

ANALISIS RELASI ANTARA MAGNITUDO MOMEN GEMPA TEKTONIK DAN AMPLITUDO MAKSIMUM TSUNAMI UNTUK KASUS TSUNAMI LINTAS SAMUDERA PASIFIK DAN TSUNAMI INDONESIA

Asiyah Khoiril Bariyah, Tjipto Prastowo

Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: asiyahbariyah16030224026@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Gempa tektonik dan tsunami merupakan bencana kebumiharian paling berbahaya bila dilihat dari dampak kerusakan dan cakupan wilayah terdampak. Meskipun termasuk penting namun sampai saat ini belum banyak penelitian yang menganalisis relasi antara magnitudo momen gempa dan amplitudo maksimum tsunami. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menemukan dan menganalisis persamaan empiris yang mendeskripsikan hubungan antara magnitudo momen gempa M_w dan amplitudo maksimum tsunami η dengan bantuan 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik (Kuril, Rusia 2006, Selandia Baru 2009, Maule, Chili 2010, Tohoku, Jepang 2011, Solomon 2013, Iquique, Chili 2014, dan Illapel, Chili 2015) dan 6 kasus tsunami di Indonesia, (Aceh 2004, Sumatera 2007, Sumatera 2010, Mentawai 2010, Sumatera 2012, dan Sumatera 2016). Data penelitian merupakan data sekunder yang diperoleh dari instrumen ukur pemantau tsunami DART *buoys* dan *tide gauges* yang dapat diakses di https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> yang dikelola dan dikontrol oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dan <http://ptwc.weather.gov/> yang dikelola oleh *Pacific Tsunami Warning Centre* (PTWC). Hasil-hasil penelitian dalam bentuk persamaan empiris relasi antara M_w dan η untuk 7 kasus tsunami trans-Pasifik (*far-field observations*) adalah $M_w = 0,850 \log \eta + 8,941$ sedangkan untuk kasus 6 tsunami di Indonesia (*both near-field and far-field observations*), $M_w = 1,588 \log \eta + 9,880$. Perbedaan faktor pengali fungsi logaritmik $\log \eta$ pada kedua persamaan empiris tersebut karena perbedaan kompleksitas topografi dan batimetri lautan dan variasi perilaku perambatan gelombang tsunami pada *tsunami directivity* yang berbeda antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia. Temuan penting penelitian ini adalah kedua persamaan empiris tersebut menunjukkan bahwa magnitudo momen M_w gempa pemicu tsunami merupakan fungsi logaritmik dari amplitudo maksimum tsunami η yang sesuai dengan temuan penelitian terdahulu.

Kata Kunci: magnitudo momen gempa, amplitudo maksimum tsunami, tsunami trans-Pasifik

Abstract

Tectonic earthquakes and tsunamis are the most dangerous geological hazards considering damaging impacts on living things, human properties, and affected areas. Despite its importance, little is known about a relationship between earthquake moment magnitude and tsunami maximum amplitude. Hence, this study aims to find and analyse empirical equations relating earthquake sizes measured as moment magnitudes M_w to tsunami maximum amplitudes η for cases of 7 trans-Pacific occurrences (the 2006 Kuril, Russian, 2009 New Zealand, 2010 Maule, Chili, 2011 Tohoku, Japan, 2013 Solomon, 2014 Iquique, Chili, and 2015 Illapel, Chili events) and 6 Indonesian tsunamis (the 2004 Indian Ocean, 2007 Sumatera, 2010 Sumatera, 2010 Mentawai, 2012 Sumatera, and 2016 Sumatera events). Data in this study were acquired from field measurements by tsunami monitoring instrument (DART surface buoys and tide gauges) available at https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html and <http://ngdc.noaa.gov> officially operated by the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) and <http://ptwc.weather.gov/> officially managed by the Pacific Tsunami Warning Centre (PTWC). The research results in terms of empirical relations between the moment magnitude M_w and the tsunami maximum amplitude η for 7 trans-Pacific tsunami events at distant observations are then provided by $M_w = 0,850 \log \eta + 8,941$ whereas for the Indonesian tsunamis monitored at both near-field and far-field observations, $M_w = 1,588 \log \eta + 9,880$. The difference in the multiplying factor of the logarithmic function in each equation is due to differences in complexity in the ocean topography and bathymetry between the Pacific and Indian Oceans as well as the nature of tsunami wave propagation for different tsunami directivities in the two Oceans. The findings are such that the moment magnitude scaled with M_w is found to be a logarithmic function of the tsunami maximum amplitude η for both regions of interest, consistent with that of previous work.

Keywords: earthquake moment magnitude, tsunami maximum amplitude, trans-Pacific tsunamis.

PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia berada pada pertemuan lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik yang aktif bergerak relatif satu sama lain. Aktivitas seismo-tektonik yang kompleks dalam lapisan kerak Bumi tersebut menurut Bock *et al.* (2003) memicu pembentukan zona subduksi sepanjang pantai barat Pulau Sumatera dan busur Sunda, *et al.*, 2020), atau kombinasi gempa pada jalur patahan aktif Palu-Koro dan longsor bawah laut, misalnya tsunami Teluk Palu pada tanggal 18 September 2018 (Carvajal *et al.*, 2019; Mikami *et al.*, 2019), atau kasus gempa tektonik pada zona subduksi pantai barat Sumatera yang memicu tsunami Mentawai pada tanggal 25 Oktober 2010 dan tsunami Aceh pada tanggal 26 Desember 2004 (Satake *et al.*, 2012; Satake, 2014).

Namun demikian, tidak satupun penelitian terdahulu tersebut yang menceritakan hubungan antara magnitudo momen gempa tektonik pemicu tsunami dan tinggi gelombang tsunami yang terukur di laut lepas.

Anwar (2019) dan Putri (2019) mengatakan bahwa dinamika tsunami bisa dipelajari melalui 3 zona terkait, yaitu zona generasi, propagasi, dan mitigasi. Penelitian yang menghubungkan zona generasi dan zona propagasi melalui relasi matematis antara magnitudo momen M_w atau momen seismik M_o gempa pemicu tsunami dan tinggi gelombang terukur sebagai amplitudo tsunami η di laut lepas belum begitu banyak. Namun, kedua parameter gempa-tsunami tersebut dipelajari dalam konteks gempa yang memicu perambatan tsunami lintas Samudera Pasifik (Okal *et al.*, 2014; Heidarzadeh *et al.*, 2018).

Tsunami adalah gelombang permukaan laut yang dibangkitkan di laut lepas dan merambat menuju ke pantai. Kecepatan gelombang tsunami dapat dituliskan sebagai

$$c = \sqrt{\frac{g\lambda}{2\pi} \tanh \frac{2\pi H}{\lambda}} \quad (1)$$

Berdasarkan pendekatan *shallow-water* yang menganggap bahwa $H \ll \lambda$, maka $\frac{2\pi H}{\lambda}$ relatif kecil sehingga $\tanh \frac{2\pi H}{\lambda} \approx \frac{2\pi H}{\lambda}$. Oleh karena itu, persamaan (1) berubah menjadi

$$c = \sqrt{gH} \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan (2), perambatan tsunami untuk baik medan dekat dan medan jauh bersifat non-dispersif dengan kecepatan fase yang tidak bergantung pada frekuensi atau panjang gelombang, melainkan pada kedalaman lokal laut. Pendekatan ini disebut dengan long-wave approximation (Charvet *et al.*, 2013; Cholifah and Prastowo, 2017).

