

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 14 Nomor 2 Tahun 2025, hal 152-162

PEMBANGKITAN DAN PERAMBATAN GELOMBANG ATMOSFER LAMB AKIBAT ERUPSI VULKANIK BAWAH LAUT HUNGA TONGA 2022

¹⁾Nabila Khansa Hanifa, ²⁾Arie Realita, ³⁾Muhammad Nurul Fahmi

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: nabilakhansa.21023@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: arierealita@unesa.ac.id

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

Abstrak

Penelitian ini menganalisis pembangkitan dan perambatan gelombang atmosfer Lamb akibat erupsi vulkanik bawah laut Hunga Tonga pada 15 Januari 2022 dalam konteks potensi kejadian serupa di wilayah Indonesia. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi karakteristik propagasi gelombang Lamb, khususnya kecepatan rambat dan efisiensi energi selama perambatan global. Berdasarkan barogram tekanan udara dari jaringan stasiun cuaca ASOS, arrival time dan observed travel time untuk gelombang Lamb terekam jelas pada lintasan awal dan balik. Hasil menunjukkan gelombang Lamb merambat dengan kecepatan rata-rata 1129 km/jam (314 m/s) untuk lintasan awal dan 1114 km/jam (310 m/s) untuk lintasan balik, dengan perbedaan kecepatan hanya sekitar 1,3% yang mencerminkan disipasi energi sangat rendah. Kecepatan ini jauh melebihi tsunami konvensional (~220 m/s) dan sebanding dengan kecepatan meteo-tsunami (~300-310 m/s). Hasil penelitian ini tidak berbeda signifikan dari estimasi kecepatan gelombang Lamb dalam temuan terdahulu yang relevan. Temuan ini menegaskan peran gelombang Lamb dalam resonansi atmosfer-laut serta pentingnya integrasi pemantauan tekanan atmosfer dalam sistem peringatan dini tsunami non-tektonik di Indonesia.

Kata Kunci: Hunga Tonga 2022, gelombang Lamb, tekanan barometrik

Abstract

This study analyzes the generation and propagation of atmospheric Lamb waves due to the submarine volcanic eruption of Hunga Tonga on 15 January 2022 in the context of potential similar events in the Indonesian region. This study aims to identify the propagation characteristics of Lamb waves, particularly the propagation speed and energy efficiency during global propagation. Based on air pressure barograms from the ASOS weather station network, the arrival time and observed travel time for Lamb waves are clearly recorded on the initial and return trajectories. The results show that Lamb waves propagate with an average speed of 1129 km/h (314 m/s) for the initial trajectory and 1114 km/h (310 m/s) for the return trajectory, with a speed difference of only about 1.3%, reflecting very low energy dissipation. These speeds far exceed those of conventional tsunamis (~220 m/s) and are comparable to meteo-tsunami speeds (~300-310 m/s). The results of this study are not significantly different from the Lamb wave velocity estimates in relevant previous studies. This finding confirms the role of Lamb waves in atmosphere-sea resonance and the importance of integrating atmospheric pressure monitoring in Indonesia's non-tectonic tsunami early warning system.

Keywords: Hunga Tonga 2022, Lamb wave, barometric pressure

I. PENDAHULUAN

Letusan dahsyat gunung api bawah laut Hunga Tonga pada 15 Januari 2022 di Samudra Pasifik Selatan memicu gangguan tekanan atmosfer yang sangat kuat dan menjangkau hingga ke lapisan atas atmosfer, sebagaimana tercatat oleh jaringan stasiun cuaca global (Carvajal *et al.*, 2022; Dalal *et al.*, 2023; Davies *et al.*, 2024; Heki, 2024; Shinagawa and Miyoshi, 2024). Gangguan ini merambat dengan frekuensi spektral dan kecepatan yang bervariasi (Adam, 2022; Duncombe, 2022; Wright *et al.*, 2022), mencakup gelombang kejut, gelombang akustik-gravitasi dan gelombang Lamb (Astafyeva *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Nishikawa *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023). Energi besar yang dilepaskan secara impulsif dari episenter mengakibatkan peningkatan tekanan barometrik signifikan di sekitarnya (Pekin *et al.*, 2023; Sepúlveda *et al.*, 2023), yang selanjutnya menjalar sebagai osilasi atmosferik global dengan gelombang Lamb sebagai komponen dominan yang mampu menghantarkan energi secara efisien dalam skala lintasan jauh (Amores *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023). Peristiwa ikonik lain yang juga melibatkan erupsi eksplosif gunung api dan memicu pembangkitan serta perambatan gelombang Lamb terjadi pada mega erupsi Gunung Krakatau di Selat Sunda pada tahun 1883 (Ghent and Crowell, 2022; Garza-Girón *et al.*, 2023).

Gelombang Lamb umumnya terdeteksi di lapisan troposfer (Nishida *et al.*, 2014; Santellanes *et al.*, 2022; Pekin *et al.*, 2023; Shrivastava *et al.*, 2023) dan merambat dengan kecepatan antara 305–330 m/s mendekati kecepatan bunyi di udara yang bergantung pada temperatur lokal (Amores *et al.*, 2022; Gusman *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023). Gelombang ini terbentuk akibat pelepasan energi impulsif dalam waktu sangat singkat, seperti pada saat erupsi Hunga Tonga, dan dapat merambat mengelilingi Bumi beberapa kali (Lynett *et al.*, 2022; Otsuka, 2022; Terry *et al.*, 2022). Besarnya intensitas gelombang Lamb ditentukan oleh kekuatan erupsi dan tinggi kolom material vulkanik. Letusan dengan indeks VEI ≥ 4 cukup untuk menghasilkan gelombang Lamb yang terdeteksi secara luas (Díaz and Rigby, 2022; Kubota *et al.*, 2022), sementara letusan skala besar seperti Krakatau 1883 dan Hunga Tonga 2022 (VEI $\geq 5-6$) cenderung menghasilkan gelombang Lamb yang lebih kuat dan menjangkau jarak yang sangat jauh (Amores *et al.*, 2022; Wright *et al.*, 2022).

Penelitian mengenai gelombang Lamb sangat penting dalam upaya mitigasi bencana geologi di Indonesia, khususnya dalam mendeteksi dampak erupsi vulkanik bawah laut dan potensi tsunami yang dipicu oleh resonansi gelombang sebagai bagian dari interaksi laut-udara (Gusman *et al.*, 2022; Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Ren *et al.*, 2023). Berkaitan dengan hal ini, fokus perhatian yang pertama adalah bagaimana mekanisme pembangkitan gelombang Lamb dan perambatannya di permukaan Bumi setelah sejumlah besar energi gelombang kejut yang besar diradiasikan dari episenter erupsi ke atmosfer. Fokus kedua adalah menganalisis kecepatan gelombang Lamb, baik saat pertama kali terdeteksi (*first arrival*) maupun ketika kembali terekam di stasiun yang sama (*return arrival*) dari titik baliknya (*antipode*). Kecepatan gelombang Lamb menjadi faktor krusial dalam menentukan propagasi meteo-tsunami melalui mekanisme resonansi. Dengan memahami karakteristik ini, estimasi waktu kedatangan tsunami dapat dilakukan lebih akurat dan strategi penanggulangan bencana geologi di Indonesia dapat ditingkatkan untuk mengantisipasi bencana potensial serupa pada masa yang akan datang.

