

ANALISIS ATENUASI MAXIMUM TSUNAMI AMPLITUDE DAN ENERGY DECAY TIME UNTUK TSUNAMI LINTAS SAMUDERA PASIFIK

¹⁾ Dwi Maulidia, ²⁾Tjipto Prastowo

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: dwi.19037@mhs.unesa.ac.id

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

Abstrak

Saat merambat di laut lepas, tsunami mengalami pelemahan energi yang terukur sebagai pelemahan amplitudo maksimum. Dalam hal ini, evolusi amplitudo maksimum bisa digunakan untuk menentukan *energy decay time* yang didefinisikan sebagai waktu dari saat pembangkitan tsunami sampai saat tsunami tidak lagi mendapat pasokan energi dari sumber. Grafik atenuasi amplitudo maksimum untuk ketujuh kasus tsunami dalam penelitian ini (Samoa 2009; Maule, Chili 2010; Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014; Illapel, Chili 2015; Chiapas, Mexico 2017 dan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH), Tonga 2022) menunjukkan pelemahan amplitudo maksimum melalui dua fase. Fase pertama ditandai pelemahan amplitudo maksimum secara cepat terhadap jarak dan waktu tempuh dalam pengamatan medan dekat (3200 km). Fase kedua ditandai amplitudo maksimum yang relatif konstan dalam pengamatan medan jauh (> 3200 km). Penentuan *energy decay time* ketujuh kasus telah mempertimbangkan sebaran energi gelombang tsunami dalam perimeter Samudera Pasifik. Untuk kasus Maule, Chili 2010; Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014 dan Illapel, Chili 2015, *energy decay time* adalah 22,5 jam tidak berbeda jauh dari temuan terdahulu. Untuk kasus Samoa 2009, *energy decay time* adalah 16,36 jam tidak berbeda jauh dari temuan terdahulu pada kasus yang sama dan untuk *volcanic tsunami* (HTHH, Tonga 2022), *energy decay time* adalah 14,46 jam, indikasi serapan internal yang dipicu oleh distribusi frekuensi tsunami. Untuk kasus Chiapas, Mexico 2017, *energy decay time* hanya 9,23 jam, indikasi *large power dissipation* karena serapan eksternal oleh *continental shelves* dekat episenter gempa.

Kata Kunci: *maximum tsunami amplitude, jarak dan waktu tempuh, energy decay time*

Abstract

When propagating at sea, a tsunami experiences energy attenuation measured as maximum amplitude reduction used to determine energy decay time defined as the time taken from tsunami generation to a time when the wave no longer gets energy supply from the source. Graphs of the amplitude reduction for seven cases in this study (2009 Samoa; 2010 Maule, Chile; 2011 Tohoku, Japan; 2014 Iquique, Chile; 2015 Illapel, Chile; 2017 Chiapas, Mexico and 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH, Tonga) showed systematically attenuated maximum amplitude through two phases. The first phase was characterized by rapid attenuation of the amplitude with respect to travel distance and time in near-field observations (3200 km). The second one was characterized by a relatively constant maximum amplitude in far-field observations (> 3200 km). Energy decay time determination has considered tsunami energy distribution in the Pacific perimeter. For the case of the 2010 Maule, Chile; 2011 Tohoku, Japan; 2014 Iquique, Chile and 2015 Illapel, Chile, mean decay time was 22.5 hours, slightly different from previous finding. For the 2009 Samoa, the decay time was 16.36 hours, slightly different from previous finding for the same case while for a volcanic tsunami (HTHH, Tonga 2022), the decay time was 14.46 hours, indicating internal absorption due to frequency distribution. For the 2017 Chiapas, Mexico, the decay time was only 9.23 hours, showing large power dissipation due to external factors, such as continental shelves near the epicenter.

Keywords: *maximum tsunami amplitude, travel distance, travel time, energy decay time*

I. PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Tsunami adalah bencana kebumiharian yang bisa dipicu oleh berbagai sebab baik sumber tektonik, misalnya gempa atau longsor bawah laut (Tomita, 2016; Pakoksung *et al.*, 2019) maupun sumber non-tektonik, misalnya erupsi gunung api di laut (Syamsidik *et al.*, 2020). Dibandingkan dengan gelombang permukaan laut yang dipengaruhi oleh angin, tsunami bergerak pada permukaan laut dengan panjang gelombang, periode dan kecepatan perambatan yang jauh lebih besar (Lehfeldt *et al.*, 2007; Ward, 2011; Korolev *et al.*, 2019; Regina and Mohammed, 2021).

Dinamika tsunami bisa dipelajari melalui pembagian zona yang meliputi zona saat tsunami dibangkitkan di laut lepas (zona generasi), zona saat tsunami merambat di laut menuju ke pantai (zona propagasi), dan zona saat tsunami mencapai pantai (zona mitigasi) (Okal, 2019; Kânoğlu *et al.*, 2020; Reid and Mooney, 2022). Zona propagasi penting untuk dipelajari karena zona tersebut mendahului zona mitigasi, di mana tsunami berinteraksi dengan topografi pantai, populasi dan properti di daerah pesisir. Oleh karena itu, penelitian ini fokus pada perambatan tsunami dalam zona propagasi, di mana kecepatan fase tsunami ditentukan oleh kedalaman laut (Inazu and Saito, 2013; Tsai *et al.*, 2013; Pennino, 2018; Regina and Mohammed, 2021).

Saat dibangkitkan melalui mekanisme gempa tektonik bawah laut, tsunami memiliki energi gelombang yang sangat besar. Pada tahap awal perambatan, energi gelombang tsunami tersebut meluruh dengan cepat untuk beberapa waktu (Tang *et al.*, 2012; Korolev *et al.*, 2019) sebelum memasuki fase di mana energi melemah secara gradual. Proses tersebut tidak bisa diamati secara langsung, namun bisa dipelajari melalui pelemahan (atenuasi) amplitudo maksimum tsunami yang dimulai dari lokasi di mana tsunami dibangkitkan sampai pada titik di mana tsunami terdeteksi oleh instrumen ukur di laut (Inazu and Saito, 2013; Allgeyer and Cummins, 2014; Watada *et al.*, 2014).

Pengetahuan tentang atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh bermanfaat untuk estimasi *energy decay time* (Rabinovich *et al.*, 2011; Rabinovich *et al.*, 2013). Pemahaman tentang evolusi energi tsunami adalah aspek penting untuk membangun sistem peringatan dini tsunami yang efektif (Rabinovich *et al.*, 2013). Penelitian terdahulu (Saito *et al.*, 2013; Rabinovich *et al.*, 2013) pada kasus tsunami lintas Samudera Pasifik menemukan bahwa energi tsunami dengan periode gelombang yang kecil lebih cepat meluruh. Dalam hal ini, *decay time* bergantung pada disipasi energi gelombang tsunami (Davies *et al.*, 2020; Izumiya, 2021) sedangkan laju atenuasi energi dan amplitudo gelombang tsunami dipengaruhi oleh *ocean bathymetry* (Rabinovich *et al.*, 2011; Fine *et al.*, 2013; Rabinovich *et al.*, 2013). Dengan memperhatikan semua aspek terkait perambatan gelombang tsunami dalam zona propagasi dan arti penting pengetahuan atenuasi amplitudo maksimum dan *energy decay time* untuk antisipasi kedatangan gelombang tsunami di wilayah pantai, maka penelitian ini penting dilaksanakan dalam konteks upaya pengurangan risiko bencana tsunami.

B. Kecepatan Propagasi Tsunami

Pendekatan yang umum digunakan untuk mendiskripsikan gerak gelombang tsunami di laut lepas adalah *shallow water approximation*. Menurut pendekatan ini (Lehfeldt *et al.*, 2007; Ward, 2011; Inazu and Saito, 2013; Tsai *et al.*, 2013; Watada *et al.*, 2013; Allgeyer and Cummins, 2014; Yonghai and Jiancheng, 2014; Tomita, 2016; Pennino, 2018; Prastowo and Cholifah, 2019), kecepatan rambat gelombang tsunami hanya ditentukan oleh kedalaman laut saja seperti terlihat pada persamaan (1) berikut,

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

dengan g adalah percepatan gravitasi dan D adalah kedalaman laut. Dalam banyak literatur, kedalaman laut diasumsikan antara 4000-5000 m berkorelasi dengan kecepatan tsunami antara 200-220 ms⁻¹ (Santellanes *et al.*, 2022) yang sering digunakan untuk mendiskripsikan kecepatan tsunami di laut lepas.