Hubungan matematis antara magnitudo momen M_w dan momen seismik M_o menurut Kanamori (1983) adalah sebagai berikut,

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_o - 16,1) \quad (3)$$

berlaku baik untuk *shallow* maupun *deep earthquakes*. Untuk kebutuhan karakterisasi gempa, secara umum magnitudo momen M_w dipilih daripada momen seismik M_o karena M_w merupakan bilangan kecil. Oleh karena itu, sering suatu gempa dilaporkan dengan nilai M_w tertentu.

Dalam konteks pelepasan energi seismik yang besar maka gempa dengan momen seismik yang besar memiliki peluang yang besar sebagai pemicu tsunami. Okal *et al.*

jalur patahan aktif, dan beberapa mikro lempeng yang membatasi wilayah kepulauan Indonesia. Dengan kondisi seperti itu, maka potensi bencana geologi khususnya gempa bumi dan tsunami menjadi ancaman serius bagi hampir seluruh wilayah di Indonesia (Irsyam *et al.*, 2017).

Sumber potensial pembangkit tsunami bisa berasal dari aktivitas vulkanik, misalnya kasus tsunami Selat Sunda 22 Desember 2018 (Giachetti *et al.*, 2012; Heidarzadeh (2014) menurunkan hubungan matematis kualitatif antara parameter gempa, yaitu momen seismik M_o dan amplitudo maksimum tsunami η sebagai berikut,

$$\log \eta = \log M_o - f(\Delta, \Phi) \quad (4)$$

di mana $f(\Delta, \Phi)$ adalah fungsi yang bergantung pada jarak relatif episenter (Δ) menuju stasiun seismik dan posisi azimuth stasiun pemantau (Φ) terhadap episenter tsunami. Okal *et al.* (2014) pada awalnya mendefinisikan η sebagai amplitudo tsunami yang diukur oleh ‘virtual gauges’ yang tersebar di dekat garis pantai (*near-field*), namun akhirnya juga memasukkan rekaman data η untuk posisi *gauges* yang berada jauh dari garis pantai (*far-field*). ‘Virtual gauges’ adalah posisi stasiun pemantau yang bisa diperoleh melalui teknik inversi waktu perambatan balik tsunami dengan efek pendangkalan pantai telah direduksi dalam komputasi.

Dengan melihat relasi matematis antara M_w dan M_o pada persamaan (3) serta η dan M_o pada persamaan (4), Heidarzadeh *et al.* (2018) kemudian menggunakan empat kasus tsunami trans-Pasifik untuk menurunkan persamaan empiris yang menghubungkan M_w dan η sebagai berikut,

$$M_w = 0,665 \log \eta + 8,245 \quad (5)$$

Poin penting persamaan (5) tersebut di atas adalah bahwa M_w merupakan fungsi logaritmik η dengan tambahan faktor konstanta tertentu.

Penelitian ini bertujuan membahas dan menganalisis relasi antara magnitudo momen M_w gempa pemicu tsunami dan amplitudo maksimum tsunami η untuk 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan 6 kasus tsunami Indonesia. Fokus penelitian ini adalah melihat apakah pola perilaku dinamik gempa tektonik pemicu tsunami dan tsunami yang dibangkitkan masih konsisten berlaku untuk beberapa kasus tsunami yang belum dibahas oleh Heidarzadeh *et al.* (2018) dan tsunami di Indonesia.

METODE

Data penelitian ini merupakan data sekunder berupa magnitudo momen M_w gempa tektonik penyebab tsunami, *epicentral distance*, dan amplitudo maksimum tsunami η terkait dengan 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan 6 tsunami Indonesia. Dalam hal ini, tsunami yang dibahas adalah yang dipicu oleh gempa besar dengan $M_w > 7,5$ dan *epicentral distance* yang dimaksud adalah jarak antara episenter tsunami dan lokasi geografis instrumen pemantau *Deep-ocean Assessment Reports of Tsunamis* (DART) *buoy* atau *tide gauge* sebagai instrumen pemantau tsunami yang tersebar di perimeter Samudera Pasifik. Untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik diamati oleh stasiun yang berada dari episenter tsunami, $d \geq 3000$ km (*far-field*) dan kasus tsunami Indonesia dengan memanfaatkan data yang diperoleh dari sumber dekat, $d < 3000$ km (*near-field*) dan sumber jauh.

Data diperoleh dari *tsunami waveforms* yang direkam oleh instrumen ukur pemantau tsunami DART *surface*

buoys dan *tide gauges* yang dapat diakses secara bebas dari laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html disediakan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), <http://ngdc.noaa.gov> dan <http://ptwc.weather.gov/> dikelola oleh *Pacific Tsunami Warning Centre* (PTWC). Data berupa informasi grafis yang dapat dijadikan basis untuk pengumpulan data elevasi muka laut.

Data penelitian yang telah terkumpul awalnya dibuat tabulasi untuk setiap kasus tsunami, baik 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik maupun 6 kasus tsunami Indonesia. Dalam hal ini, jumlah data pada tiap kasus tidak dibatasi karena karakteristik perambatan gelombang tsunami tidak ditentukan dari kuantitas data melainkan kualitas data. Sesudah proses tabulasi selesai, data numerik untuk tiap kasus tsunami dikonversi menjadi grafik yang dianalisis dengan menggunakan aplikasi *Excel* dan hasilnya dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan (Heidarzadeh *et al.*, 2018).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data penelitian yang telah dikumpulkan, berikut ini adalah hasil-hasil penelitian ini dan pembahasan terkait.

Kasus Tsunami Lintas Samudera Pasifik

Tabel 1 berikut memberikan 13 pengamatan untuk tsunami di Kuril, Rusia pada tanggal 15 November 2006 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,3 pada kedalaman 33 km. Data numerik diperoleh dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dikelola oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. Sumber data dapat diakses di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 1. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Kuril, Rusia 2006 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,3.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 46402	163,95° BB	50,98° LU	153,27° BT	46,58° LU	3131	0,020
2	DART 46403	156,96° BB	52,67° LU	153,27° BT	46,58° LU	3578	0,015
3	DART 46409	148,55° BB	55,31° LU	153,27° BT	46,58° LU	4067	0,006
4	DART 46410	143,75° BB	57,63° LU	153,27° BT	46,58° LU	4306	0,002
5	Mokuolo`e	157,79° BB	21,40° LU	153,27° BT	46,58° LU	5200	0,050
6	Port Vila	168,19° BT	17,44° LS	153,27° BT	46,58° LU	7283	0,090
7	Nawiliwili	159,36° BB	21,95° LU	153,27° BT	46,58° LU	5044	0,400
8	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	153,27° BT	46,58° LU	5204	0,190
9	Kahului	156,48° BB	20,90° LU	153,27° BT	46,58° LU	5338	0,800
10	King Cove	162,33° BB	55,06° LU	153,27° BT	46,58° LU	3201	0,180
11	Point Reyes	122,98° BB	38,00° LU	153,27° BT	46,58° LU	6634	0,310
12	Santa Monica	118,50° BB	84,01° LU	153,27° BT	46,58° LU	4850	0,150
13	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	153,27° BT	46,58° LU	5454	0,325

Tabel 2 berikut memberikan 7 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami yang terjadi di Selandia Baru tanggal 15 Juli 2009 yang dibangkitkan oleh gempa

tektonik M_w 7,8 pada kedalaman 33 km. Data numerik berasal dari rekaman *tide gauges* yang dioperasikan oleh NOAA dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. sumber data dapat diakses bebas melalui laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov>.