Secara teoritis, kecepatan rambat gelombang Lamb ditentukan oleh kondisi termodinamika atmosfer. Berdasarkan hukum gas ideal, kecepatan propagasinya dapat dinyatakan dengan bentuk persamaan (1) berikut,

$$c_L = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}} \quad (1)$$

di mana γ adalah konstanta adiabatik ($\gamma = 1.40$), R adalah konstanta gas universal ($R = 8,314.36 \text{ J kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$), M adalah massa molekul udara ($M = 28.966 \text{ kg/kmol}$) dan T adalah temperatur absolut dalam kelvin (Amores *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023). Berdasarkan persamaan tersebut, gelombang Lamb cenderung melambat saat bergerak dari daerah dengan temperatur tinggi ke daerah dengan temperatur rendah (Hu *et al.*, 2023). Dengan demikian, dinamika perambatan gelombang Lamb juga ditentukan oleh perubahan tekanan atmosfer mengingat distribusi tekanan atmosfer memengaruhi distribusi temperatur (Nishikawa *et al.*, 2022; Watanabe *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023).

Selain dihitung secara teoritis, kecepatan rambat gelombang Lamb juga dapat ditentukan secara empiris menggunakan hubungan dasar kinematika berikut,

$$v = \frac{s}{t} \quad (2)$$

di mana v adalah kecepatan gelombang, s adalah jarak antara sumber dan titik pengamatan dan t adalah selang waktu tempuh gelombang dari sumber ke titik pengamatan. Pendekatan ini berguna dalam analisis observasional, seperti pada penggunaan data barogram untuk mengukur waktu tiba gelombang Lamb di berbagai lokasi pengamatan.

Kasus erupsi Hunga Tonga 2022 menjadi perhatian khusus karena gelombang Lamb yang dihasilkan tidak hanya terekam secara global, tetapi juga menunjukkan potensi memicu meteo-tsunami sebagai akibat interaksi laut-udara melalui mekanisme resonansi gelombang (Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023). Dalam jangkauan medan dekat (dekat dengan episenter erupsi), tsunami konvensional merambat dengan kecepatan 200–220 m/s (Santallanes *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023; Ho *et al.*, 2023). Dalam jangkauan medan jauh, efek resonansi mempercepat gerak tsunami dengan kecepatan lebih besar dari kecepatan tsunami konvensional (Gusman *et al.*, 2022; Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023). Tsunami dengan akselerasi gerak seperti tersebut di atas dikenal sebagai meteo-tsunami. Hal ini sesuai dengan temuan terdahulu (Realita *et al.*, 2024) yang melaporkan bahwa kecepatan meteo-tsunami adalah sebesar 308 m/s, lebih kecil dari kecepatan gelombang Lamb sebesar 313–315 m/s (Santallanes *et al.*, 2022). Fakta bahwa kecepatan meteo-tsunami lebih kecil dari kecepatan gelombang Lamb juga diilustrasikan oleh rekaman variasi tekanan barometrik dan tinggi muka laut dari 12 stasiun pemantau meteorologi dan tinggi muka laut yang digunakan dalam penelitian terdahulu (Pakoksung *et al.*, 2023).