C. Atenuasi Energi dan Amplitudo Tsunami

Energi gelombang tsunami yang sangat besar pada saat pembangkitan meluruh dengan cepat sebelum memasuki fase di mana energi gelombang tsunami melemah secara gradual oleh karena berbagai faktor (Rabinovich *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Rabinovich *et al.*, 2013; Rashidi *et al.*, 2018; Prastowo and Cholifah, 2019; Davies *et al.*, 2020). Informasi energi total dan disipasinya (energi yang hilang selama perambatan) penting untuk estimasi kekuatan sumber pemicu tsunami (Tang *et al.*, 2012; Rashidi *et al.*, 2018; Izumiya, 2021). Penelitian terdahulu (Rabinovich *et al.*, 2011; Rabinovich *et al.*, 2013; Saito *et al.*, 2013) menyelidiki atenuasi energi tsunami lintas Samudera Pasifik dengan data dari instrumen ukur *Deep-ocean Assessment Reports of Tsunamis* (DART). Energi tsunami ditemukan melemah secara sistematis (Rabinovich *et al.*, 2011; Tang *et al.*,

2012; Rabinovich *et al.*, 2013). Pada kasus gelombang tsunami lintas Samudera Pasifik, pelemahan energi tsunami berlangsung secara eksponensial (Van Dorn, 1984; 1987) sesuai dengan persamaan (2) berikut,

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

di mana E_0 adalah energi tsunami saat awal, δ adalah koefisien atenuasi energi dan t adalah waktu pelemahan perambatan tsunami. Berdasarkan persamaan (2), energi tsunami diprediksi melemah secara eksponensial seiring dengan bertambahnya jarak dan waktu tempuh.

Penelitian terdahulu (Yonghai and Jiancheng, 2014) menyatakan tsunami mampu merambat sejauh belasan ribu kilometer di laut lepas dengan hanya sebagian kecil energi yang hilang. Namun, pengamatan melalui instrumen pemantau yang sensitif dan analisis simulasi gelombang tsunami menunjukkan bahwa tsunami mengalami atenuasi amplitudo seiring dengan bertambahnya jarak dari lokasi episenter (Inazu and Saito, 2013; Allgeyer and Cummins, 2014; Watada *et al.*, 2014; Sun *et al.*, 2018). Berdasarkan teori gelombang, energi dan amplitudo adalah dua besaran yang saling berhubungan. Dengan demikian, atenuasi amplitudo tsunami merupakan indikator atenuasi energi tsunami. Oleh karena itu, pemahaman tentang atenuasi amplitudo terhadap jarak tempuh (*travel distance*) dan waktu tempuh (*travel time*) selama perambatan tsunami dalam zona propagasi merupakan parameter penting untuk mitigasi bencana tsunami (Rabinovich *et al.*, 2011; Glimsdal *et al.*, 2013; Korolev *et al.*, 2019; Gusman *et al.*, 2022).

D. Energy Decay Time

Dalam penelitian ini, *tsunami energy decay time* didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan dari saat pembangkitan (*tsunami onset time*) sampai saat rambatan gelombang tsunami memiliki amplitudo maksimum yang konstan. Dalam praktek, *tsunami onset time* bisa diasumsikan sama dengan *earthquake origin time*. Pemahaman tentang peluruhan energi tsunami adalah penting untuk sistem peringatan dini yang efektif (Rabinovich *et al.*, 2013). Energi tsunami yang hilang saat menemui halangan fisik selama perambatan (efek pantulan gelombang) ditaksir e^{-1} per pantulan (Van Dorn, 1984; 1987). Hasil pengamatan instrumen DART *buoys* dan *tide gauges* di Samudera Pasifik menunjukkan pelemahan amplitudo maksimum tsunami secara eksponensial dengan skala *e-folding time* sebesar $1 \pm 0,5$ hari setelah tahap awal distribusi energi tsunami ke seluruh bagian perimeter lautan di mana tsunami tersebut dibangkitkan (Rabinovich *et al.*, 2011; Tang *et al.*, 2012; Rabinovich *et al.*, 2013; Davies *et al.*, 2020). Estimasi *e-folding time* tersebut berdasarkan persamaan (2) sedangkan dalam penelitian ini estimasi *e-folding time* diperoleh dari persamaan empirik polinomial yang merepresentasikan persamaan grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap waktu tempuh.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Data penelitian adalah data sekunder dari *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dan *National Geophysical Data Center* (NGDC) yang diolah dengan *spreadsheet* untuk membuat grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh. Estimasi *energy decay time* diperoleh dari persamaan karakteristik grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami. Kasus tsunami yang dibangkitkan oleh gempa besar dengan $M_w > 8.0$ dalam penelitian ini adalah tsunami Samoa 2009; Maule, Chili 2010; Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014; Illapel, Chili 2015; Chiapas, Mexico 2017; dan Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (HTHH), Tonga 2022.

B. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian adalah data sekunder berupa amplitudo maksimum tsunami serta jarak dan waktu tempuh gelombang tsunami dari lokasi episenter yang terekam oleh stasiun pemantau di laut lepas dan dekat pantai yang biasa dikenal sebagai DART *surface buoys* dan *tide gauges*. Data tersebut diperoleh dari laman NOAA Center for Tsunami Research di <https://nctr.pmel.noaa.gov/index.html>. Untuk tujuh tsunami lintas Samudera Pasifik yang dibahas dalam penelitian ini, laman yang dirujuk adalah sebagai berikut:

- <https://nctr.pmel.noaa.gov/samoa20090929/> (Samoa 2009)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/chile20100227/> (Maule, Chili 2010)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/> (Tohoku, Jepang 2011)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/chile20140401/> (Iquique, Chili 2014)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/chile20150916/> (Illapel, Chili 2015)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/mexico20170908/> (Chiapas, Mexico 2017)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/tonga20220115/> (HTHH, Tonga 2022)

Terminologi jarak episentral didefinisikan sebagai jarak tempuh gelombang tsunami dari lokasi episenter tsunami menuju ke stasiun pemantau. Dalam hal ini, lokasi episenter tsunami dapat diasumsikan sama dengan lokasi episenter gempa pemicu tsunami. Perhitungan jarak episentral menggunakan kalkulator *online* <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128> dengan asumsi geometri Bumi adalah bola sempurna dengan jari-jari sebesar 6.378 km. Data masukan untuk perhitungan jarak episentral adalah lokasi geografis episenter tsunami dan stasiun pemantau.

Waktu tempuh perambatan tsunami bisa diperoleh secara langsung dari *tsunami waveform* yang diunduh bebas dari <https://nctr.pmel.noaa.gov/index.html> dengan rincian *link* yang relevan dengan tujuh kasus tsunami besar yang dibahas. Secara teoritis, waktu tempuh tsunami bisa juga diperoleh dari hasil bagi antara jarak episentral dan kecepatan tsunami yang dihitung berdasarkan pendekatan *shallow water*, seperti yang diberikan oleh persamaan (1). Kedalaman dasar Samudera Pasifik diasumsikan 4000-5000 m sehingga diperoleh kecepatan tsunami sebesar 720-800 km/jam (Prastowo and Cholifah, 2019; Santellanes *et al.*, 2022).

C. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data penelitian dilakukan dengan bantuan *spreadsheet* untuk menggambarkan atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh dihitung dari lokasi episenter untuk semua kasus yang ditinjau. Grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh pada tiap-tiap kasus dianalisis untuk mempelajari karakteristik amplitudo tsunami saat merambat di laut lepas. Oleh karena ada tujuh kasus tsunami yang dibahas, maka akan diperoleh tujuh pasang grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami, di mana masing-masing adalah grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap jarak episentral dan grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap waktu tempuh. Nilai *energy decay time* masing-masing kasus tsunami besar yang dibahas diperoleh secara langsung dari persamaan karakteristik grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap waktu tempuh. Persamaan karakteristik tersebut diperoleh dari grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami dengan memilih fungsi polinomial yang memenuhi *the best curve fitting* distribusi data amplitudo maksimum tsunami terhadap waktu tempuh.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Penelitian

Dalam penelitian ini, kedalaman rata-rata laut diasumsikan 4000 m sehingga kecepatan tsunami menurut *shallow water approximation* adalah 720 km/jam (Santellanes *et al.*, 2022). Jarak tempuh gelombang tsunami dihitung dari koordinat geografis episenter gempa pemicu tsunami menuju koordinat geografis lokasi DART atau *tide gauge* dengan bantuan kalkulator *online* di <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128> yang telah mempertimbangkan efek kelengkungan Bumi. Kemudian, waktu tempuh gelombang tsunami dihitung dari hasil bagi antara jarak tempuh dan 720 km/jam.