Tabel 2. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Selandia Baru 2009 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 7,8.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	166,58° BT	45,75° LS	8284	0,030
2	Hilo	155,06° BB	19,73° LU	166,58° BT	45,75° LS	8254	0,040
3	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	166,58° BT	45,75° LS	8249	0,030
4	Nawiliwili	159,36° BB	21,95° LU	166,58° BT	45,75° LS	8285	0,025
5	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	166,58° BT	45,75° LS	11912	0,130
6	San Diego	117,17° BB	32,71° LU	166,58° BT	45,75° LS	11614	0,038
7	Green Island	73,50° BB	40,62° LU	166,58° BT	45,75° LS	15243	0,006

Tabel 3 berikut memberikan 19 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Maule, Chili pada tanggal 27 Februari 2010 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,8 pada kedalaman 55 km. Data numerik berasal dari rekaman *tide gauges* yang dikelola oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. Sumber data dapat diakses secara bebas di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 3. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Maule, Chili 2010 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,8.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	Hilo	155,08° BT	19,73° LU	72,90° BB	36,12° LS	15036	1,00
2	Kahului	156,48° BB	20,90° LU	72,90° BB	36,12° LS	10824	0,98
3	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	72,90° BB	36,12° LS	10968	0,25
4	San Diego	117,17° BB	32,71° LU	72,90° BB	36,12° LS	8941	0,13
5	Los Angeles	118,27° BB	33,72° LU	72,90° BB	36,12° LS	9092	0,40
6	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	72,90° BB	36,12° LS	10118	0,37
7	Kodiak	152,51° BB	57,73° LU	72,90° BB	36,12° LS	12788	0,30
8	Tumaco	78,73° BB	1,83° LU	72,90° BB	36,12° LS	4268	0,12
9	Midway	177,36° BB	28,22° LU	72,90° BB	36,12° LS	13042	0,28
10	Santa Barbara	119,69° BB	34,41° LU	72,90° BB	36,12° LS	9231	0,53
11	Pago Pago	170,69° BB	14,28° LU	72,90° BB	36,12° LS	11640	0,70
12	Sand Point	160,50° BB	55,34° LU	72,90° BB	36,12° LS	13108	0,35
13	Hiva Oa	139,00° BB	9,80° LS	72,90° BB	36,12° LS	7234	1,79
14	Nuku Hiva	140,10° BB	8,90° LS	72,90° BB	36,12° LS	7391	0,95
15	Yakutat	139,73° BB	59,55° LU	72,90° BB	36,12° LS	12280	0,26
16	Hanasaki	145,60° BT	43,30° LU	72,90° BB	36,12° LS	16677	0,82
17	Monterey	121,89° BB	36,61° LU	72,90° BB	36,12° LS	9547	0,32
18	Omaezaki	138,20° BT	34,60° LU	72,90° BB	36,12° LS	15036	0,34

Analisis Relasi antara Magnitudo Momen Gempa Tektonik dan Amplitudo Maksimum Tsunami untuk Kasus Tsunami Litas Samudera Pasifik dan Tsunami Indonesia

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
19	Kawaihae	155,80° BB	20,00° LU	72,90° BB	36,12° LS	10824	0,52

Tabel 4 berikut memberikan 18 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Tohoku, Jepang pada tanggal 11 Maret 2011 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,9 pada kedalaman 10 km. Data numerik diperoleh dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dioperasikan oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis diukur dari titik episenter tsunami. Sumber data η kasus tsunami Tohoku dapat diakses di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 4. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Tohoku, Jepang 2011 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,9.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 21414	178,22° BT	48,97° LU	142,37° BT	38,30° LU	3088	0,20
2	DART 46408	169,90° BB	49,66° LU	142,37° BT	38,30° LU	3952	0,16
3	DART 52403	145,61° BT	4,06° LU	142,37° BT	38,30° LU	3826	0,14
4	DART 46402	163,95° BB	50,98° LU	142,37° BT	38,30° LU	4372	0,25
5	Adak Island	176,63° BB	51,86° LU	142,37° BT	38,30° LU	3499	1,00
6	Hilo	155,10° BB	19,70° LU	142,37° BT	38,30° LU	6306	1,41
7	Talcahuano	73,10° BB	36,68° LS	142,37° BT	38,30° LU	16919	2,20
8	Valparaiso	71,63° BB	33,03° LS	142,37° BT	38,30° LU	16925	1,50
9	King Cove	162,33° BB	55,06° LU	142,37° BT	38,30° LU	4474	0,50
10	Seward	149,43° BB	60,12° LU	142,37° BT	38,30° LU	5227	0,25
11	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	142,37° BT	38,30° LU	5967	0,71
12	Kahului	156,48° BB	20,90° LU	142,37° BT	38,30° LU	6113	1,74
13	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	142,37° BT	38,30° LU	6222	1,22
14	La Push	124,64° BB	47,92° LU	142,37° BT	38,30° LU	7166	0,80
15	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	142,37° BT	38,30° LU	7550	2,02
16	Port San Luis	120,76° BB	35,18° LU	142,37° BT	38,30° LU	8206	1,88
17	Unalaska	166,54° BB	53,88° LU	142,37° BT	38,30° LU	4197	0,40
18	Midway	177,40° BB	28,60° LU	142,37° BT	38,30° LU	3856	1,27
10	Seward	149,43° BB	60,12° LU	142,37° BT	38,30° LU	5227	0,25
11	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	142,37° BT	38,30° LU	5967	0,71
12	Kahului	156,48° BB	20,90° LU	142,37° BT	38,30° LU	6113	1,74
13	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	142,37° BT	38,30° LU	6222	1,22
14	La Push	124,64° BB	47,92° LU	142,37° BT	38,30° LU	7166	0,80
15	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	142,37° BT	38,30° LU	7550	2,02
16	Port San Luis	120,76° BB	35,18° LU	142,37° BT	38,30° LU	8206	1,88
17	Unalaska	166,54° BB	53,88° LU	142,37° BT	38,30° LU	4197	0,40
18	Midway	177,40° BB	28,60° LU	142,37° BT	38,30° LU	3856	1,27

Tabel 5 berikut memberikan 15 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Pulau Solomon pada tanggal 5 Februari 2013 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,0 berpusat pada kedalaman 33 km. Data numerik diperoleh dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dioperasikan oleh NOAA dari berbagai

lokasi geografis diukur dari titik episenter tsunam. Sumber data adalah https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov>.

Tabel 5. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Solomon 2013 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,0.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 52401	155,74° BT	19,29° LU	165,14° BT	10,74° LS	3498	0,0150
2	Kaunalapau	156,90° BB	20,78° LU	165,14° BT	10,74° LS	5437	0,0320
3	Christmas	157,47° BB	1,98° LU	165,14° BT	10,74° LS	4376	0,0370
4	Port Kembla	150,91° BB	34,47° LS	165,14° BT	10,74° LS	3011	0,0750
5	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	165,14° BT	10,74° LS	5393	0,1000
6	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	165,14° BT	10,74° LS	5479	0,1400
7	Sand Island	177,36° BB	28,21° LU	165,14° BT	10,74° LS	4728	0,0800
8	Port San Luis	120,76° BB	35,18° LU	165,14° BT	10,74° LS	9299	0,1500
9	Monterey	121,89° BB	36,61° LU	165,14° BT	10,74° LS	9253	0,0950
10	Toke Point	123,97° BB	46,71° LU	165,14° BT	10,74° LS	9477	0,0350
11	Newport	71,33° BB	41,51° LU	165,14° BT	10,74° LS	13581	0,1100
12	Point Reyes	122,98° BB	37,99° LU	165,14° BT	10,74° LS	9212	0,2000
13	San Fransisco	122,47° BB	37,81° LU	165,14° BT	10,74° LS	9248	0,0650
14	Santa Monica	118,50° BB	34,01° LU	165,14° BT	10,74° LS	9458	0,0850
15	Kodiak	152,51° BB	57,73° LU	165,14° BT	10,74° LS	8538	0,0450

Tabel 6 berikut memberikan 19 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami Iquique, Chili pada tanggal 1 April 2014 yang dibangkitkan gempa M_w 8,2 berpusat pada kedalaman 10 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dikelola oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis diukur dari episenter tsunami. Sumber data dapat diakses bebas di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 6. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Iquique, Chili 2014 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,2.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 51426	168,39° BB	23,11° LS	70,82° BB	19,64° LS	9905	0,1750
2	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	70,82° BB	19,64° LS	8764	0,1420
3	Hilo	155,08° BT	19,73° LU	70,82° BB	19,64° LS	15242	0,5280

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
4	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	70,82° BB	19,64° LS	10510	0,0550
5	Hanasaki	145,58° BB	43,28° LU	70,82° BB	19,64° LS	10339	0,1300
6	Kushiro	144,37° BT	42,98° LU	70,82° BB	19,64° LS	15851	0,1100
7	Honokohau	156,02° BB	19,66° LU	70,82° BB	19,64° LS	10267	0,1010
8	Kahului	156,48° BB	20,90° LU	70,82° BB	19,64° LS	10359	0,4850
9	Los Angeles	135,34° BB	57,05° LU	70,82° BB	19,64° LS	10412	0,0800
10	Sitka	152,51° BB	57,73° LU	70,82° BB	19,64° LS	11378	0,0400
11	Kodiak Island	162,33° BB	55,06° LU	70,82° BB	19,64° LS	11894	0,0700

12	Yakutat	139,73° BB	59,55° LU	70,82° BB	19,64° LS	10773	0,0475
13	Boat Cove	177,90° BB	29,28° LS	70,82° BB	19,64° LS	10510	0,0490
14	Unalaska	166,54° BB	53,88° LU	70,82° BB	19,64° LS	12142	0,0450
15	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	70,82° BB	19,64° LS	10263	0,2500
16	Midway	177,36° BB	28,22° LU	70,82° BB	19,64° LS	12610	0,0930
17	Nawiliwili	159,36° BB	21,95° LU	70,82° BB	19,64° LS	10679	0,0360
18	Toke Point	123,97° BB	46,71° LU	70,82° BB	19,64° LS	9106	0,0170
19	Port Orford	124,50° BB	42,74° LU	70,82° BB	19,64° LS	8854	0,0800

Tabel 7 berikut memberikan 18 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Illapel, Chili pada tanggal 17 September 2015 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,3 pada kedalaman 10 km. Data numerik diperoleh dari rekaman DART buoys dan tide gauges yang dikelola oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. Data diperoleh dari laman yang dapat diakses sebagai di https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

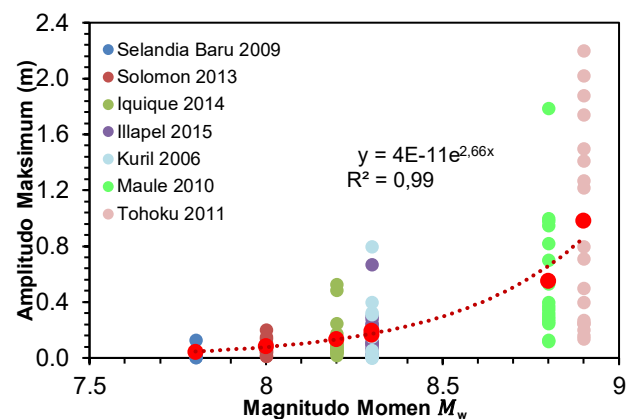
Tabel 7. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Illapel, Chili 2015 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,3.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 46409	148,55° BB	55,31° LU	71,65° BB	31,57° LS	12100	0,015
2	DART 46411	127,07° BB	39,33° LU	71,65° BB	31,57° LS	9749	0,010
3	DART 43413	100,10° BB	10,80° LU	71,65° BB	31,57° LS	5608	0,020
4	DART 32411	90,80° BB	5,00° LU	71,65° BB	31,57° LS	4550	0,030
5	Unalaska	166,54° BB	53,88° LU	71,65° BB	31,57° LS	13109	0,240
6	King Cove	162,33° BB	55,06° LU	71,65° BB	31,57° LS	12889	0,280
7	Kodiak	152,51° BB	57,73° LU	71,65° BB	31,57° LS	12439	0,100
8	Atka	174,17° BB	52,23° LU	71,65° BB	31,57° LS	13559	0,170
9	Sand Point	160,50° BB	55,34° LU	71,65° BB	31,57° LS	12790	0,200
10	Seward	149,43° BB	60,12° LU	71,65° BB	31,57° LS	12396	0,080
11	Honolulu	157,87° BB	21,31° LU	71,65° BB	31,57° LS	10901	0,060
12	Point Reyes	122,98° BB	37,99° LU	71,65° BB	31,57° LS	9397	0,210
13	Kushiro	144,37° BT	42,98° LU	71,65° BB	31,57° LS	16635	0,110
14	Pago Pago	170,69° BB	14,28° LU	71,65° BB	31,57° LS	11689	0,670
15	Crescent	124,18° BB	41,75° LU	71,65° BB	31,57° LS	9775	0,250
17	Nawiliwili	159,36° BB	21,95° LU	71,65° BB	31,57° LS	11070	0,120
18	Kawaihae	155,83° BB	20,04° LU	71,65° BB	31,57° LS	10646	0,300

Untuk mempermudah diskripsi, berikut adalah Tabel 8 yang memberikan ringkasan relasi antara M_w dan η untuk 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik yang dibahas dalam penelitian ini. Meskipun Tabel 8 merupakan ringkasan informasi, namun kehadirannya belum mengungkap secara eksplisit relasi antara M_w dan η untuk 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik. Oleh karena itu, Gambar 1 berikut diberikan agar diskripsi kualitatif relasi antara M_w dan η menjadi jelas.

Tabel 8. Ringkasan data relasi antara M_w dan η untuk 7 tsunami trans-Pasifik.

No	Nama Tsunami	Magnitudo Momen M_w	Rerata Amplitudo Maksimum η (m)
1	Kuril, Rusia 2006	8,3	0,195
2	Selandia Baru 2009	7,8	0,043
3	Maule, Chili 2010	8,8	0,550
4	Tohoku, Jepang 2011	8,9	0,980
5	Solomon 2013	8,0	0,084
6	Iqueque, Chili 2014	8,2	0,133
7	Illapel, Chili 2015	8,3	0,165



Gambar 1. Grafik M_w sebagai fungsi logaritmik η untuk 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik.

Gambar 1 menunjukkan nilai amplitudo maksimum tsunami yang terukur oleh tiap-tiap stasiun pemantau yang direpresentasikan sebagai lingkaran-lingkaran kecil yang memiliki warna sesuai dengan warna pada bagian 'legend' masing-masing kasus tsunami yang dibahas. Misalnya, amplitudo maksimum untuk kasus tsunami Maule 2010 yang direpresentasikan oleh lingkaran-lingkaran berwarna hijau muda. Sedangkan nilai rerata amplitudo maksimum tsunami tiap kasus tsunami pada Tabel 8 direpresentasikan oleh lingkaran-lingkaran berwarna merah. Berdasarkan gambar tersebut, relasi antara magnitudo momen M_w gempa tektonik pemicu tsunami dan rerata amplitudo maksimum tsunami η untuk 7 kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dapat dituliskan sebagai berikut,

$$M_w = 0,866 \log \eta + 9,001 \quad (6)$$

di mana digunakan bantuan konversi $\ln x = 2,303 \log x$.

Grafik yang diperoleh dari data penelitian memiliki koefisien korelasi $R^2 = 0,99$. Koefisien korelasi sebesar itu menunjukkan bahwa ada kesesuaian yang tinggi antara data penelitian ini (merupakan kombinasi data M_w dan η) dan persamaan empiris (6).

Persamaan empiris (6) yang mendiskripsikan relasi antara M_w dan η dalam penelitian skripsi ini tidak berbeda signifikan dengan temuan Heidarzadeh *et al.* (2018) yaitu $M_w = 0,665 \log \eta + 8,245$ untuk kasus trans-Pasifik yang lebih sedikit. Hal ini menunjukkan metodologi penelitian yang dilakukan tidak keliru karena memberikan hasil yang sama dengan penelitian terdahulu (Heidarzadeh *et al.*, 2018). Temuan penting lain adalah magnitudo momen M_w

merupakan fungsi logaritmik dari η (Prastowo *et al.* 2020, *submitted to publication for AIP Conference Proceedings*).

Tampilan data pada Tabel 8 dan Gambar 1 juga menunjukkan bahwa data amplitudo maksimum tsunami tidak bergantung pada jarak episentral. Misalnya, untuk satu kasus tsunami tertentu nilai η yang terukur oleh DART atau *tide gauge* pada stasiun pemantau yang lebih jauh bisa saja memberikan nilai yang lebih besar daripada nilai yang diberikan oleh stasiun pemantau yang lebih dekat dengan episenter. Hal ini menunjukkan bahwa *tsunami directivity* ikut menentukan variasi η terhadap *epicentral distance*. Beberapa penelitian terdahulu mencoba untuk mengungkap faktor yang mempengaruhi variasi η terhadap *epicentral distance*. Misalnya, kompleksitas topografi dan batimetri lokal yang berbeda antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia (Prastowo *et al.*, 2018), *tsunami energy decay* (Rabinovich *et al.*, 2011; Prastowo *et al.*, 2019), dan *energy dissipation in different oceans* (Prastowo *et al.* 2020). Namun demikian, semua faktor dan topik bahasan tersebut di luar konteks penelitian ini.

Kasus Tsunami Indonesia

Tabel 9 berikut memberikan 15 data pengamatan lapangan untuk tsunami Aceh tanggal 26 Desember 2004 yang dipicu gempa tektonik M_w 9,0 pada kedalaman 30 km. Data numerik diperoleh dari rekaman *tide gauges* yang dikelola *United States Geological Survey* (USGS) dari berbagai lokasi geografis diukur dari episenter tsunami yang juga menjadi sumber data dari penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini (Merrifield *et al.*, 2005). Tsunami Aceh 2004 merupakan kasus tsunami di Indonesia yang mendapatkan perhatian luas dari komunitas sains kebencanaan tsunami. Sumber data η kasus tsunami Aceh 2004 diperoleh melalui laman <http://earthquake.usgs.gov/eqinthenews/2004/usslav/>.

Tabel 9. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Aceh 2004 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 9,0.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	Belawan	98,72° BT	3,92° LU	95,98° BT	3,30° LU	312	0,51
2	Sibolga	98,77° BT	1,73° LU	95,98° BT	3,30° LU	356	0,43
3	Cocos Islands	96,90° BT	12,10° LS	95,98° BT	3,30° LU	1717	0,33
4	Panjang	105,27° BT	5,45° LS	95,98° BT	3,30° LU	1420	0,11
6	Prigi	111,73° BT	8,28° LS	95,98° BT	3,30° LU	2172	0,15
7	Hillarys	115,74° BT	31,83° LS	95,98° BT	3,30° LU	4434	0,35
8	Portland	141,61° BT	38,34° LS	95,98° BT	3,30° LU	6591	0,17
9	Dumont D'Urville	140,00° BT	66,67° LS	95,98° BT	3,30° LU	8529	0,06
10	Gan	73,22° BT	0,57° LS	95,98° BT	3,30° LU	2569	0,51
11	Diego Garcia	72,40° BT	7,28° LS	95,98° BT	3,30° LU	2772	0,43
12	Salalah	54,00° BT	17,00° LS	95,98° BT	3,30° LU	2872	0,33
13	Zanzibar	39,18° BT	6,15° LS	95,98° BT	3,30° LU	6160	0,11
14	Richard's Bay	32,08° BT	28,81° LS	95,98° BT	3,30° LU	6401	0,15
15	Port Elizabeth	25,63° BT	33,95° LS	95,98° BT	3,30° LU	7690	0,35

Tabel 10 berikut memberikan 14 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Sumatera pada tanggal 12 September 2007 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 8,5 pada kedalaman 30 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. Data diperoleh dari laman yang dikelola oleh PTWC di <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 10. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Sumatera 2007 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,5.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 23401	88,53° BT	8,90° LS	101,37° BT	4,44° LS	2058	0,023
2	Trinconmalee	81,20° BT	8,56° LS	101,37° BT	4,44° LS	2277	0,280
3	Cocos Island	96,89° BT	12,12° LS	101,37° BT	4,44° LS	987	0,110
4	Prigi	103,25° BT	0,25° LS	101,37° BT	4,44° LS	511	0,190
5	Benoa	115,22° BT	8,75° LS	101,37° BT	4,44° LS	1605	0,020
6	Male	73,53° BT	4,19° LS	101,37° BT	4,44° LS	3090	0,120
7	Hanimadhoo	73,17° BT	6,77° LU	101,37° BT	4,44° LS	3373	0,130
8	Sibolga	98,77° BT	1,73° LU	101,37° BT	4,44° LS	745	0,160
9	Point La Rue	55,53° BT	4,67° LS	101,37° BT	4,44° LS	5086	0,190
10	Gan	73,15° BT	0,69° LS	101,37° BT	4,44° LS	3165	0,070
11	Cilacap	109,00° BT	7,73° LS	101,37° BT	4,44° LS	920	0,230
12	Masirah	58,87° BT	20,68° LU	101,37° BT	4,44° LS	4937	0,070
13	Lamu	40,90° BT	2,27° LS	101,37° BT	4,44° LS	6723	0,040
14	Colombo	79,85° BT	6,95° LS	101,37° BT	4,44° LS	2400	0,245

Tabel 11 berikut memberikan 5 data pengamatan lapangan untuk kasus tsunami di Sumatera pada tanggal 6 April 2010 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 7,8 pada kedalaman 19,3 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dioperasikan oleh NOAA dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari titik episenter tsunami. Sumber data dapat diakses di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov>.

Tabel 11. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Sumatera 2010 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 7,8.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 56001	109,94° BT	14,02° LS	97,13° BT	2,36° LU	2307	0,003
2	DART 23401	88,55° BT	8,86° LU	97,13° BT	2,36° LU	1194	0,007
3	Teluk Dalam	97,82° BT	0,55° LU	97,13° BT	2,36° LU	216	0,170
4	Padang	100,37° BT	0,90° LS	97,13° BT	2,36° LU	516	0,070
5	Tanahbala	98,50° BT	0,53° LS	97,13° BT	2,36° LU	356	0,070

Tabel 12 berikut memberikan 10 data pengamatan lapangan untuk tsunami Mentawai tanggal 25 Oktober 2010 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik M_w 7,8 pada kedalaman 20,6 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* dari berbagai lokasi geografis

diukur dari episenter tsunami. Sumber data η kasus tsunami Mentawai 2010 dapat diakses secara bebas melalui laman yang dikelola oleh PTWC, yakni <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 12. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Mentawai 2010 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 7,8.

No	Nama	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 56001	109,94° BT	14,02° LS	100,11° BT	3,48° LS	1595	0,007
2	Hillarys Harbor	115,74° BT	31,83° LS	100,11° BT	3,48° LS	3554	0,080
3	Trinconmalee	81,20° BT	8,56° LS	100,11° BT	3,48° LS	2168	0,070
4	Colombo	79,85° BT	6,95° LS	100,11° BT	3,48° LS	2279	0,090
5	Gan	73,15° BT	0,69° LS	100,11° BT	3,48° LS	3015	0,005
6	Male	73,53° BT	4,19° LS	100,11° BT	3,48° LS	2953	0,080
7	Diego Garcia	72,39° BT	7,30° LS	100,11° BT	3,48° LS	3101	0,060
8	Karachi	66,98° BT	24,81° LU	100,11° BT	3,48° LS	4269	0,060
9	Masirah	58,87° BT	20,68° LU	100,11° BT	3,48° LS	4858	0,040
10	Chabahar	60,60° BT	25,30° LU	100,11° BT	3,48° LS	4872	0,040

Tabel 13 memberikan 6 data pengamatan lapangan untuk tsunami di Sumatera pada tanggal 11 April 2012 yang dibangkitkan oleh gempa M_w 8,6 pada kedalaman 23 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari episenter tsunami. Data sekunder diperoleh dari laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> yang dikelola oleh NOAA dan penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini (Heidarzadeh *et al.*, 2017).

Tabel 13. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Sumatera 2012 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 8,6.

No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 23227	88,79° BT	6,26° LU	93,06° BT	2,33° LU	645	0,125
2	DART 23401	88,55° BT	8,86° LU	93,06° BT	2,33° LU	882	0,070
3	DART 56001	109,94° BT	14,02° LS	93,06° BT	2,33° LU	2604	0,015
4	Sabang	95,32° BT	5,89° LS	93,06° BT	2,33° LU	949	0,400
5	Hanimadhoo	73,17° BT	6,78° LS	93,06° BT	2,33° LU	2432	0,150
6	Cocos Islands	96,89° BT	12,12° LS	93,06° BT	2,33° LU	1663	0,085

Tabel 14 berikut memberikan 9 data pengamatan lapangan untuk tsunami di Sumatera tanggal 2 Maret 2016 yang dibangkitkan oleh gempa tektonik berkekuatan M_w 7,8 pada kedalaman 24 km. Data numerik berasal dari rekaman DART *buoys* dan *tide gauges* yang dioperasikan oleh NOAA dan PTWC dari berbagai lokasi geografis yang diukur dari episenter. Data dapat diakses secara bebas di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html dan <http://ngdc.noaa.gov> serta <http://ptwc.weather.gov/>.

Tabel 14. Data amplitudo maksimum tsunami untuk kasus Sumatera 2016 yang dihasilkan oleh gempa berkekuatan M_w 7,8.

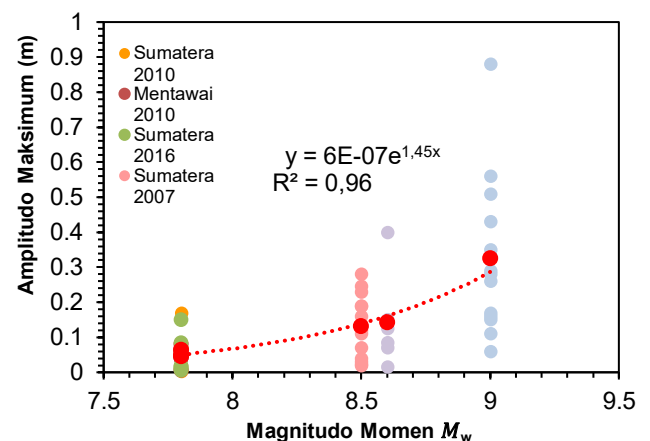
No	Nama Stasiun	Posisi Instrumen		Episenter Tsunami		d (km)	η (m)
		Bujur	Lintang	Bujur	Lintang		
1	DART 23227	88,79° BT	6,26° LU	94,28° BT	4,91° LS	9293	0,011
2	DART 23401	88,55° BT	8,86° LU	94,28° BT	4,91° LS	9007	0,009
3	DART 56001	109,94° BT	14,02° LS	94,28° BT	4,91° LS	11376	0,016
4	DART 56003	118,07° BT	15,02° LS	94,28° BT	4,91° LS	11428	0,005
5	Cocos Island	96,89° BT	12,12° LS	94,28° BT	4,91° LS	11267	0,060
6	Sabang	95,32° BT	5,89° LU	94,28° BT	4,91° LS	9280	0,018
7	Christmas Island	157,47° BB	1,98° LU	94,28° BT	4,91° LS	9376	0,085
8	Sadeng	110,80° BT	8,19° LS	94,28° BT	4,91° LS	10722	0,150
9	Gan	73,17° BT	0,70° LS	94,28° BT	4,91° LS	10195	0,014

Tabel 16 berikut memberikan ringkasan relasi antara M_w dan η untuk 6 kasus di Indonesia yang dibahas pada penelitian ini.

Tabel 16. Ringkasan data relasi antara M_w dan η untuk 6 tsunami di Indonesia.

No	Nama Tsunami	Magnitudo Momen M_w	Rerata Amplitudo maksimum η (m)
1	Aceh 2004	9,0	0,324
2	Sumatera 2007	8,5	0,131
3	Sumatera 2010	7,8	0,064
4	Mentawai 2010	7,8	0,048
5	Sumatera 2012	8,6	0,141
6	Sumatera 2016	7,8	0,045

Keberhasilan plot grafik relasi antara M_w dan η untuk kasus trans-Pasifik dikembangkan untuk kasus tsunami di Indonesia. Fokus perhatian adalah grafik yang diperoleh apakah juga akan memberikan diskripsi perilaku relasi yang sama seperti terlihat pada Gambar 1. Gambar 2 adalah plot relasi M_w dan η , di mana lingkaran-lingkaran merah merepresentasikan rerata amplitudo maksimum tsunami.



Gambar 2. Grafik M_w sebagai fungsi logaritmik η untuk 6 kasus tsunami yang terjadi di Indonesia.

Berdasarkan Gambar 2 tersebut, maka relasi antara magnitudo momen M_w gempa pembangkit gelombang tsunami dan rerata amplitudo maksimum tsunami Indonesia dapat dituliskan sebagai berikut,

$$M_w = 1,588 \log \eta + 9,880 \quad (7)$$

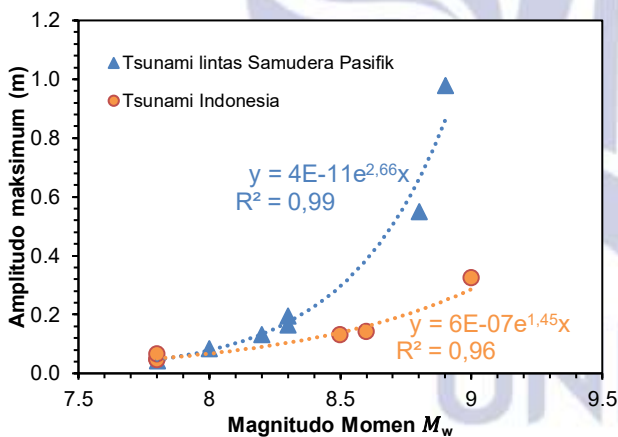
di mana digunakan konversi $\ln x = 2,303 \log x$. Grafik M_w

sebagai fungsi logaritmik η pada Gambar 2 memiliki nilai koefisien korelasi $R^2 = 0,96$. Koefisien korelasi sebesar itu menunjukkan bahwa ada kesesuaian yang tinggi antara data penelitian ini (merupakan kombinasi data M_w dan η) dan persamaan empiris (7).

Persamaan empiris (7) yang mendeskripsikan relasi antara M_w dan η untuk 6 kasus tsunami di Indonesia dalam penelitian ini memiliki koefisien fungsi logaritmik yang hampir 2,5 kali lebih besar dari koefisien fungsi logaritmik persamaan empiris $M_w = 0,665 \log \eta + 8,245$ temuan Heidarzadeh *et al.* (2018) untuk 4 tsunami trans-Pasifik. Meskipun dalam penelitian ini magnitudo momen M_w secara kualitatif tetap terlihat sebagai fungsi logaritmik η , namun perbedaan koefisien fungsi logaritmik (1,588 dan 0,665) memberikan perbedaan yang cukup signifikan pada ketajaman grafik eksponensial M_w terhadap η sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1 dan Gambar 2 sebelum ini. Beberapa faktor yang bisa menjadi penyebab perbedaan tersebut adalah ketersediaan data tsunami Indonesia relatif lebih sedikit daripada tsunami lintas Samudera Pasifik dan dari jumlah data yang relatif sedikit itu tingkat akurasi relatif rendah.

Kasus Tsunami Lintas Samudera Pasifik dan Tsunami Indonesia

Untuk melihat perbedaan pola ketajaman grafik eksponensial M_w terhadap η antara kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan tsunami Indonesia, maka Gambar 3 dibuat di mana grafik keduanya dibuat dalam satu plot.



Gambar 3. Grafik M_w sebagai fungsi logaritmik η untuk tsunami lintas Samudera Pasifik dan tsunami Indonesia.

Pola grafik M_w terhadap η pada masing-masing kasus tsunami yang terlihat pada Gambar 3 mendeskripsikan bahwa kasus trans-Pasifik (biru) lebih sensitif terhadap variasi kekuatan gempa daripada kasus tsunami Indonesia. Perubahan kecil magnitudo momen M_w akan memberikan efek perubahan nilai rerata amplitudo maksimum tsunami η di kawasan Pasifik yang lebih signifikan. Hal ini bukan berarti bahwa fenomena tsunami di Samudera Hindia relatif lebih aman karena tinggi gelombang dan energi gelombang tsunami yang didistribusikan oleh sumber gempa dari episenter tsunami di Samudera Hindia tidak akan melebihi seandainya peristiwa tersebut terjadi di Samudera Pasifik. Salah satu alasan yang masuk akal adalah *non-uniformity in energy decay times* dan perbedaan karakteristik serapan energi

tsunami untuk berbagai *tsunami directivity* atau variasi lintasan perambatan tsunami di laut (Rabinovich *et al.*, 2011; Prastowo *et al.*, 2018; Prastowo *et al.*, 2019).

Hal paling penting dari Gambar 3 adalah bahwa baik untuk tsunami trans-Pasifik maupun tsunami Indonesia magnitudo momen M_w gempa tektonik pemicu tsunami merupakan fungsi logaritmik amplitudo tsunami η , seperti dapat dilihat pada Tabel 17 di bawah. Temuan M_w sebagai fungsi logaritmik dari η ini sesuai dengan temuan penelitian terdahulu (Heidarzadeh *et al.*, 2018). Perlu diperhatikan bahwa persamaan empiris 2 pada tabel tersebut dibentuk dari 6 kasus tsunami Indonesia dengan episenter di laut.

Tabel 17. Persamaan empiris relasi antara M_w dan η kasus tsunami trans-Pasifik dan tsunami Indonesia.

No	Kasus Tsunami	Persamaan Empiris	Koefisien Korelasi R^2
1	Trans-Pasifik	$M_w = 0,866 \log \eta + 9,001$	0,99
2	Indonesia	$M_w = 1,588 \log \eta + 9,880$	0,96

Seperti juga banyak kasus fenomena alam yang lain, temuan utama penelitian ini masih membutuhkan konfirmasi dari analisis serupa terhadap perilaku tsunami pada kedua wilayah lautan dengan karakteristik geologi kelautan dan proses fisis yang berbeda, yaitu Samudera Pasifik dan Samudera Hindia. Dengan demikian, temuan persamaan empiris relasi antara M_w dan η yang berbeda (Tabel 17) untuk kedua wilayah lautan tersebut adalah wajar untuk saat ini.

Dalam konteks studi mitigasi bencana, persamaan empiris pada Tabel 17 bisa digunakan untuk prediksi tinggi gelombang tsunami di laut terbuka apabila kekuatan sumber gempa tektonik pemicu tsunami diketahui. Pada gilirannya nanti, tinggi gelombang tsunami di laut terbuka bisa digunakan untuk prediksi tinggi gelombang tsunami saat tiba di pantai atau biasa dikenal sebagai *run-up*. Jadi, hasil-hasil penelitian ini penting karena memberikan kontribusi positif dan mengisi ‘celah’ yang diperlukan untuk pengembangan studi mitigasi bencana tsunami.

PENUTUP Simpulan

Penelitian ini mereplikasi metodologi penelitian Heidarzadeh *et al.* (2018) dengan menggunakan 7 kasus tsunami trans-Pasifik (Kuril 2006, Selandia Baru 2009, Maule, Chili 2010, Tohoku, Jepang 2011, Solomon 2013, Iquique, Chili 2014, dan Illapel, Chili 2015) dan 6 kasus di Indonesia (Aceh 2004, Sumatera 2007, Sumatera 2010, Mentawai 2010, Sumatera 2012, dan Sumatera 2016). Untuk kasus tsunami trans-Pasifik, persamaan empiris yang mendeskripsikan relasi matematis antara M_w dan η adalah $M_w = 0,850 \log \eta + 8,941$ sedangkan untuk kasus tsunami di Indonesia adalah $M_w = 1,588 \log \eta + 9,880$. Perbedaan yang muncul pada kedua persamaan empiris karena perbedaan karakteristik perambatan gelombang tsunami di Samudera Pasifik dan Samudera Hindia (Rabinovich *et al.*, 2011; Prastowo *et al.*, 2018).

Persamaan empiris tersebut menceritakan bahwa baik untuk kasus tsunami trans-Pasifik maupun tsunami Indonesia, kedua parameter dinamik yaitu parameter tsunami (η) dan parameter sumber gempa tektonik (magnitudo momen M_w) terhubung melalui temuan M_w

merupakan fungsi logaritmik dari η . Temuan ini sesuai dengan penelitian terdahulu (Heidarzadeh *et al.*, 2018).

Data penelitian ini menunjukkan bahwa tidak ada korelasi yang jelas antara amplitudo maksimum tsunami dan *epicentral distance*. Hal ini sesuai dengan temuan Heidarzadeh *et al.* (2018). Stasiun pemantau yang berada lebih jauh bisa memberikan nilai amplitudo maksimum tsunami yang lebih besar dari nilai yang diberikan oleh stasiun pemantau yang berada lebih dekat dari episenter. Hal ini menunjukkan bahwa faktor *propagation directivity* atau 'geometrical spreading' tsunami (Okal *et al.*, 2014) ikut menentukan variasi η terhadap *epicentral distance*.

Saran

Studi mitigasi bencana tsunami meliputi pemahaman perilaku tsunami dalam zona generasi, zona propagasi, dan zona mitigasi. Kemajuan penelitian dalam salah satu zona ikut menentukan kemajuan penelitian dalam zona yang lain. Oleh karena itu, sangat penting untuk memastikan akurasi hasil-hasil penelitian, setidaknya secara kualitatif. Akurasi hasil-hasil penelitian secara kualitatif bisa diuji melalui perbandingan langsung atau uji kesesuaian dengan hasil-hasil penelitian terdahulu.

Ketidaksesuaian yang terjadi (jika ada bukti kasus) tidak selalu berarti kekeliruan hasil penelitian saat ini. Kesesuaian hasil penelitian untuk kasus wilayah Samudera Pasifik dapat ditingkatkan lagi dengan menguji lebih banyak kasus tsunami, terutama tsunami masa lalu dengan harapan tersedia data lapangan dalam jumlah yang cukup dan akurat. Perbedaan karakteristik perambatan gelombang tsunami pada kedua wilayah samudera dalam penelitian ini dapat ditindaklanjuti melalui penelitian serupa dengan jumlah data yang lebih banyak, khususnya untuk data tsunami di wilayah Samudera Hindia.

Mengingat tsunami dapat dibangkitkan oleh gempa tektonik dengan episenter baik di laut maupun di darat, maka penelitian ini dapat ditindaklanjuti untuk kasus tsunami Indonesia yang dibangkitkan oleh gempa tektonik dengan episenter di darat. Dengan demikian, bisa diketahui apakah pola hubungan antara magnitudo momen M_w dan amplitudo maksimum tsunami η pada penelitian ini masih berlaku atau tidak.

UCAPAN TERIMAKASIH

Tim Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak NOAA dan PTWC atas data sekunder yang disediakan bebas untuk penelitian ini. Tim Penulis juga menyampaikan ucapan terimakasih kepada 2 *reviewers* yang telah memberikan masukan bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Anwar, N. A. 2019. *Estimasi tsunami run-up dengan pendekatan modifikasi hukum Green dalam zona mitigasi*. Skripsi. Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya. Tidak dipublikasikan. pp.1-52.
- Bock, Y., Prawirodirdjo, L., Genrich, J. F., Stevens, C. W., McCaffrey, R., Subarya, C., Puntodewo, S. S. O. and Calais, E. 2003. Crustal motion in Indonesia from global positioning system measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol.108, No.B8, p.2367.
- Carvajal, M., Araya-Cortejo, C., S epulveda, I., Melnick, D. and Haase, J. S. 2019. Nearly instantaneous tsunamis following the M_w 7.5 2018 Palu earthquake. *Geophysical Research Letters*, Vol.46, doi:10.1029/2019GL082578, pp.1-33.
- Charvet, I., Eames, I. and Rossetto, T. 2013. New tsunami runup relationships based on long wave experiments. *Ocean Modelling*, Vol.69, pp.79-92.
- Cholifah, L. and Prastowo, T. 2017. A simple parameterization for tsunami run-up prediction. *Journal of Science and Science Education*, Vol.1, No.2, pp.7-13.
- Giachetti, T., Paris, R., Kelfoun, K. and Ontowirjo, B. 2012. Tsunami hazards related to a flank collapse of Anak Krakatau Volcano, Sunda Strait, Indonesia. *The Geology Society of London, Special Publication*, pp.79-90.
- Heidarzadeh, M., Harada, T., Satake, K., Ishibe, T. and Takagawa, T. 2017. Tsunamis from strike-slip earthquakes in the Wharton Basin, northeast Indian Ocean: March 2016 M_w 7.8 event and its relationship with the April 2012 M_w 8.6 event. *Geophysical Journal International*, Vol.211, pp.1601-1612.
- Heidarzadeh, M., Satake, K., Takagawa, T., Rabinovich, A. and Kusumoto, S. 2018. A comparative study of far-field tsunami amplitudes and ocean-wide propagation properties: insight from major trans-Pacific tsunamis of 2010–2015. *Geophysical Journal International*, Vol.215, pp.22-36.
- Heidarzadeh, M., Ishibe, T., Sandanbata, O., Muhari, A. and Wijanarko, A. B. 2020. Numerical modeling of the subaerial landslide source of the 22 December 2018 Anak Krakatoa volcanic tsunami, Indonesia. *Ocean Engineering*, Vol.195, No.106733, pp.1-11.
- Irsyam, M., Hendriyawan, Asrurifak, M., Mikail, R., Sabaruddin, A., Faisal, L., Meilano, I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Triyoso, W., Hidayati, S., Rudiyanto, A., Imran, I. dan Sakti, L. M. 2017. *Pemutakhiran Sumber dan Peta Gempa Indonesia 2017*. Pusat Studi Gempa Bumi Nasional: Jakarta.
- Merrifield, M. A., Firing, Y. L., Aarup, T., Agricole, W., Brundrit, G., Chang-Seng, D., Farre, R., Kilonsky, B., Knight, W., Kong, L., Magori, C., Manurung, P., McCreery, C., Mitchell, W., Pillay, S., Schindele, F., Shillington, F., Testut, L., Wijeratne, E. M. S., Caldwell, P., Jardin, J., Nakahara, S., Porter, F-Y. and Turetsky, N. 2005. Tide gauge observations of the Indian Ocean tsunami, December 26, 2004. *Geophysical Research Letters*, Vol.32, L09603, doi:10.1029/2005GL022610.
- Mikami, T., Shibayama, T., Esteban, M., Takabatake, T., Nakamura, R., Nishida, Y., Achiari, H., Rusli, Marzuki, A. G., Marzuki, M. F. H., Stolle,

- J., Krautwald, C., Robertson, I., Aránguiz, R. and Ohira, K. 2019. Field survey of the 2018 Sulawesi Tsunami: inundation and run-up heights, and damage to coastal communities. *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-019-02258-5, pp.1-25.
- Okal, E. A., Reymond, D. and Hébert, H. 2014. From earthquake size to far-field tsunami amplitude: development of a simple formula and application to DART buoy data. *Geophysical Journal International*, Vol.196, pp.340-356.
- Prastowo, T., Cholifah, L. and Madlazim. 2018. Analysis of travel time delay for large tsunamis across the Pacific and Indian Oceans. *Science of Tsunami Hazards*, Vol.34, No.4, pp.195-212.
- Prastowo T. and Cholifah, L. 2019. The nature of tsunami energy decay with epicentral distance in the open ocean for two large trans-Pacific tsunamis. *IOP Conference Series, Journal of Physics: Conference Series*, Vol.1153, No.012017. doi:10.1088/1742-6596/1153/1/012017.
- Prastowo, T., Bariyah, A. K. and Cholifah, L. 2020. Two dynamic parameters relating earthquake magnitude and tsunami maximum amplitude for distant observations. *Submitted to 2020 ICSAS Committee for publication in AIP*.
- Putri, B. B. 2019. *Analisis travel time delay kasus trans-oceanic tsunamis dalam zona propagasi*. Skripsi. Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya. Tidak dipublikasikan. pp.1-43.
- Rabinovich, A. B., Candella, R. H. and Thomson, R. E. 2011. Energy decay of the 2004 Sumatra tsunami in the world ocean. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.168, pp.1919-1950, doi:10.1007/s00024-011-0279-1.
- Satake, K., Nishimura, Y., Putra, P. N., Gusman, A. R., