. 2023. Analisis atenuasi *maximum tsunami amplitude* dan *energy decay time* untuk tsunami lintas Samudera Pasifik. *Jurnal Inovasi Fisika*, Vol. 12, No. 1, Hal. 88-103.
- Muhari, A., Heidarzadeh, M., Susmoro, H., Nugroho, H. D., Kriswati, E., Supartoyo, Wijanarto, A. B., Imamura, F. and Arikawa, T. 2019. The December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami as inferred from post-tsunami field surveys and spectral analysis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, No. 12, pp. 5219-5233.
- Nagai, K., Muhari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A., Arikawa T. and Imamura, F. 2021. Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 63, Issue 4. pp. 446-466.
- Nakata, K., Katsumata, A. and Muhari, A. 2020. Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia. *Earth Planet and Space*, Vol. 72, No. 44.
- Omira, R., Ramalho, R. S., Kim, J., González, P. J., Kadri, U., Miranda, J. M., Carrilho, F. and Baptista, M. A. 2022. Global Tonga tsunami explained by a fast-moving atmospheric source. *Nature*, Vol. 609, pp. 734-740.

- Pakoksung, K., Suppasri, A. and Imamura, F. 2022. The near-feld tsunami generated by the 15 January 2022 eruption of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano and its impact on Tongatapu, Tonga. *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 15187.
- Paris, R. 2015. Source mechanisms of volcanic tsunamis. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 373, Issue 2053.
- Prastowo, T., Cholifah, L. and Madlazim. 2018. Analysis of travel time delay for large tsunamis across the Pacific and Indian oceans. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 37, No. 4, pp. 195-212.
- Prastowo, T. and Cholifah, L. 2019. The nature of tsunami energy decay with epicentral distance in the open ocean for two large trans-Pacific tsunamis. *Journal of Physics: Conf. Series*, Vol. 1153, No. 012017.
- Rabinovich, A. B., Candella, R. N. and Thompson, R. E. 2011. Energy decay of the 2004 Sumatra tsunami in the world ocean. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 168, Issue 11, pp. 1919-1950.
- Rabinovich, A. B., Candella, R. N. and Thompson, R. E. 2013. The open ocean energy decay of three recent trans-Pacific tsunamis. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, Issue 12, pp. 3157-3162.
- Reid, J. A. and Mooney, W. D. 2023. Tsunami occurrence 1900-2020: A global review, with examples from Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*. Vol. 180, pp. 1549-1571.
- Ren, Z., Wang, W., Wang, Y. and Hou, J. 2020. Numerical study of the triggering mechanism of the 2018 Anak Krakatau tsunami: eruption or collapsed landslide. *Natural Hazards*, Vol. 102, No. 1, pp 1-13.
- Ren, Z., Higuera, P. and 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*, Vol. 128, Issue 4, pp 1-21.
- Santellanes, S. R., Ruiz-Angulo, A. and Melgar, D. 2022. Tsunami waveform stacking and complex tsunami forcings from the Hunga-Tonga eruption. *Pure and Applied Geophysics*.
- Schnepf, N. R., Minami, T. and Nair, M. C. 2022. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophysics Research Letters*, Vol. 49, Issue 10, pp. 1-9.
- Titov, V. V. 2021. Hard lessons of the 2018 Indonesian tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 178, Issue 4, pp. 1121-1133.
- Terry, J. P., Goff, J., Winspear, N., Bongolan, V. P. and Fisher, S. 2022. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geoscience Letters*, Vol. 9, No. 4, pp. 1-11.
- Tang, L., Titov, V. V., Bernard, E. N., Wei, Y., Chamberlin, C. D., Newman, J. C., Mofjelt, H. O., Arcas, D., Eble, M. C., Moore, C., Uslu, B., Pells, C., Spillane, M., Wright, L. and Gica, E. 2012. Direct energy estimation of the 2011 Japan tsunami using deep-ocean pressure measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 117, Issue C8, pp. 1-28.
- Tsai, V. C., Ampuero, J. P., Kanamori, H. and Stevenson, D. J. 2013. Estimating the effect of earth elasticity and variable water density on tsunami speeds. *Geophysics Research Letters*, Vol. 40, Issue 3, pp. 492-496.
- Wang, D. 2015. An ocean depth-correction method for reducing model errors in tsunami travel time: application to the 2010 Chile and 2011 Tohoku tsunamis. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-22.
- Watada, S., Kusumoto, S. and Satake, K. 2014. Travel time delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic earth. *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, Vol. 119, Issue 5, pp. 4287-4310.