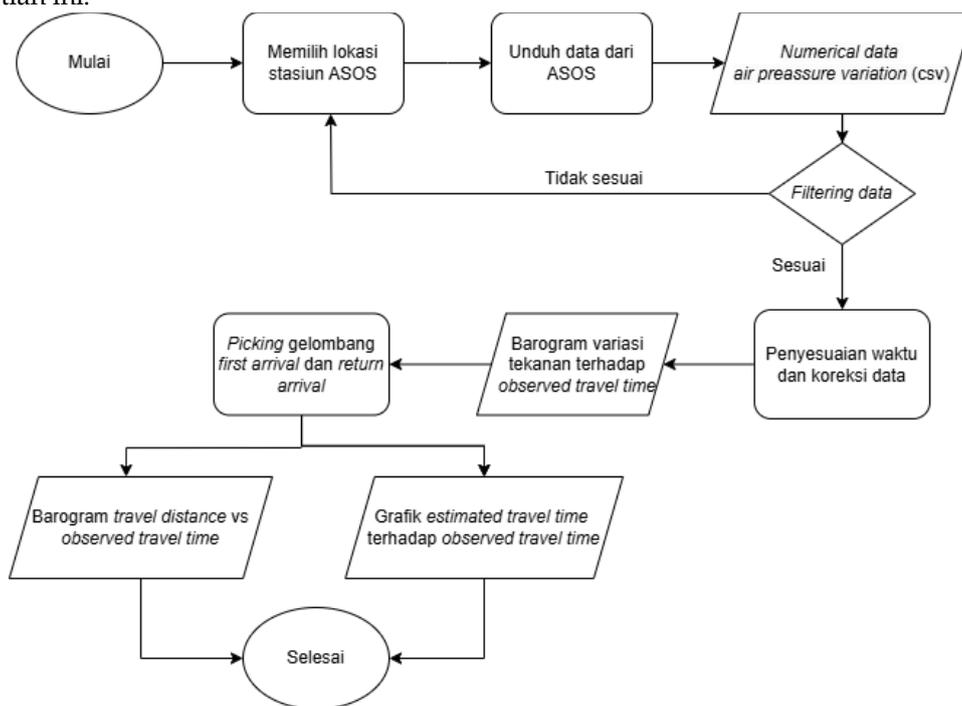
II. METODE

Data penelitian berupa data sekunder yang bisa diandalkan (*reliable*) berupa catatan *air pressure*, *arrival time*, *estimated travel time*, *observed travel time* dan *travel distance*. Data lapangan tersebut kemudian diolah dengan *spreadsheet* untuk menganalisis mekanisme pembangkitan dan perambatan gelombang Lamb akibat erupsi vulkanik bawah laut Hunga Tonga 2022. Hasil pengolahan data berupa grafik karakteristik perambatan gelombang dengan hasil analisis terhadap grafik tersebut digunakan untuk estimasi kecepatan gelombang Lamb. Data penelitian meliputi *air pressure variation*, *arrival time*, *estimated travel time*, *observed travel time* dan *travel distance* yang dikumpulkan dalam bentuk *numerical data* dari global barograph network yang tersebar di wilayah utara Samudera Pasifik dan sebagian daratan Benua Amerika. Seluruh sumber data bisa didapatkan dari stasiun pemantauan cuaca, yaitu *Automated Surface Observing System (ASOS)* (<https://mesonet.agron.iastate.edu/request/asos/1min.phtml>). Data parameter meteorologis tersebut diperoleh dari instrumen pemantau cuaca yang tersebar di banyak lokasi permukaan Bumi yang dilewati oleh rambatan gelombang Lamb. Laman tersebut merepresentasikan pengamatan di wilayah utara Samudera Pasifik arah timur laut dari episenter erupsi vulkanik Hunga Tonga di wilayah selatan Samudera Pasifik.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel kontrol, variabel manipulasi dan variabel respons. Dalam hal ini, variabel kontrol adalah kasus erupsi vulkanik bawah laut Hunga Tonga pada tanggal 15 Januari 2022. Variabel manipulasi yakni posisi stasiun pemantau cuaca dari jaringan global stasiun meteorologi, yaitu ASOS yang diukur dari lokasi episenter erupsi. Variabel respons meliputi *air pressure variation*, *arrival time*, *estimated travel time*, *observed travel time* dan *travel distance*. Perhitungan *travel distance* dilakukan dengan memasukkan data posisi geografis episenter erupsi vulkanik dan stasiun pemantau cuaca. Perhitungan tersebut mengasumsikan bahwa Bumi berbentuk bola dengan radius 6.378 km dan masukan posisi geografis bernilai negatif untuk lokasi yang berada di wilayah Bujur Barat (BB) dan Lintang Selatan (LS). *Estimated travel time* dihitung dari hasil bagi antara *travel distance* dengan asumsi kecepatan gelombang Lamb 1150 km/jam yang merupakan nilai tengah dari jangkauan kecepatan rambat gelombang Lamb sekitar 1100–1200 km/jam menurut temuan terdahulu (Dogan *et al.*, 2023; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023). *Air pressure variation* dikumpulkan dalam bentuk *numerical data* dan kemudian diolah menjadi barograms yang mengilustrasikan waktu, di mana puncak amplitudo pulsa tekanan tiba di stasiun tertentu.

Pengolahan data penelitian menggunakan perhitungan matematis berbasis numerik untuk membuat grafik (1) barogram berisi variasi tekanan barometrik terhadap *observed travel time* berbasis observasi instrumen ukur di lapangan; (2) *estimated travel time* terhadap *observed travel time*; (3) deretan barograms: *travel distance vs observed travel time*. Dalam hal ini, *time-series* barogram menunjukkan perambatan gelombang Lamb menjauh dari episenter erupsi, di mana barogram disusun seiring dengan durasi waktu tempuh perambatan gelombang. Susunan barogram tersebut secara eksplisit menunjukkan pergeseran posisi puncak-puncak amplitudo tekanan. Teknik serupa dilakukan secara terbalik untuk menunjukkan perambatan balik gelombang Lamb dari posisi terjauh diukur dari episenter erupsi menuju ke posisi terdekat. Hasil penelitian ini akan dibandingkan dengan penelitian sebelumnya untuk mengidentifikasi pola perambatan yang serupa atau perbedaan yang mungkin terjadi. Perbandingan ini diharapkan dapat memperkuat pemahaman

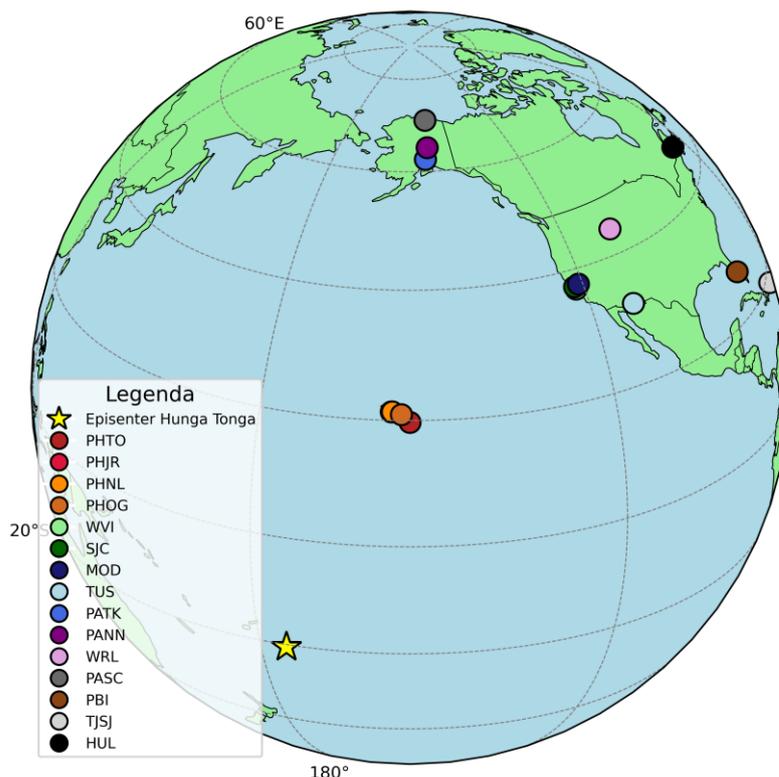
terhadap karakteristik gelombang Lamb serta validasi terhadap model *estimated travel time* yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Distribusi Stasiun Meteorologi

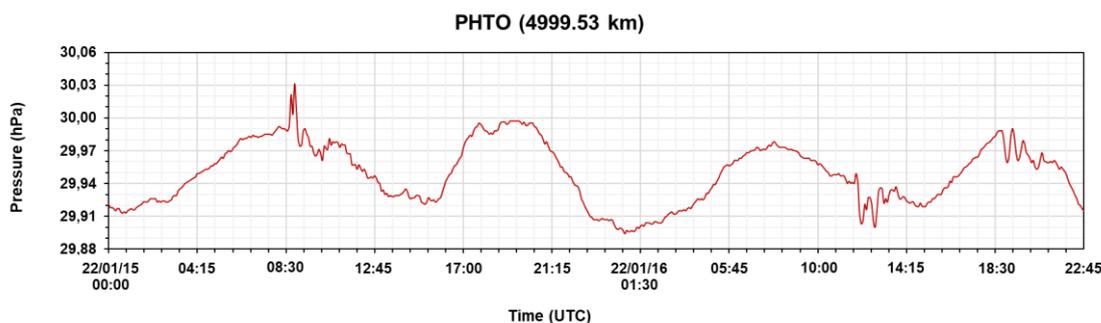


Gambar 2. Pusat erupsi (bintang kuning) bawah laut Hunga Tonga 2022 pada tanggal 15 Januari 2022 pukul 04:15 UTC, di wilayah Pasifik Selatan. Lingkaran dengan warna berbeda menunjukkan lokasi-lokasi stasiun ASOS yang digunakan dalam penelitian.

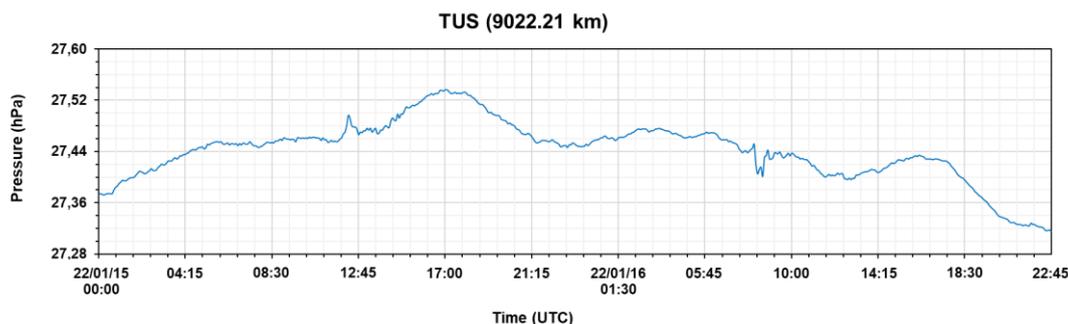
Erupsi bawah laut Hunga Tonga pada 15 Januari 2022 dianggap sebagai salah satu letusan paling eksplosif dalam sejarah modern dan dinilai sebagai yang terbesar sejak erupsi Gunung Pinatubo pada tahun 1991, serta berpotensi menjadi yang paling dahsyat sejak letusan Krakatau tahun 1883 (Otsuka, 2022; Garza-Girón *et al.*, 2023; Davies *et al.*, 2024). Episenter erupsi berada di koordinat 20,54° LS dan 175,38° BB di wilayah Pasifik Selatan. Gelombang ini terekam oleh berbagai barometer yang tersebar secara global. Data diperoleh dari jaringan global stasiun meteorologi (*barograph network*) ASOS yang berada di sekitar episenter erupsi (Gambar 2).

B. Mekanisme Pembangkitan Gelombang Lamb

Sebanyak 15 stasiun cuaca yang terletak di timur laut Gunung Hunga Tonga (Gambar 2) digunakan dalam penelitian ini untuk merekam variasi perubahan tekanan selama letusan Hunga Tonga 2022. Sebagai representatif dari proses perambatan gelombang Lamb, ditampilkan visualisasi data tekanan barometrik dari stasiun pemantauan sebagai contoh (Gambar 3). Visualisasi barogram variasi tekanan barometrik, seperti ditunjukkan pada Gambar 3 (a-c), memperlihatkan dengan jelas mekanisme pembangkitan gelombang Lamb melalui puncak pertama yang mewakili kedatangan gelombang, dan puncak kedua yang mewakili gelombang balik dari antipodal pada setiap *waveform* dari ketiga stasiun pemantauan.



(a)



(b)



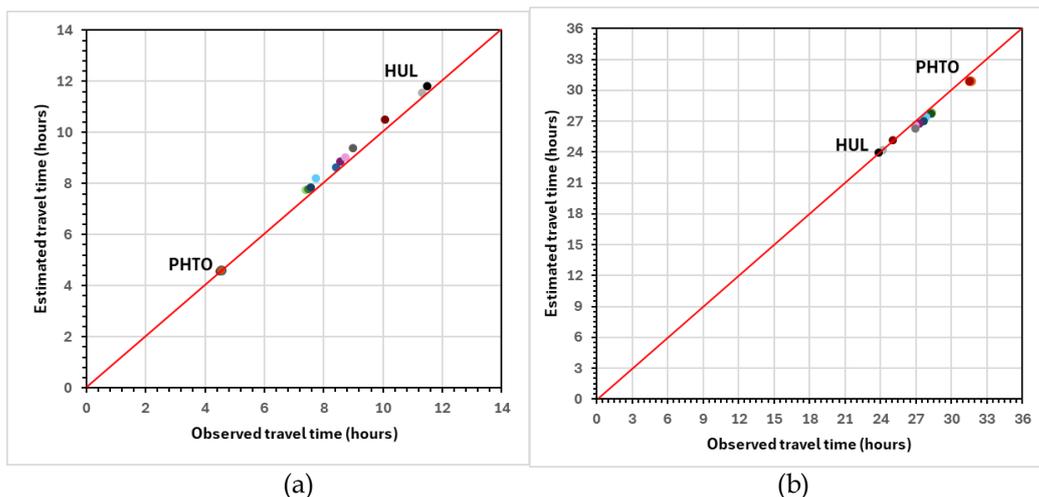
(c)

Gambar 3. Barogram variasi tekanan barometrik yang direkam oleh tiga stasiun pemantau cuaca: (a) PHTO; (b) TUS dan (c) HUL.

Berdasarkan data tekanan dari beberapa stasiun, bentuk gelombang yang diterima menunjukkan pola khas berbentuk N (*N-shape*) mencerminkan perubahan tekanan yang cepat dan relatif simetris, sebagaimana juga dilaporkan dalam penelitian sebelumnya (Lynett *et al.*, 2022; Jarvis *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023). Barogram dari stasiun PHTO di Hilo, Hawaii (4999,53 km dari sumber) menunjukkan lonjakan tekanan signifikan sekitar pukul 08:45 UTC, menandai kedatangan pertama gelombang Lamb sekitar 4,5 jam setelah letusan. Amplitudo yang cukup besar dan pola osilasi yang jelas menunjukkan gelombang masih membawa energi kuat meskipun telah merambat hampir 5000 km. Stasiun TUS di Tucson, Arizona (9022,21 km) mencatat kedatangan gelombang sekitar pukul 12:15 UTC. Polanya serupa dengan PHTO, namun amplitudonya lebih kecil, mengindikasikan redaman energi akibat jarak, meskipun bentuk gelombangnya masih terjaga. Di stasiun HUL, Houlton (12988,93 km), gelombang Lamb tiba sekitar pukul 15:45 UTC. Meskipun amplitudonya lebih lemah, gelombang tetap terdeteksi dengan struktur osilasi yang khas, menandakan kemampuan propagasi jarak jauh dengan disipasi energi minimal. Temuan dari ketiga stasiun ini menunjukkan bahwa gelombang Lamb mampu mempertahankan bentuk dan kecepatannya selama lintasan global, membuktikan efisiensinya sebagai mekanisme transfer energi atmosfer yang cepat dan stabil pasca-erupsi eksplosif.

C. Karakteristik Perambatan Gelombang Lamb

Untuk menganalisis karakteristik perambatan gelombang Lamb pasca erupsi Hunga Tonga 2022, digunakan pendekatan komparatif antara data estimasi waktu tempuh (*estimated travel time*) dan data pengamatan langsung di lapangan (*observed travel time*). Gambar 4 menyajikan perbandingan antara waktu tempuh estimasi gelombang Lamb (*estimated travel time*) dan data lapangan secara *real-time* (*observed travel time*), baik saat gelombang Lamb terdeteksi pertama kali (*first arrival*) (Gambar 4a) maupun saat gelombang terekam kembali ke stasiun yang sama (*return arrival*) dari titik balik (*antipode*) (Gambar 4b).



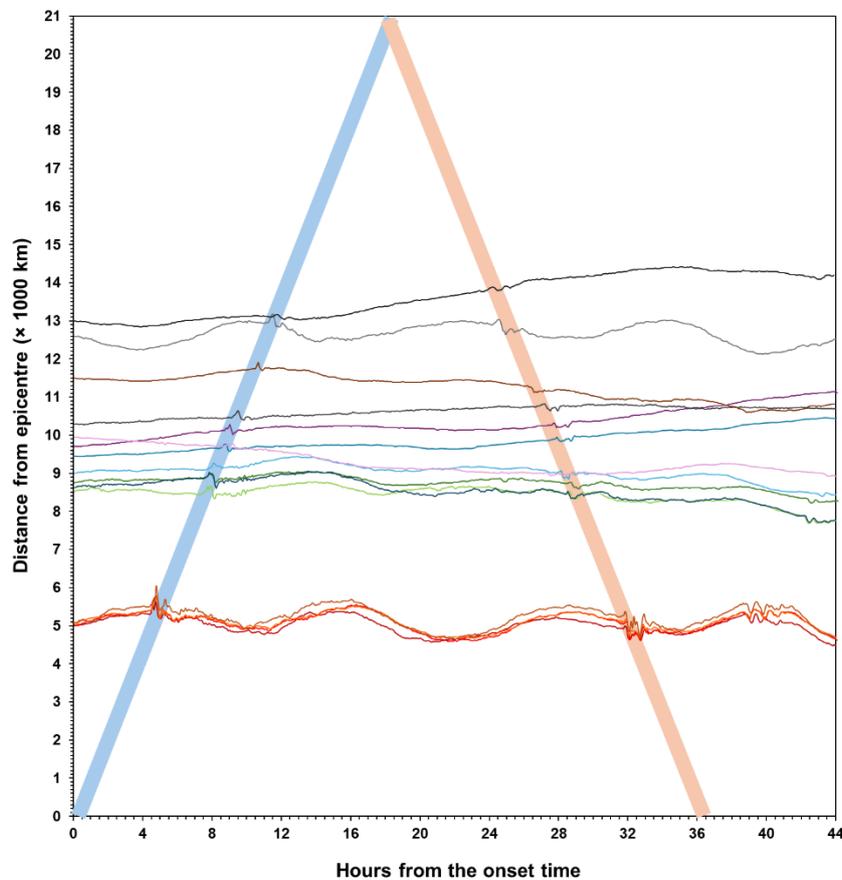
Gambar 4. Grafik *estimated travel time* terhadap *observed travel time* dari gelombang Lamb untuk (a) lintasan pertama dan (b) lintasan baliknya pada kasus erupsi Hunga Tonga, 15 Januari 2022.

Gambar 4a menunjukkan hubungan antara *estimated travel time* dan *observed travel time* untuk propagasi pertama gelombang Lamb, dengan waktu kedatangan yang diamati umumnya lebih cepat dibandingkan dengan hasil estimasi. Hasil ini mengindikasikan bahwa pendekatan estimasi yang digunakan memiliki selisih waktu yang perlu diperhitungkan dalam konteks mitigasi. Sebagai contoh, stasiun PHTO (lingkaran merah tua) mencatat kedatangan gelombang sekitar pukul 08:45 UTC, sedangkan stasiun terjauh HUL (lingkaran hitam) mencatat waktu kedatangan pada 15:45 UTC. Sebaliknya, pada Gambar 4b yang menggambarkan lintasan gelombang balik menunjukkan bahwa gelombang pertama kali tiba di HUL pada pukul 04:10 UTC, dan kemudian mencapai PHTO pada pukul 11:50 UTC di hari yang sama. Secara umum, terdapat kesesuaian yang cukup seimbang antara waktu estimasi dan observasi, meskipun beberapa titik pengamatan menunjukkan waktu estimasi yang sedikit lebih cepat dibandingkan waktu kedatangan aktual.

Variasi waktu kedatangan gelombang antar stasiun mencerminkan bahwa meskipun propagasi gelombang Lamb secara umum dikendalikan oleh dinamika atmosfer berskala global, setiap jalur yang ditempuh menuju masing-masing stasiun tetap dipengaruhi oleh kondisi atmosferik dan geografis lokal yang berbeda-beda. Dengan demikian, faktor lokal seperti struktur angin regional, kelembapan, maupun distribusi tekanan dapat memberikan pengaruh kecil namun cukup untuk menciptakan variasi dalam waktu kedatangan. Ketidakteraturan ini merupakan cerminan dari dinamika atmosfer global yang kompleks, yang meskipun tidak menyebabkan deviasi besar, tetap menimbulkan perbedaan waktu tiba yang tidak seragam antar titik pengamatan. Perbedaan antara waktu estimasi dan observasi ini memiliki implikasi penting dalam upaya mitigasi bencana. Karena waktu observasi kedatangan gelombang Lamb lebih cepat dari waktu estimasi, terutama pada lintasan pertama, maka sistem peringatan dini dapat dirancang untuk merespons lebih awal dari waktu prediksi model, sehingga meningkatkan efektivitas mitigasi dampak yang ditimbulkan. Hal ini selaras dengan dampak dari peristiwa erupsi Krakatau 1883, di mana gangguan atmosfer yang merambat lebih cepat daripada estimasi, menyebabkan gangguan tekanan udara dan cuaca ekstrem di berbagai lokasi (Self and Rampino, 1981; Gabrielson, 2010).

Kedua panel pada Gambar 4 juga menunjukkan bahwa disipasi hanya merupakan sebagian kecil dari total energi selama perambatan, sejalan dengan penelitian sebelumnya (Amores *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023). Selain relevansi dalam konteks mitigasi, karakteristik perambatan gelombang Lamb yang cepat dan minim disipasi juga berdampak dalam konteks perubahan iklim, terutama karena dapat memicu respons atmosfer global. Hal ini diperkuat dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa gelombang Lamb pasca-erupsi Hunga Tonga memengaruhi distribusi tekanan global hingga memengaruhi pola cuaca dalam skala luas, termasuk pemicu resonansi gelombang akibat interaksi laut-udara yang berkontribusi terhadap terjadinya meteo-tsunami (Amores *et al.*, 2022; Lin *et al.*, 2022; Dogan *et al.*, 2023).

D. Karakteristik Perambatan Gelombang Lamb



Gambar 5. Grafik *a series of barograms* yang menunjukkan kedatangan gelombang Lamb pertama (garis lurus berwarna biru) dan gelombang kedua (garis lurus berwarna coklat) yang terdeteksi oleh stasiun ASOS di sekitar Samudera Pasifik. Urutan stasiun dari bawah ke atas merepresentasikan peningkatan jarak dari pusat erupsi Hunga Tonga, sedangkan kemiringan garis mempresentasikan kecepatan propagasi gelombang.

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari analisis hubungan antara jarak dan waktu tempuh, dilakukan estimasi kecepatan gelombang Lamb untuk meninjau karakteristik propagasinya secara global. Visualisasi hasil estimasi tersebut ditunjukkan pada Gambar 5, yang menggambarkan hubungan antara jarak tempuh gelombang dari pusat erupsi (dalam ribuan kilometer) dengan waktu tempuh sejak awal kejadian (dalam jam), sebagaimana direkam oleh beberapa stasiun cuaca ASOS yang tersebar di sekitar Samudra Pasifik. Gambar 5 menampilkan dua garis lurus berwarna biru dan cokelat muda yang merepresentasikan gelombang Lamb pertama (*first arrival*) dan gelombang baliknya (*return wave*). Kedua garis tersebut membentuk pola segitiga yang menunjukkan perambatan simetris menjauhi sumber dan kembali mendekati wilayah sekitar sumber letusan.

Berdasarkan Gambar 5, waktu tempuh gelombang pertama diperkirakan sekitar 18,5 jam, sedangkan gelombang balik mencapai stasiun pengamatan setelah 19 jam untuk jarak tempuh yang sama, yaitu sekitar 21.000 km. Hasil ini sesuai dengan penelitian sebelumnya, dengan metode yang sama, yang menyatakan bahwa waktu tempuh gelombang pertama akan lebih cepat daripada gelombang baliknya (Carvajal *et al.*, 2022; Santellanes *et al.*, 2022; Dalal *et al.*, 2023). Kemiringan dari masing-masing garis pada Gambar 5 merepresentasikan kecepatan propagasi gelombang Lamb, yang dihitung menggunakan pendekatan observasional dengan membagi jarak lintasan terhadap waktu tempuh gelombang yang diperoleh dari data tekanan atmosfer stasiun ASOS. Berdasarkan hasil analisis, diperoleh kecepatan sebesar 1129 km/jam = 314 m/s untuk kedatangan gelombang pertama dan sebesar 1114 km/jam = 310 m/s untuk gelombang baliknya, dengan taraf ketelitian sebesar $\pm 98,27\%$ untuk gelombang pertama dan $\pm 99,05\%$ untuk gelombang kedua.

Pendekatan ini mengasumsikan bahwa dalam skala global, terutama di lapisan troposfer, variasi temperatur atmosfer relatif kecil sehingga kecepatan propagasi dapat dianggap konstan atau tidak banyak mengalami perubahan (Amores *et al.*, 2022; Horváth *et al.*, 2024). Hasil pengamatan Dalal *et al.* (2023) menunjukkan bahwa selama periode investigasi erupsi Hunga Tonga 2022, tidak terdeteksi adanya perubahan signifikan dalam parameter atmosferik seperti suhu atau kelembaban yang dapat memengaruhi tekanan atmosfer. Oleh karena itu, perubahan tekanan barometrik yang diamati dalam penelitian ini diyakini murni berasal dari gangguan atmosfer akibat erupsi, bukan dari fenomena meteorologi lainnya.

Jika dikaji secara teoritis, kecepatan gelombang Lamb ditentukan oleh persamaan c_L (persamaan 1), yang menunjukkan bahwa kecepatan gelombang bergantung pada temperatur atmosfer. Berdasarkan estimasi temperatur atmosfer global yang berkisar antara 240–290 K (Hu *et al.*, 2023; Jarvis *et al.*, 2023), nilai c_L diperkirakan berada dalam rentang 310–341 m/s. Dengan demikian, hasil kecepatan gelombang pada penelitian ini masih berada dalam kisaran nilai teoretis tersebut. Konsistensi ini tidak hanya memperkuat validitas pendekatan observasional yang digunakan, tetapi juga sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang melaporkan kecepatan gelombang Lamb berada pada kisaran 1100–1200 km/jam atau setara dengan 305–330 m/s (Carvajal *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2022; Gusman *et al.*, 2022; Dalal *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023). Karakteristik propagasi cepat dengan disipasi rendah ini serupa dengan catatan gelombang Lamb dari erupsi Krakatau 1883, yang bahkan mengelilingi Bumi beberapa kali (Self & Rampino, 1981; Gabrielson, 2010; Ghent & Crowell, 2022). Dibandingkan dengan erupsi Pinatubo 1991, sinyal barometrik Hunga Tonga tercatat lebih kuat dan menunjukkan interaksi atmosfer-laut yang lebih nyata (Otsuka, 2022; Garza-Girón *et al.*, 2023; Davies *et al.*, 2024). Perbandingan ini memperkuat posisi Hunga Tonga sebagai salah satu peristiwa kunci dalam studi gelombang atmosfer global serta implikasinya terhadap pembangkitan meteo-tsunami.

Perbedaan kecepatan antara gelombang pertama dan gelombang balik dalam penelitian ini tergolong kecil, yakni sekitar 15 km/jam atau 4 m/s. Jika dibandingkan terhadap kecepatan rata-rata keduanya, selisih tersebut hanya sekitar 1,3%, yang menunjukkan perbedaan relatif sangat kecil. Hal ini memperkuat karakteristik gelombang Lamb dengan disipasi energi yang minimal, serta kemampuan untuk mempertahankan kecepatan propagasi secara stabil bahkan setelah menempuh lintasan global dan mengalami refleksi dari titik balik (*antipode*) setelah mengelilingi Bumi (Carvajal *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Dalal *et al.*, 2023; Inchin *et al.*, 2023).

Sejumlah penelitian juga menunjukkan bahwa gelombang Lamb yang dipicu oleh letusan Hunga Tonga dapat menginduksi meteo-tsunami, yaitu gelombang laut yang terbentuk akibat resonansi antara gangguan tekanan atmosfer dan permukaan laut (Kubota *et al.*, 2022; Kulichkov *et al.*, 2022; Nishikawa *et al.*, 2022). Efek resonansi ini memungkinkan terbentuknya gelombang laut dengan kecepatan jauh lebih tinggi dibandingkan tsunami biasa. Beberapa studi melaporkan bahwa meteo-tsunami akibat peristiwa ini menjalar dengan kecepatan antara 300–310 m/s (Santellanes *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023; Ren *et al.*, 2023; Realita *et al.*, 2024). Dalam konteks ini, kecepatan gelombang Lamb yang diestimasi dalam penelitian ini bernilai sedikit lebih besar daripada kisaran kecepatan meteo-tsunami tersebut. Hal ini mendukung argumen bahwa gelombang Lamb merupakan pemicu utama terbentuknya meteo-tsunami melalui mekanisme resonansi gelombang akibat

interaksi laut-udara (Lynett *et al.*, 2022; Omira *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023). Meskipun perbandingan kecepatan bukan fokus utama dalam penelitian ini, hasil tersebut tetap menguatkan posisi gelombang Lamb sebagai pembawa energi besar dalam waktu singkat, yang tidak hanya merambat jauh dengan efisien tetapi juga berperan penting dalam dinamika laut-atmosfer pasca letusan Hunga Tonga.

E. Penerapan dalam Sistem Mitigasi Tsunami Non-Tektonik di Indonesia

Temuan penelitian ini menegaskan perlunya kesiapsiagaan Indonesia terhadap potensi tsunami non-tektonik akibat erupsi bawah laut, khususnya meteo-tsunami yang dipicu gelombang Lamb. Gelombang ini merambat lebih cepat dibandingkan tsunami konvensional sehingga dapat menjadi pemicu melalui resonansi atmosfer-laut. Sistem peringatan dini nasional (InaTEWS) saat ini masih berfokus pada deteksi seismik dan oseanografis, sehingga belum sepenuhnya mengakomodasi ancaman tsunami non-tektonik seperti meteo-tsunami akibat aktivitas vulkanik (Karnawati, 2023). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan propagasi gelombang Lamb yang stabil dengan disipasi energi rendah membuka peluang integrasi jaringan barometer beresolusi tinggi sebagai indikator atmosfer dalam InaTEWS. Penetapan ambang lonjakan tekanan ($\geq 1-3$ hPa) dapat dijadikan pemicu awal yang meningkatkan *lead time* karena sinyal atmosfer sering kali tiba lebih cepat dibandingkan respon laut (Kubota *et al.*, 2022; Lynett *et al.*, 2022). Dengan pendekatan ini, mitigasi dapat dilakukan lebih dini dan efektif. Penelitian lanjutan mengenai perbandingan frekuensi gelombang Lamb dan gelombang laut diperlukan untuk memperkuat pemahaman mekanisme resonansi atmosfer-laut. Upaya ini sejalan dengan kajian pasca-erupsi Hunga Tonga yang menegaskan peran gelombang Lamb dalam pembangkitan meteo-tsunami (Omira *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023).

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Letusan dahsyat akibat erupsi bawah laut Hunga Tonga 2022 menghasilkan gelombang tekanan udara yang menyebar secara radial dan terekam oleh berbagai stasiun cuaca global. Dengan memanfaatkan data barometrik dari jaringan *Automated Surface Observing Systems* (ASOS), gelombang Lamb teridentifikasi melalui barogram yang menunjukkan dua puncak tekanan, masing-masing merepresentasikan kedatangan gelombang dan gelombang baliknya setelah mengelilingi Bumi. Hasil ini memperkuat bukti bahwa gelombang Lamb terbentuk akibat pelepasan energi impulsif dari letusan dan mampu mempertahankan serta amplitudo selama perambatan jarak jauh.

Hasil analisis menunjukkan karakteristik bahwa gelombang Lamb merambat dengan kecepatan rata-rata sekitar $1129 \text{ km/jam} = 314 \text{ m/s}$ pada lintasan pertama dan $1114 \text{ km/jam} = 310 \text{ m/s}$ pada lintasan balik. Nilai ini tidak hanya konsisten dengan teori dan hasil studi sebelumnya, tetapi juga menunjukkan bahwa gelombang mengalami disipasi energi yang sangat rendah selama propagasi global. Kesamaan kecepatan antara lintasan awal dan gelombang balik, dengan selisih hanya sekitar 1,3%, menunjukkan efisiensi propagasi yang tinggi serta kestabilan dinamika atmosfer selama periode tersebut.

B. Saran

Dengan demikian, penelitian ini telah memberikan gambaran umum yang lebih terarah mengenai pembangkitan serta perambatan gelombang Lamb akibat erupsi bawah laut Hunga Tonga 2022, termasuk keterkaitannya dengan potensi munculnya meteo-tsunami. Temuan tersebut diharapkan mampu menjadi landasan awal yang bermanfaat dalam pengembangan sistem peringatan dini tsunami berbasis tekanan atmosfer. Meskipun demikian, analisis yang dilakukan masih memiliki keterbatasan, antara lain distribusi stasiun yang belum merata, resolusi temporal instrumen yang terbatas, serta penggunaan asumsi kecepatan konstan (c_L) yang sesungguhnya dapat dipengaruhi oleh variasi temperatur atmosfer (Dalal *et al.*, 2023; Nishikawa *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Horváth *et al.*, 2024). Faktor meteorologis lokal seperti pola angin maupun tingkat kelembapan juga berpotensi menimbulkan perbedaan kecil pada waktu kedatangan gelombang. Penyempurnaan di masa mendatang dapat dilakukan melalui penambahan jaringan stasiun di kawasan Pasifik Selatan dan Indonesia, sinkronisasi waktu berbasis GNSS, pemanfaatan data reanalisis atmosfer, serta penerapan teknik array processing agar deteksi kedatangan gelombang menjadi lebih objektif. Dengan demikian, hasil penelitian ini membuka peluang bagi kajian lanjutan mengenai mekanisme interaksi atmosfer-laut dan pengaruh faktor atmosferik lainnya terhadap propagasi gelombang Lamb dalam konteks mitigasi bencana di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, D. 2022. Tonga volcano eruption created puzzling ripples in Earth's atmosphere. *Nature*, Vol. 601, pp. 497.
- Amores, A., Monserrat, S., Marcos, M., Argüeso, D., Villalonga, J., Jorda, G. and Gomis, D. 2022. Numerical simulation of atmospheric Lamb waves generated by the 2022 Hunga-Tonga volcanic eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 6, e2022GL098240.
- Astafyeva, E., Maletkii, B., Mikesell, T.D., Munaibari, E., Ravanelli, M., Coisson, P., Manta, F. and Rolland, L.M. 2022. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 10, e2022GL098827.
- 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.
- Chen, C-H., Zhang, X., Sun, Y-Y., Wang, F., Liu, T-C., Lin, C-Y., Gao, Y., Lyu, J., Jin, X., Zhao, X., Cheng, X., Zhang, P., Chen, Q., Zhang, D., Mao, Z. and Liu, J-Y. 2022. Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*, Vol. 14, Issue 9, No. 2179.
- Dalal, P., Kundu, B., Panda, J. and Jin, S. 2023. Atmospheric Lamb wave pulse and volcanic explosivity index following the 2022 Hunga Tonga (South Pacific) eruption. *Frontiers in Earth Science*, Vol. 10.
- Davies, G., Wilson, K., Hague, B., Greenslade, D., Metters, D., Boswood, P., Maddox, S., Dakin, S.K., Palmer, K., Galton-Fenzi, B., French, J. and Kain, C. 2024. Australian atmospheric pressure and sea level data during the 2022 Hunga-Tonga Hunga-Ha'apai volcano tsunami. *Scientific Data*, Vol. 11, No. 114.
- Díaz, J.S. and Rigby, S.E. 2022. Energetic output of the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcanic eruption from pressure measurements. *Shock Waves*, Vol. 32, pp. 553-561.
- Duncombe, J. 2022. The surprising reach of Tonga's giant atmospheric waves. *EOS Transaction American Geophysical Union*, Vol. 103.
- 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.
- Gabrielson, T.B. 2010. Krakatao and The Royal Society: The Krakatoa Explosion of 1883. *Acoustics Today*, Vol. 6, Issue 2, pp. 14–19.
- Garza-Girón, R., Lay, T., Pollitz, F., Kanamori, H. and Rivera, L. 2023. Solid Earth–atmosphere interaction forces during the 15 January 2022 Tonga eruption. *Science Advances*, Vol. 9, No. 2.
- 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 Letters*, Vol. 49, Issue 20.
- Gusman, A.R., Roger, J., Noble, C., Wang, X., Power, W. and Burbidge, D. 2022. The 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano air-wave generated tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 179, Issue 10, pp. 3511-3525.
- Heki, H. 2024. Atmospheric resonant oscillations by the 2022 January 15 eruption of the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcano from GNSS-TEC observations, *Geophysical Journal International*, Vol. 236, pp. 1840-1847.
- Ho, T-C., Mori, N. and Yamada, M. 2023. Ocean gravity waves generated by the meteo-tsunami at the Japan Trench following the 2022 Tonga volcanic eruption. *Earth, Planets and Space*, Vol. 75, No. 25.
- Horváth, Á., Vadas, S.L., Stephen C.C. and Buehler S.A. 2024. One-minute resolution GOES-R observations of Lamb and gravity waves from the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai eruption. *Geophysical Research Letters*, Vol. 129, e2023JD039329.
- 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.
- Inchin, P., Bhatt, A., Cummer, S., Eckermann, S.D., Harding, B., Kuhl, D.D., Ma, J., Makela, J., Sabatini, R. and Snively, J. 2023. Multi-Layer Evolution of Acoustic-Gravity Waves and Ionospheric Disturbances Over the United States After the 2022 Hunga Tonga Volcano Eruption. *AGU Advances*, 4, e2023AV000870.
- Jarvis, P. A., Caldwell, T. G., Noble, C., Ogawa, Y. and Vagasky, C. 2023. Volcanic lightning reveals umbrella cloud dynamics of the 15 January 2022 Hunga volcano eruption, Tonga. *Bulletin of Volcanology*, Vol. 86, Issue 6, No. 54.
- Karnawati, D. 2023. *Tsunami di Indonesia: Karakteristik, tantangan, dan upaya mitigasi*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- 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.
- Kulichkov, S., Chunchuzov, I., Popov, O., Gorchakov, G., Mishenin, A.A., Perepelkin, V., Bush, G.A., Skorokhod, A., Vinogradov, Y., Semutnikova, E., Šepić, J., Medvedev, I., Gushchin, R.A., Kopeikin, V., Belikov, I., Gubanova, D., Karpov, A. and Tikhonov, A. 2022. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 179, pp. 1533–1548.
- Li, Q., Xu, J., Gusman, A.R., Liu, H., Yuan, W. and Liu, W. 2023. Upper atmosphere responses to the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcanic eruption via acoustic-gravity waves and air-sea interaction. *EGU Sphere* (preprint).

- Lin, J-T., Rajesh, P.K., Lin, C.C.H., Chou, M-Y., Liu, J-Y., Yue, J., Hsiao, T-Y., Tsai, H-F., Chao, H-M. and Kung, M-M. 2022. Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave in the Northern Hemisphere After Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 8, e2022GL098222.
- Liu, X., Xu, J., Yue, J. and Kogure, M. 2022. Strong gravity waves associated with Tonga volcano eruption revealed by SABER observations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, Issue 10, e2022GL098339.
- Lynett, P., McCann, M., Zhou, Z., Renteria, W., Borrero, J., Greer, D., Fa'anunu, O., Bosserelle, C., Jaffe, B., Selle, S.L., Ritchle, 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.
- Nishida, K., Kobayashi, N. and Fukao, Y. 2014. Background Lamb waves in the Earth's atmosphere. *Geophysical Journal International*, Vol. 196, pp. 312-316.
- Nishikawa, Y., Yamamoto, M., Nakajima, K., Hamama, I., Saito, H., Kakinami, Y., Yamada, M. and Ho T-C. 2022. Observation and simulation of atmospheric gravity waves exciting subsequent tsunami along the coastline of Japan after Tonga explosion event. *Scientific Reports*, Vol. 12, No. 22354.
- 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.
- Otsuka, S. 2022. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophysical Research Letters*, Vol. 49, No. 8.
- Pakoksung, K., Hayashi, H., Yamanaka, Y. and Ohta, Y. 2023. Numerical study of the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai 2022 volcanic eruption and its associated atmospheric pressure and sea level disturbances. *Progress in Earth and Planetary Science*, Vol. 10, Issue 1, No. 58.
- Pekin, M.A., Özgün, B., Işık, A.G., Sert, M., Armutlu, S. and Dündar, C. 2023. Effect of Hunga Tonga–Hunga Ha'apai volcanic eruptions on atmospheric pressure. *Turkish Journal of Geographical Sciences*, Vol. 21, No. 1, pp. 36-48.
- Realita, A., Fahmi, M.N., Prastowo, T., Tika, N.M.A.S.M. and Madlazim. 2024. On the 2022 Hunga Tonga–Hunga Ha'apai meteo-tsunami: Accelerated propagation due to atmospheric effects. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2900, No. 012047.
- 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*, Vol. 180, pp. 1861-1875.
- Self, S. and Rampino, M. R. 1981. The 1883 eruption of Krakatau. *Nature*, Vol. 294, Issue 5843, pp. 699–704.
- Sepúlveda, I., Carvajal, M. and Agnew, D.C. 2023. Global winds shape planetary-scale Lamb waves. *Geophysical Research Letters*, Vol. 50, Issue 19, e2023GL106097.
- Shrivastava, M.N., Sunil, A.S., Maurya A.K., Aguilera, F., Orrego, S., Sunil P.S., Cienfuegos, R. and Moreno, M. 2023. Tracking tsunami propagation and Island's collapse after the Hunga Tonga–Hunga Ha'apai 2022 volcanic eruption from multi-space observations. *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 20109.
- Shinagawa, H. and Miyoshi, Y. 2024. Simulation study of atmosphere–ionosphere variations driven by the eruption of Hunga Tonga–Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Earth, Planets and Space*, Vol. 76, No. 15.
- 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.
- Watanabe, S., Hamilton, K., Sakazaki, T. and Nakano, M. 2022. First detection of the Pekeris internal global atmospheric resonance: evidence from the 2022 Tonga eruption and from global reanalysis data. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. 79, Issue 11, pp. 3027-3043.
- Wright, C.J., Hindley, N.P., Alexander, M.J., Barlow, M., Hoffmann, L., Mitchell, C.N., Prata, F., Bouillon, M., Carstens, J., Clerbaux, C., Osprey, S.M., Powell, N., Randall, C.E. and Yue, J. 2022. Surface-to-space atmospheric waves from Hunga Tonga–Hunga Ha'apai eruption. *Nature*, Vol. 609, No. 7928, pp. 741-746.