1. Kasus Tsunami Samoa 2009

Paparan berikut ini mendeskripsikan tsunami Samoa 29 September 2009 yang dibangkitkan oleh gempa berpusat di bawah laut dengan kekuatan M_w 8,1, episenter 15,51° LS dan 172,03° BB serta kedalaman 18 km (Okal *et al.*, 2010). Rincian data (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa DARTs dan *tide gauges* di sepanjang pantai barat Amerika Serikat diberikan pada Tabel 1. Tabel tersebut mendeskripsikan data penelitian kasus Samoa 2009 yang diperoleh dari 8 DARTs dan 6 *tide gauges* yang tersebar di beberapa lokasi mulai dari jangkauan medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

Tabel 1. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Samoa 2009.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	1770000	14,27° LS	170,69° BB	2,5	205,80	0,29
2	51425	9,49° LS	176,24° BB	0,15	809,48	1,12
3	1617433	20,03° LU	155,82° BB	0,22	4340,35	6,03
4	51406	8,48° LS	125,00° BB	0,012	5176,81	7,19
5	52401	19,28° LU	155,76° BT	0,006	5235,55	7,27

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
6	21413	30,55° LU	152,12° BT	0,003	6403,36	8,89
7	46413	48,67° LU	174,60° BT	0,009	7267,24	10,09
8	9410170	32,71° LU	117,17° BB	0,08	7932,86	11,02
9	9443090	48,36° LU	124,61° BB	0,05	8521,63	11,84
10	46407	42,60° LU	128,90° BT	0,018	8838,82	12,28
11	Crescent City	41,75° LU	124,18° BB	0,20	9126,45	12,68
12	Neah Bay	48,37° LU	124,61° BB	0,03	9462,20	13,14
13	32412	17,98° LS	86,39° BB	0,04	10666,84	14,82
14	32401	20,47° LS	73,43° BB	0,02	11838,24	16,44

2. Kasus Tsunami Maule, Chili 2010

Paparan berikut ini mendiskripsikan tsunami Maule, Chili 27 Februari 2010 yang dibangkitkan oleh gempa berpusat di bawah laut dengan kekuatan M_w 8,8, episenter 35,93° LS dan 72,78° BB serta kedalaman sumber 35 km (Fuji and Satake, 2012). Rincian data (posisi garis lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan DARTs dan *tide gauges* diberikan pada Tabel 2 berikut. Tabel tersebut mendiskripsikan data penelitian kasus tsunami Maule, Chili 2010 yang diperoleh dari 6 DARTs dan 7 *tide gauges* yang tersebar di beberapa lokasi mulai dari jangkauan medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

Tabel 2. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Maule, Chili 2010.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	932127F2	33,03° LS	71,62° BB	2,3	329,47	0,46
2	32412	17,98° LS	86,39° BB	0,23	2402,63	3,34
3	32411	4,99° LU	90,65° BB	0,08	4922,18	6,84
4	43412	16,07° LU	107,00° BB	0,09	6818,52	9,47
5	9410170	32,71° LU	117,17° BB	0,29	8927,27	12,40
6	9443090	48,36° LU	124,61° BB	0,19	10692,07	14,85
7	1612340	21,30° LU	157,86° BB	0,25	10971,96	15,24
8	9455090	60,11° LU	149,41° BB	0,25	12747,10	17,70
9	1619910	28,20° LU	177,35° BB	0,28	13048,11	18,12
10	9462620	53,87° LU	166,53° BB	0,13	13396,48	18,60
11	21414	48,95° LU	178,21° BT	0,04	14249,52	19,79
12	52401	19,29° LU	155,77° BT	0,06	14962,31	20,78
13	21419	44,45° LU	155,74° BT	0,05	15867,65	22,04

3. Kasus Tsunami Tohoku, Jepang 2011

Paparan berikut ini mendiskripsikan tsunami Tohoku, Jepang 11 Maret 2011 yang dibangkitkan oleh gempa bawah laut dengan kekuatan M_w 9,0, episenter 38,32° LU dan 142,36° BT serta kedalaman 32 km (Fine *et al.*, 2013). Rincian data numerik (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa DARTs dan *tide gauges* diberikan pada Tabel 3. Tabel 3 mendiskripsikan

data penelitian kasus Tohoku, Jepang 2011 yang diperoleh dari 16 DARTs dan 1 *tide gauge* di beberapa lokasi medan dekat (< 3200 km) dan medan jauh (> 3200 km).

Tabel 3. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Tohoku, Jepang 2011.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	21418	38,71° LU	148,70° BT	1,66	553,81	0,77
2	21401	42,61° LU	152,58° BT	0,48	987,57	1,37
3	21413	30,52° LU	152,12° BT	0,60	1246,42	1,73
4	21419	44,45° LU	155,73° BT	0,39	1306,21	1,81
5	21416	48,04° LU	163,48° BT	0,23	2017,08	2,80
6	21414	48,93° LU	178,25° BT	0,19	3088,34	4,29
7	46408	49,62° LU	169,85° BB	0,16	3955,06	5,49
8	46402	51,06° LU	164,00° BB	0,10	4367,01	6,07
9	52406	5,29° LS	165,00° BT	0,12	5388,49	7,48
10	51407	19,62° LU	156,51° BB	0,16	6189,01	8,60
11	43412	16,03° LU	107,00° BB	0,11	10622,89	14,75
12	51406	8,48° LS	125,03° BB	0,07	10829,50	15,04
13	43413	11,06° LU	99,85° BB	0,05	11564,88	16,06
14	32413	7,40° LS	93,49° BB	0,05	13443,68	18,67
15	32412	17,97° LS	86,39° BB	0,04	14817,37	20,58
16	32401	19,29° LS	74,72° BB	0,03	15886,74	22,06
17	Coquimbo	29,95° LS	71,34° BB	0,05	16815,73	23,35

4. Kasus Tsunami Iquique, Chili 2014

Paparan berikut ini mendiskripsikan tsunami Iquique, Chili 1 April 2014 yang dibangkitkan oleh gempa berpusat di bawah laut dengan kekuatan M_w 8,2, episenter 19,61° LS dan 70,78° BB serta kedalaman 25 km (Heidarzadeh *et al.*, 2014). Rincian data numerik (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa instrumen DARTs dan *tide gauges* dapat dilihat pada Tabel 4. Tabel 4 mendiskripsikan data kasus Iquique, Chili 2014 yang diperoleh dari total 18 instrumen pemantau (13 DARTs dan 5 *tide gauges*) yang tersebar mulai dari jangkauan medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

Tabel 4. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Iquique, Chili 2014.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	Arica	18,47° LS	70,32° BB	1,55	140,07	0,19
2	32401	19,29° LS	74,73° BB	0,35	413,26	0,57
3	32402	26,74° LS	73,98° BB	0,14	854,21	1,19
4	32412	17,99° LS	86,39° BB	0,06	1651,66	2,29
5	32411	4,93° LU	90,65° BB	0,01	3492,89	4,85
6	43413	11,06° LU	99,85° BB	0,02	4670,63	6,49
7	43412	16,07° LU	107,00° BB	0,013	5610,18	7,79
8	9410170	32,71° LU	117,17° BB	0,05	7633,81	10,60
9	46412	32,46° LU	120,57° BB	0,013	7853,03	10,91

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
10	46411	39,35° LU	127,02° BB	0,012	8786,25	12,20
11	51426	23,30° LS	168,29° BB	0,019	9888,01	13,73
12	1611400	21,95° LU	159,35° BB	0,09	10679,30	14,83
13	9455090	60,12° LU	149,42° BB	0,04	11295,03	15,69
14	9462620	53,87° LU	166,54° BB	0,04	12142,89	16,87
15	52406	5,29° LS	165,00° BT	0,014	13327,96	18,51
16	52402	11,87° LU	154,04° BT	0,005	15168,11	21,07
17	21419	38,69° LU	148,77° BT	0,006	15690,65	21,79
18	52405	12,99° LU	132,18° BT	0,005	17474,11	24,27

5. Kasus Tsunami Illapel, Chili 2015

Bagian ini mendiskripsikan kasus tsunami Illapel, Chili 16 September 2015 yang dibangkitkan oleh gempa berpusat di bawah laut dengan kekuatan M_w 8,2, episenter 31,57° LS dan 71,67° BB serta kedalaman 22,4 km (Li *et al.*, 2016). Rincian data numerik (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa instrumen DARTs dan *tide gauges* dapat dilihat pada Tabel 5. Tabel 5 mendiskripsikan data penelitian kasus Illapel 2015 yang diperoleh dari total 15 *tide gauges* yang tersebar di beberapa lokasi mulai dari rentang medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

Tabel 5. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Illapel, Chili 2015.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	932127F2	33,03° LS	71,63° BB	1,98	162,53	0,23
2	Huasco	28,47° LS	71,25° BB	0,78	347,24	0,48
3	Talacahuano	36,69° LS	73,10° BB	1,00	585,38	0,81
4	Paposo	25,01° LS	70,47° BB	0,24	739,34	1,03
5	Pisagua	19,60° LU	70,21° BB	0,18	1340,27	1,86
6	Puerto Madero	14,70° LU	92,43° BB	0,42	5608,62	7,79
7	Manzanillo	19,05° LU	104,33° BB	0,32	6627,68	9,21
8	Valparaiso	30,50° LU	86,49° BB	0,19	7085,11	9,84
9	9410170	32,71° LU	117,17° BB	0,17	8608,04	11,96
10	1617433	20,03° LU	155,82° BB	0,25	10644,88	14,78
11	1611400	21,95° LU	159,35° BB	0,17	11069,41	15,37
12	9459881	55,06° LU	162,32° BB	0,22	12888,30	17,90
13	9462620	53,87° LU	166,53° BB	0,20	13168,70	18,29
14	9461710	52,13° LU	174,10° BT	0,15	14350,19	19,93
15	Hanasaki	43,27° LU	145,57° BT	0,22	16533,69	22,96

6. Kasus Tsunami Chiapas, Mexico 2017

Bagian ini mendiskripsikan tsunami Chiapas, Mexico 8 September 2017 yang dipicu oleh gempa *intraplate* dengan episenter 15,02° LU dan 93,90° BB, berkekuatan M_w 8,2 dan kedalaman 47 km (Ye *et al.*, 2017; Zaytsev *et al.*, 2021). Rincian data numerik (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa DARTs dan *tide gauges* diberikan pada Tabel 6. Tabel 6 mendiskripsikan

data penelitian kasus Chiapas, Mexico 2017 yang diperoleh dari 4 DARTs dan 7 *tide gauges* di beberapa lokasi mulai dari jangkauan medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

Tabel 6. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus Chiapas, Mexico 2014.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	Salina Cruz	16,16° LU	95,20° BB	1,02	201,27	0,28
2	Huatulco	15,75° LU	96,11° BB	0,42	263,77	0,37
3	Puerto Angel	15,50° LU	96,50° BB	0,3	303,57	0,42
4	Acajutla	13,56° LU	89,83° BB	0,52	450,58	0,63
5	43413	10,94° LU	100,03° BB	0,094	824,62	1,15
6	32411	4,97° LU	90,79° BB	0,05	1167,81	1,62
7	Baltra	0,43° LS	90,28° BB	0,16	1765,17	2,45
8	32413	7,42° LS	93,48° BB	0,02	2502,59	3,48
9	Ensenada	31,50° LU	116,37° BB	0,07	2941,01	4,08
10	46412	32,48° LU	120,55° BB	0,0008	3323,21	4,62
11	1612340	21,30° LU	157,86° BB	0,03	6776,95	9,41

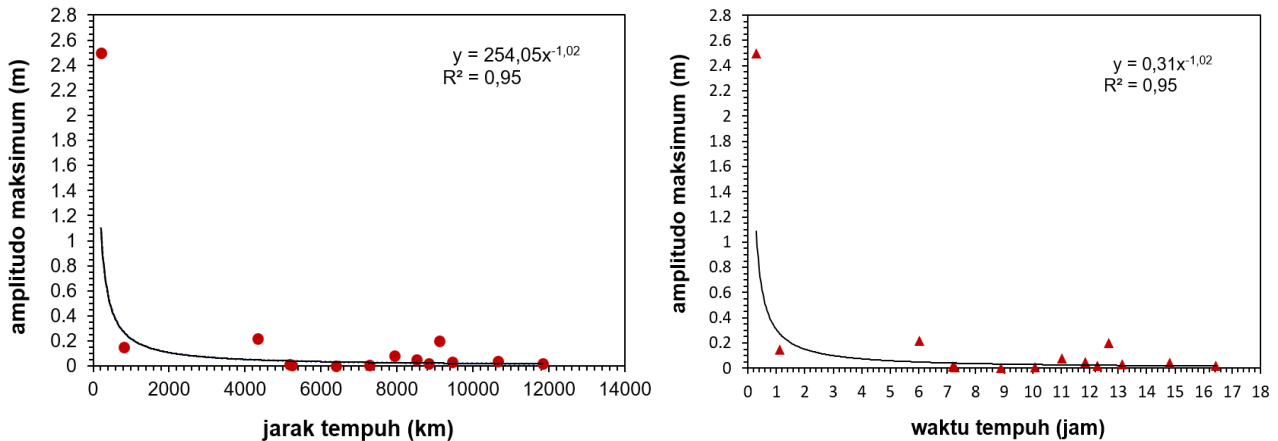
7. Kasus Tsunami HTHH, Tonga 2022

Paparan berikut ini mendiskripsikan tsunami HTHH, Tonga 15 Januari 2022 yang dipicu oleh letusan gunung api bawah laut dengan episenter 20,54° LS dan 175,38° BB (Heidarzadeh *et al.*, 2022). Rincian data numerik (posisi lintang dan bujur, amplitudo maksimum, jarak dan waktu tempuh) yang diasosiasikan dengan beberapa DARTs dan *tide gauges* diberikan pada Tabel 7. Tabel 7 mendiskripsikan data penelitian kasus HTHH, Tonga 2022 yang diperoleh dari 9 DARTs dan 5 *tide gauges* di beberapa lokasi mulai dari jangkauan medan dekat (< 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km).

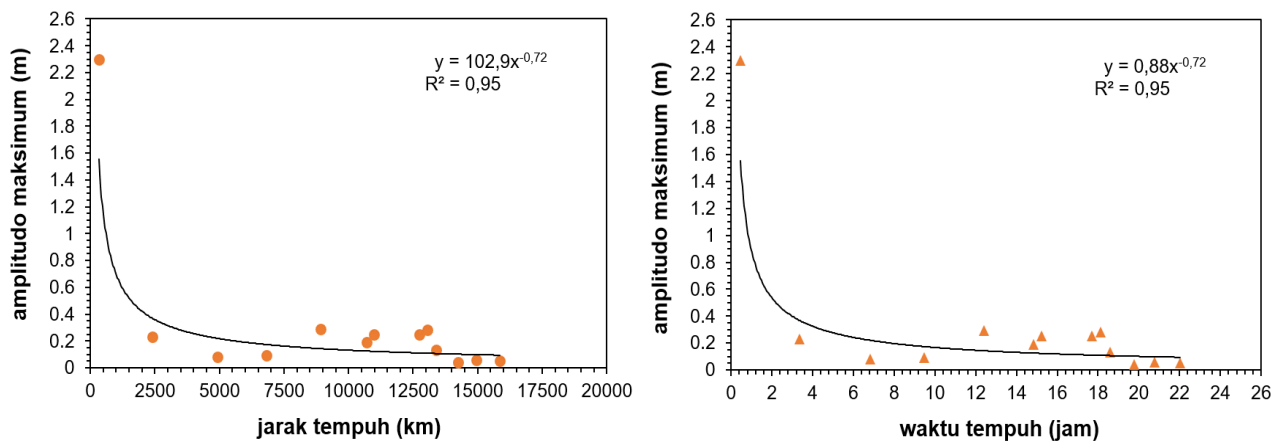
Tabel 7. Data amplitudo tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh untuk kasus HTHH, Tonga 2022.

No	Kode Instrumen	Lintang Instrumen	Bujur Instrumen	Amplitudo Maksimum (m)	Jarak Tempuh (km)	Waktu Tempuh (jam)
1	Nuku'alofa	21,13° LS	175,18° BB	1,23	70	0,10
2	5401003	23,35° LS	173,40° BB	0,21	374	0,52
3	Suva Viti	18,13° LS	178,42° BT	0,33	703	0,98
4	5401002	29,68° LS	175,01° BB	0,11	1017	1,41
5	Fongafale	8,50° LS	179,19° BT	0,12	1458	2,03
6	52406	5,37° LS	164,99° BT	0,05	2706	3,76
7	55023	14,71° LS	153,53° BT	0,036	3350	4,65
8	55015	46,95° LS	160,34° BT	0,03	3663	5,09
9	51407	19,63° LU	156,57° BB	0,02	4909	6,82
10	21416	48,12° LU	163,43° BT	0,04	7721	10,72
11	45407	42,71° LU	128,82° BB	0,05	8489	11,79
12	32413	7,42° LS	93,48° BB	0,027	8874	12,33
13	32411	4,95° LU	90,86° BB	0,015	9626	13,37
14	32401	20,47° LS	73,42° BB	0,021	10378	14,41

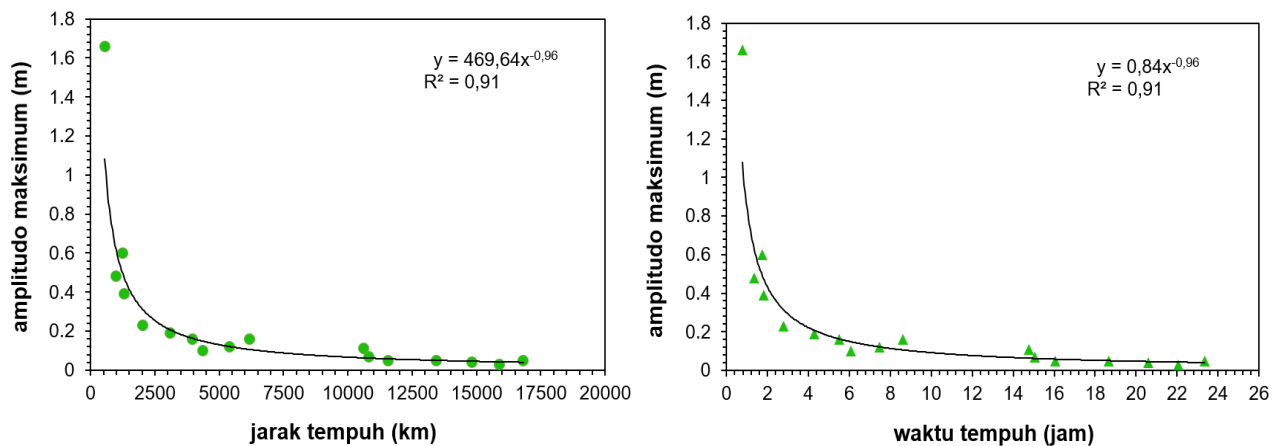
Data amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh pada masing-masing kasus pada Tabel 1 hingga Tabel 7 menunjukkan amplitudo maksimum tsunami melemah secara sistematis seiring dengan bertambahnya jarak dan waktu tempuh dihitung dari lokasi episenter. Berdasarkan data numerik pada seluruh tabel tersebut, dibuat dua grafik terpisah yang mendiskripsikan perilaku amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak dan waktu tempuh berturut-turut untuk kasus tsunami Samoa 2009 (Gambar 1); tsunami Maule, Chili 2010 (Gambar 2); tsunami Tohoku, Jepang 2011 (Gambar 3); tsunami Iquique, Chili 2014 (Gambar 4); tsunami Illapel, Chili 2015 (Gambar 5); tsunami Chiapas, Mexico 2017 (Gambar 6) dan tsunami HTHH, Tonga 2022 (Gambar 7).



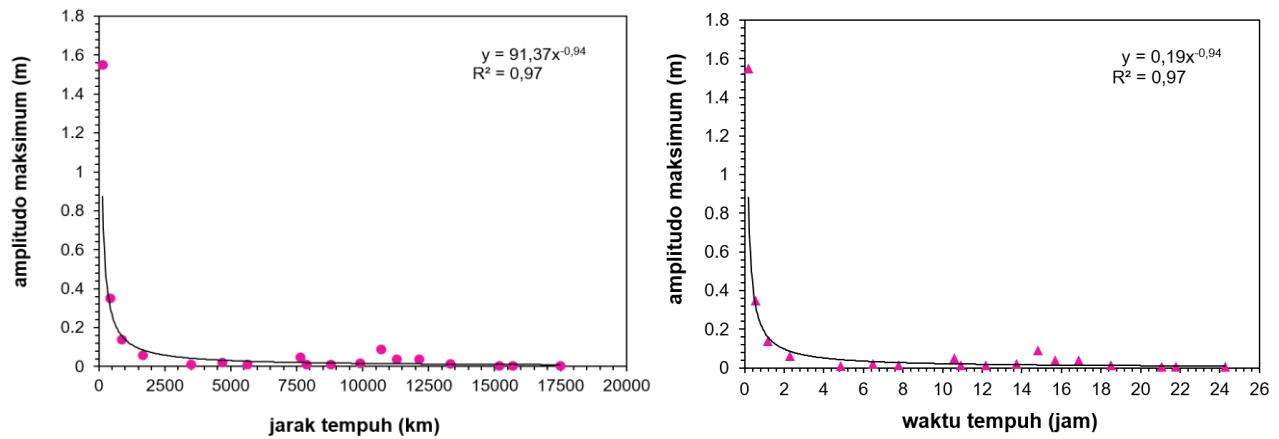
Gambar 1. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Samoa 2009.



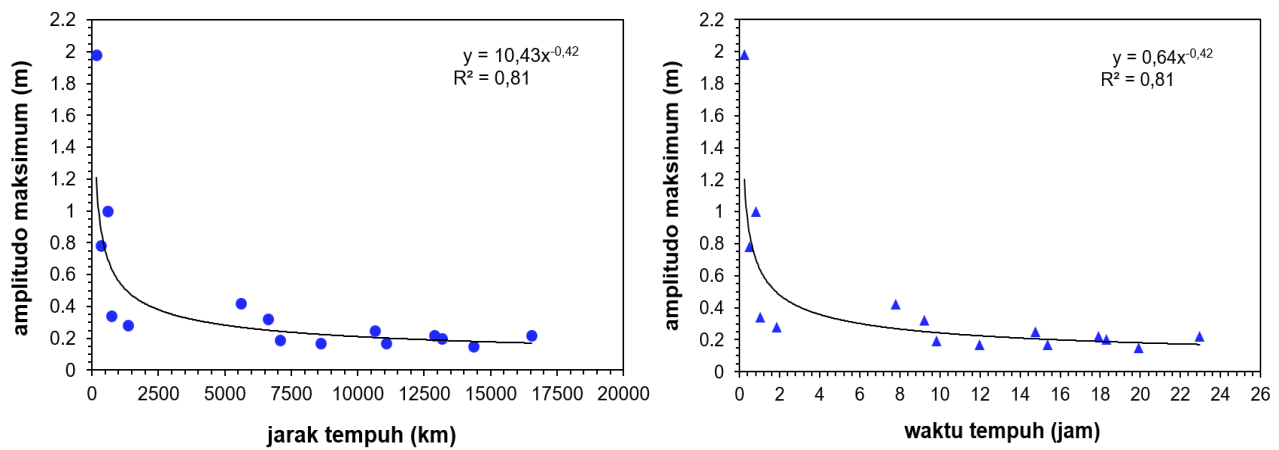
Gambar 2. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Maule, Chili 2010.



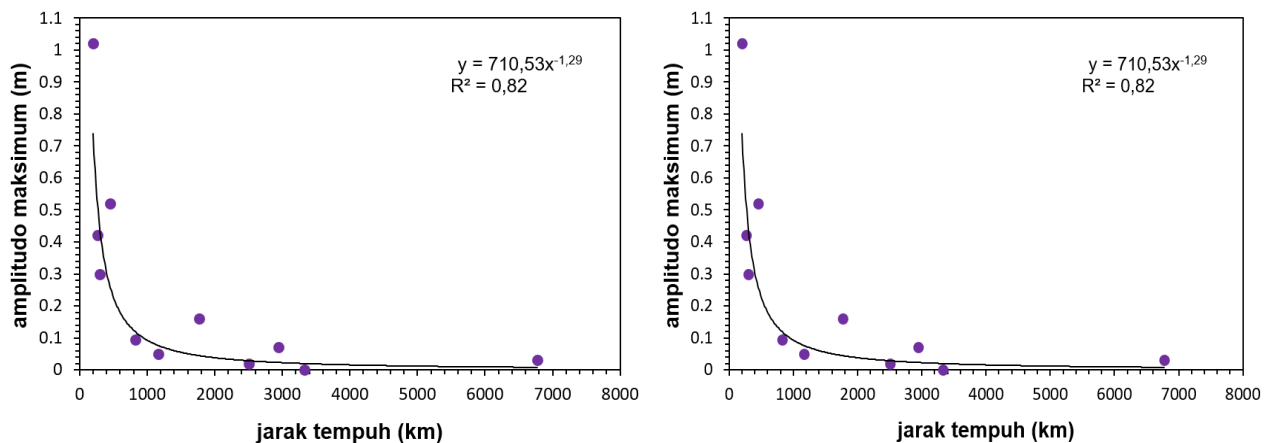
Gambar 3. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Tohoku, Jepang 2011.



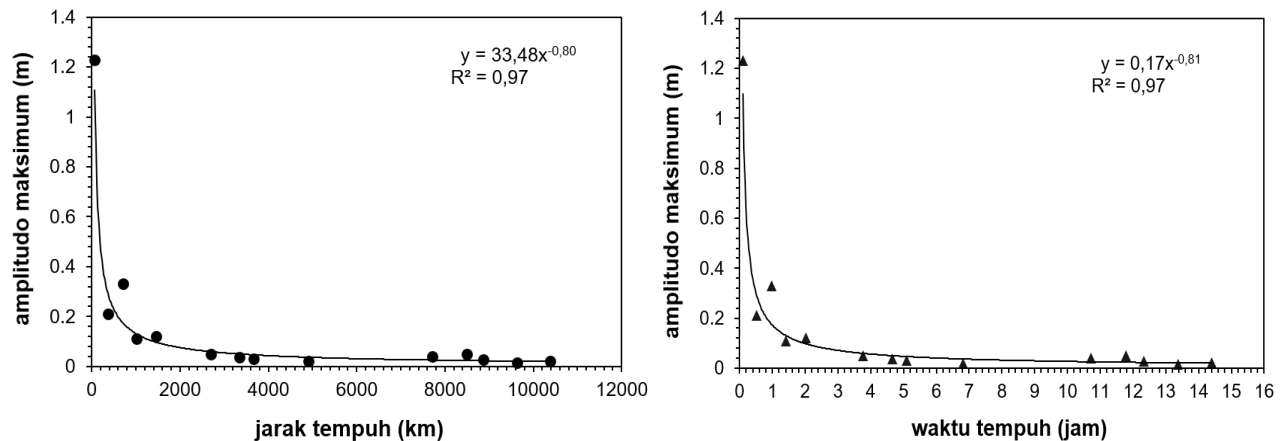
Gambar 4. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Iquique, Chili 2014.



Gambar 5. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Illapel, Chili 2015.



Gambar 6. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus Chiapas, Mexico 2017.



Gambar 7. Grafik atenuasi amplitudo terhadap jarak dan waktu tempuh pada kasus HTHH, Tonga 2022.

B. Pembahasan

Gambar 1 hingga Gambar 7 menunjukkan grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami melemah secara sistematis seiring dengan bertambahnya jarak dan waktu tempuh dihitung dari lokasi episenter pada masing-masing kasus yang ditinjau pada penelitian ini. Pada tahap awal pembangkitan dan perambatan, energi dan amplitudo maksimum tsunami meluruh dengan cepat untuk beberapa saat (Tang *et al.*, 2012; Korolev *et al.*, 2019) sebelum memasuki fase di mana energi dan amplitudo maksimum tsunami melemah secara gradual. Saat fase akhir di mana energi dan amplitudo maksimum tsunami bernilai relatif konstan, *energy decay time* diperkirakan tercapai. Selama perambatan di laut lepas, selain besaran fisis jarak tempuh yang mendiskripsikan sejauh berapa gelombang tsunami telah bergerak diukur dari lokasi episenter, maka besaran fisis lain yang juga penting untuk mendiskripsikan dinamika tsunami adalah waktu tempuh.

Hasil perhitungan *energy decay time* untuk ketujuh kasus tsunami bisa dibagi menjadi tiga kelompok. Kelompok pertama meliputi kasus tsunami Maule, Chili 2010; Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014 dan Illapel, Chili 2015 dengan pertimbangan kasus-kasus ini merupakan tsunami lintas Samudera Pasifik dengan distribusi energi memenuhi *fully ocean basin-wide*. Untuk keempat kasus tsunami ini, perbedaan *decay time* yang diperoleh dari prediksi dan analisis persamaan karakteristik untuk masing-masing kasus tsunami yang ditinjau adalah $\leq 12\%$. Perbedaan *decay time* yang relatif besar untuk kasus tsunami Illapel, Chili 2015 (12%) karena ketersediaan data pengamatan elevasi muka laut yang bisa terkumpul adalah terbatas. Untuk ketiga kasus yang lain dalam kelompok ini, perbedaan *decay time* ditemukan kurang dari 10%.

Tabel 8. Estimasi *energy decay time* dan *corresponding mean decay time* untuk ketujuh kasus tsunami lintas Samudera Pasifik yang dibahas dalam penelitian ini.

No	Kasus Tsunami (gempa pemicu dengan $M_w > 8$ kecuali HTHH, Tonga)	Energy Decay Time		Mean Decay Time (jam)
		Predicted (jam)	Observed (jam)	
1	Samoa 2009	16,44	16,28	16,36
2	Maule, Chili 2010	22,04	20,50	21,27
3	Tohoku, Jepang 2011	23,35	23,84	23,60
4	Iquique, Chili 2014	24,27	22,92	23,60
5	Illapel, Chili 2015	22,96	20,49	21,73
6	Chiapas, Mexico 2017	9,41	9,04	9,23
7	HTHH, Tonga 2022	14,41	14,51	14,46

Tabel 8 memberikan *mean decay time* untuk keempat kasus tsunami dengan cakupan wilayah terdampak yang hampir sama (Pacific Ocean *basin-wide*) sebesar 22,55 jam. Temuan ini tidak berbeda signifikan ($< 10\%$) dari *decay time* sebesar 22 jam (Van Dorn, 1984; 1987) dan 24,65 jam (Rabinovich *et al.*, 2013). Kesesuaian ini diduga berasal dari kesamaan sumber pemicu tsunami, yaitu gempa besar dengan lokasi episenter berada di dekat zona subduksi atau biasa dikenal dengan sebutan gempa *interplate* dan secara kasar kesamaan arah

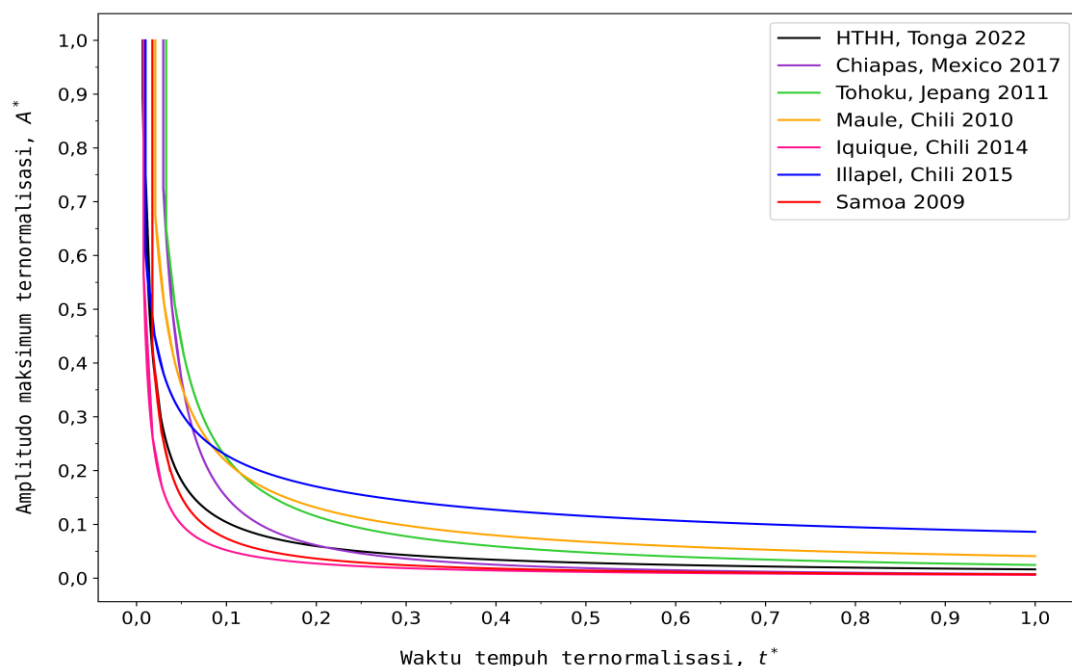
rambat energi tsunami dari bagian timur ke bagian barat Pasifik (Fuji and Satake, 2012; Fine *et al.*, 2013; Heidarzadeh *et al.*, 2014; Gusman *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2016).

Kelompok kedua meliputi kasus Samoa 2009 dan HTHH, Tonga 2022 dengan pertimbangan keduanya merupakan tsunami lintas Samudera Pasifik dengan distribusi energi tsunami yang *not fully basin-wide*. Untuk kelompok ini, perbedaan *decay time* yang diperoleh dari prediksi dan analisis persamaan karakteristik (Gambar 1 dan Gambar 7) $\leq 1\%$ (tidak berbeda signifikan). *Mean decay time* untuk kelompok ini 15,41 jam, berbeda sekitar 11% dari *decay time* sebesar 17,3 jam untuk kasus Samoa 2009 (Rabinovich *et al.*, 2013). Apabila peninjauan kelompok kedua dilakukan terpisah untuk kasus Samoa 2009 dan HTHH, Tonga 2022, maka *mean decay time* kasus Samoa 2009 dalam penelitian ini (16,36 jam) hanya berbeda 5% dari kasus terdahulu yang sama (Rabinovich *et al.*, 2013). Meski berdekatan dengan episenter tsunami Samoa 2009, kasus HTHH 2022 berbeda dalam hal sumber pemicu tsunami. Interaksi laut-udara melahirkan kombinasi gangguan atmosfer skala besar dan erupsi vulkanik yang kemudian memicu gelombang tsunami (Astafyeva *et al.*, 2022; Ghent *et al.*, 2022; Ho *et al.*, 2023; Hu *et al.*, 2023).

Simulasi radiasi gelombang tsunami pada kasus HTHH Tonga, 2022 mengilustrasikan distribusi energi tsunami yang bersifat simetri radial dan cepat mengalami pelemahan (Lynett *et al.*, 2022). Faktor inilah yang menjadi sebab *mean decay time* kasus HTHH, Tonga 2022 hanya 14,46 jam, konsisten dengan kontur (*long wave*) *tsunami travel time* pada Figure 1 kasus yang sama yang dilaporkan oleh Hu *et al.* (2023). Namun demikian, *mean decay time* tersebut jauh lebih kecil dari pengamatan tsunami Samoa 2009 (Rabinovich *et al.*, 2013) yang dipicu oleh sumber tektonik, di mana *decay time* nya adalah 17,3 jam.

Kelompok ketiga adalah kasus tsunami Chiapas, Mexico 2017. Berbeda dengan kelompok pertama yang dipicu oleh gempa *interplate* pada zona subduksi, kasus ini dipicu oleh gempa *intraplate*. Untuk kasus ini, perbedaan *decay time* yang diperoleh dari prediksi dan analisis persamaan karakteristik (Gambar 6) adalah 4% (tidak berbeda signifikan). Tabel 8 memberikan *mean decay time* untuk kedua kasus tersebut, yaitu 9,23 jam. Temuan ini berbeda signifikan dari *energy decay time* sebesar 17,3 jam untuk *not fully basin-wide tsunami* dan 24,65 jam untuk *basin-wide tsunami* (Rabinovich *et al.*, 2013). Alasan mengapa *decay time* kasus Chiapas 2017 jauh lebih kecil dibandingkan dengan kasus Samoa 2009 dan Pacific Ocean *basin-wide tsunamis* adalah karena faktor serapan energi oleh *continental shelves* dan topografi lokal di sekitar episenter gempa pemicu tsunami Chiapas 2017 (Rabinovich *et al.*, 2013; Adriano *et al.*, 2018; Ramírez-Herrera *et al.*, 2018; Zaytsev *et al.*, 2021).

Meskipun diskripsi bahasan *energy decay time* berdasarkan tiga kelompok kasus tsunami yang diturunkan dari Tabel 8 cukup komprehensif, namun perilaku propagasi gelombang tsunami masih belum terungkap. Untuk menjawab hal ini, maka grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap waktu tempuh untuk ketujuh kasus tsunami yang ditinjau dalam penelitian ini digambar dalam satu plot yang sama seperti terlihat pada Gambar 8 berikut.



Gambar 8. Grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap waktu tempuh untuk ketujuh kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dalam penelitian ini.

Secara garis besar, bentuk grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap waktu tempuh menyerupai bentuk *energy decay with time* yang dilaporkan oleh Prastowo and Cholifah (2019). Waktu tempuh ternormalisasi t^* diperoleh dari hasil bagi antara data *travel time* dan nilai *travel time* yang terbesar sebagai acuan sedangkan amplitudo maksimum ternormalisasi A^* diperoleh dari hasil bagi antara data amplitudo maksimum dan nilai amplitudo maksimum yang terbesar sebagai acuan. Kedua perhitungan t^* dan A^* dilakukan untuk seluruh tujuh kasus tsunami agar diperoleh gambaran lengkap tanpa membedakan kasus.

Untuk semua kasus, bentuk ketujuh grafik pada Gambar 8 menceritakan bahwa ada dua fase dinamik perambatan gelombang tsunami, yaitu fase *continual energy supply* dan fase relaksasi dengan transisi terjadi pada $t^* = 0,2$ yang berlaku sama untuk masing-masing *mean decay time* ketujuh kasus. Pada fase pertama, pasokan energi dalam bentuk *available potential energy* (APE) dari *source region* di sekitar episenter berlangsung dalam waktu yang terbatas dari $t^* = 0$ sampai $t^* = 0,2$. Fase ini ditandai dengan penurunan cepat APE dari nilai maksimum $A^* = 1,0$ sampai $A^* < 0,2$. Gambaran dinamika tsunami pada fase ini konsisten dengan diskripsi *energy supply* dan *rapid change in potential energy at early stages* (Tang et al., 2012; Rashidi et al., 2018). Fase ini disebut sebagai *near-field observation* yang berkorelasi dengan waktu tempuh $t = 1,85$ jam yang setara dengan jarak tempuh 1329 km (terpendek) untuk kasus tsunami Chiapas 2017 dan sekitar $t = 4,72$ jam yang setara dengan 3398 km (terjauh) untuk kasus tsunami Tohoku 2011 dan Iquique 2014. Temuan jangkauan terjauh *near-field observation* dalam penelitian ini tidak berbeda jauh dengan batas medan dekat dan medan jauh (~ 3200 km) untuk *two major trans-Pacific tsunamis* (Prastowo and Cholifah, 2019).

Fase kedua (relaksasi) dimulai dari $t^* = 0,2$ sampai $t^* = 1,0$ (Gambar 8) yang ditandai dengan pelepasan APE dalam jumlah yang sangat besar sedemikian sehingga amplitudo maksimum ternormalisasi turun menjadi $A^* < 0,1$ (kecuali kasus Illapel 2015 di mana keterbatasan data yang valid menurunkan keakuratan grafik atenuasi amplitudo). Pada fase ini, gelombang tsunami untuk seluruh kasus mengalami fase di mana amplitudo maksimum berharga hampir konstan dengan kecepatan tsunami terukur sebagai *long wave speed* yang hanya ditentukan oleh kedalaman laut sebagaimana prediksi *shallow water approximation* (Lehfeldt et al., 2007; Ward, 2011; Yonghai and Jiancheng, 2014; Tomita, 2016; Pennino, 2018; Prastowo and Cholifah, 2019; Santallanes et al., 2022). Fase ini disebut sebagai *far-field observation*, masih dalam zona propagasi (*offshore*) sebelum akhirnya gelombang tsunami mendekati pantai (*onshore*), di mana kecepatan tsunami tereduksi akibat pendangkalan pantai (*shoaling effect*) dan memicu amplifikasi amplitudo yang terukur sebagai *run-up* (perhitungan *run-up* di luar konteks penelitian ini).

Dengan segala keterbatasan, penelitian ini bisa menemukan *decay time* tsunami lintas Samudera Pasifik yang bervariasi bergantung pada apakah tsunami memenuhi Pacific Ocean *basin-wide* dan apakah episenter gempa pemicu berada dekat *continental shelves*. Untuk kasus *basin-wide tsunamis*, *decay time* adalah 22,5 jam, konsisten dengan temuan terdahulu (Van Dorn, 1984; 1987; Rabinovich et al., 2013). Untuk kasus *not fully basin-wide tsunami* yang dipicu oleh gempa subduksi (Samoa 2009), *decay time* terukur adalah 16,36 jam, konsisten dengan temuan terdahulu (Rabinovich et al., 2013).

Kasus tsunami HTHH, Tonga 2022 menarik dalam konteks sumber pemicunya bukanlah gempa tektonik baik *interplate* maupun *intraplate* melainkan erupsi vulkanik. Meskipun karakteristik pelemahan amplitudo maksimum mengikuti pola yang sama seperti kasus tsunami yang dipicu oleh gempa tektonik, namun beberapa isu lanjut tentang tsunami HTHH perlu ditindaklanjuti, misalnya sumber pemicu sebenarnya pembangkitan gelombang tsunami: apakah murni karena peristiwa erupsi ataukah kombinasi dari erupsi dan rambatan gelombang kejut pada lapisan ionosfer sehingga tsunami HTHH dikenal sebagai *meteo-tsunami*. Selain sumber pemicu sebenarnya, aspek kinematik perambatan tsunami pada kasus HTHH juga menarik, apakah gelombang tsunami bergerak dengan kecepatan *long wave speed* ataukah tidak. Isu-isu tersebut layak menjadi topik penelitian lanjutan.

IV. KESIMPULAN

Saat merambat dalam zona propagasi, tsunami mengalami pelemahan energi yang terukur sebagai pelemahan amplitudo maksimum. Analisis pelemahan amplitudo maksimum digunakan untuk menentukan *energy decay time* yang dihitung sebagai waktu di mana *energy supply* dari APE *supply* telah hampir habis dan tsunami memasuki fase relaksasi, di mana amplitudo maksimum berharga konstan dengan kecepatan tsunami yang hanya ditentukan oleh kedalaman laut sesuai pendekatan *shallow water*. Penentuan *energy decay time* untuk ketujuh kasus tsunami dalam penelitian ini mempertimbangkan sebaran energi tsunami dalam perimeter Samudera Pasifik. Untuk *ocean basin-wide tsunamis* (Maule, Chili 2010; Tohoku, Jepang 2011; Iquique, Chili 2014 dan Illapel, Chili 2015), *mean decay time* adalah 22,5 jam tidak berbeda signifikan dengan temuan terdahulu (Van Dorn, 1984; 1987; Rabinovich et al., 2013). Untuk *not fully basin-wide* (Samoa 2009), *mean decay*

time adalah 16,36 jam tidak berbeda signifikan dengan temuan terdahulu (Rabinovich *et al.*, 2013) sedangkan untuk kasus *volcanic tsunami* (HTHH, Tonga 2022), *decay time* adalah 14,46 jam, indikasi dari energi tsunami yang mudah terserap karena faktor internal, misalnya distribusi frekuensi atau panjang gelombang tsunami. Untuk kasus Chiapas, Mexico 2017, *decay time* hanya 9,23 jam (jauh menyusut dari kedua kelompok lain), indikasi dari energi tsunami banyak mengalami disipasi daya (*power loss*) karena faktor eksternal, misalnya *continental shelves* yang berada di dekat episenter gempa (Adriano *et al.*, 2018; Ramírez-Herrera *et al.*, 2018; Zaytsev *et al.*, 2021).

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim penulis menyampaikan terimakasih kepada pihak NOAA Center for Tsunami Research atas ketersediaan data sekunder penelitian ini yang diakses secara bebas melalui <https://nctr.pmel.noaa.gov/index.html> dan pihak pengelola <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128> atas ketersediaan teknik perhitungan jarak episentral yang akurat secara online. Terimakasih juga ditujukan kepada dua *reviewers* sekaligus dosen penguji yang telah memberikan masukan bermanfaat terhadap artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriano, B., Fujii, Y., Koshimura, S., Mas, E., Ruiz-Angulo, A. and Estrada, M. 2018. Tsunami source inversion using tide gauge and DART tsunami waveforms of the 2017 M_w 8.2 Mexico earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 175, pp. 35-48.
- Allgeyer, S. and Cummins, P. 2014. Numerical tsunami simulation including elastic loading and seawater density stratification. *Geophysical Research Letter*, Vol. 41, Issue 7, pp. 2368-2375.
- Astafyeva, E., Maletkii, 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.
- 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.
- Fine, I. V., Cherniawsky, J. Y. and Kulikov, E. A. 2013. 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.
- Fuji, Y. and Satake, K. 2012. Slip distribution and seismic moment of the 2010 and 1960 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms and coastal geodetic data. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 170, pp. 1493-1509.
- 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.
- Glimsdal, S., Pedersen, G. K., Harbitz, C. B. and Løvholts, F. 2013. Dispersion of tsunamis: does it really matter? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 13, Issue 6, pp. 1507-1526.
- Gusman, A. R., Murotani, S., Satake, K., Heidarzadeh, M., Gunawan, E., Watada, S. and Schurr, B. 2015. Faults slip distribution of the 2014 Iquique, Chile, earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, Issue 4, pp. 1053-1060.
- 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*.
- Heidarzadeh, M., Satake, K., Murotani, S., Gusman, A. R. and Watada, S. 2014. Deep-water characteristics of the trans-Pacific tsunami from 1 April 2014 M_w 8.2 Iquique, Chile earthquake. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 172, Issue 3-4, pp. 719-730.
- 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 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.
- Izumiya, T. 2021. Time-frequency analysis and decay properties of tsunamis. *Journal of System and Computer Engineering*, Vol. 9, Issue 1, pp. 113-124.
- Kânoğlu, U., Tanioka, Y., Okal, E. A., Baptista, M. A. and Rabinovich, A. B. 2020. Introduction to "Twenty-five years of modern tsunami science following the 1992 Nicaragua and Flores Island tsunamis, volume II". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, Issue 7, pp. 1183-1191.
- Korolev, P. Y., Korolev, Y. P. and Loskutov, A. V. 2019. Analysis of the main characteristics of tsunamis based on data from deep-ocean stations. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 324, No. 012017.
- Lehfeldt, R., Milbradt, P., Plüss, A. and Schüttrumpf. 2007. Propagation of a tsunami-wave in the North Sea. *Die Küste*, Vol. 72, pp. 105-123.
- Li, L., Lay, T., Cheung, K. F. and Ye, L. 2016. Joint modeling of teleseismic and tsunami wave observations to constrain the 16 September 2015 Illapel, Chile, M_w 8.3 earthquake rupture process. *Geophysical Research Letters*, Vol. 43, Issue 9, pp. 4303-4312.
- Okal, E. A., Fritz, H. M., Synolakis, C. E., Borrero, J. C., Weiss, R., Lynett, P. J., Titov, V. V., Foteinis, S., Jaffe, B. E., Liu, P. L. and Chan, I. 2010. Field survey of the Samoa Tsunami of 29 September 2009. *Seismological Research Letters*, Vol. 81, No. 4, pp. 577-591.
- Okal, E. A. 2019. Twenty-five years of progress in the science of "geological" tsunamis following the 1992 Nicaragua and Flores events. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, No. 7, pp. 2771-2793.
- Pakoksung, K., Suppasri, A., Imamura, F., Athanasius, C., Omang, A. and Muhari, A. 2019. Simulation of the submarine landslide tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia using a two-layer model. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, No. 8, pp. 3323-3350.
- 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.
- Pennino, S. 2018. Tsunami Waves. *Undergraduate Journal of Mathematical Modeling: One + Two*. Vol. 8, Issue 2, Article 6, ISSN 2326-3652.
- 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.
- Ramírez-Herrera, M. T., Corona, N., Ruiz-Angulo, A., Melgar, D. and Zavala-Hidalgo, J. The 8 September 2017 tsunami triggered by the M_w 8.2 intraplate earthquake, Chiapas, Mexico. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 175, pp. 25-34.
- Rashidi, A., Shomali, Z. H., Dutykh, D. and Khah, N. K. F. 2018. Evaluation of tsunami wave energy generated by earthquakes in the Makran subduction zone. *Ocean Engineering*, Vol. 165, pp. 131-139.
- Regina, M. Y. and Mohamed, E. S. 2021. Modeling and analysis of tsunami wave propagation characteristics in the coast of Bay of Bengal (in a book entitled [Sentimental Analysis and Deep Learning](#)). *Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol. 1408, pp. 637-652.
- Reid, J. A. and Mooney, W. D. 2022. Tsunami occurrence 1900-2020: A global review, with examples from Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*.
- Saito, T., Inazu, D., Tanaka, S. and Miyoshi, T. 2013. Tsunami coda across the Pacific Ocean following the 2011 Tohoku-oki earthquake. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 103, No. 2B, pp. 1429-1443.
- Santallanes, 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*.
- Syamsidik., Benazir., Luthfi, M., Suppasri., A. and Comfort, L. K. 2020. The 22 December 2018 Mount Anak Krakatau volcanogenic tsunami on Sunda Strait coasts, Indonesia: tsunami and damage characteristics. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 20, Issue 2, pp. 549-565.
- Sun, Y. S., Chen P. F., Chen, C.C., Lee, Y. T., Ma, K. F. and Wu, T. R. 2018. Assessment of the peak tsunami amplitude associated with a large earthquake occurring along the southernmost Ryukyu subduction zone in the region of Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol. 18, Issue 2, pp. 2081-2092.
- Tomita, T. 2016. SATREPS Chile Tsunami Project: Tsunami Basics for Engineering. *Publication Series*, Vol. 3, pp. 1-46.
- 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.
- Van Dorn, W. G. 1984. Some tsunami characteristics deducible from tide records. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 14, pp. 353-363.
- Van Dorn, W. G. 1987. Tide gage response to tsunamis. Part II: Other oceans and smaller seas. *Journal of Physical Oceanography*, Vol. 17, pp. 1507-1516.
- Ward, S. N. 2011. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics: Tsunami*. Edited by Harsh K. Gupta. National Geophysical Research Institute (NGRI). Council 52 of Scientific and Industrial Research (CSIR). Springer Netherlands: Dordrecht, Netherlands, 1473-1492. e-ISBN: 978-90-481-8702-7.
- 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.
- Ye, L., Lay, T., Bai, Y., Cheung, K. F. and Kanamori, H. 2017. The 2017 M_w 8.2 Chiapas, Mexico, earthquake: energetic slab detachment. *Geophysical Research Letters*, Vol. 44, Issue 23, pp. 11824-11832.
- Yonghai, C. and Jiancheng, L. 2014. Extraction of two tsunamis signals generated by earthquakes around the Pacific rim. *Geodesy and Geodynamics*, Vol. 5, No. 2, pp. 38-47.
- Zaytsev, O., Rabinovich, A. B. and Thomson, R. E. 2021. The impact of the Chiapas tsunami of 8 September 2017 on the coast of Mexico. Part 1: observations, statistics, and energy partitioning. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 178, Issue 6, pp. 4291-4323.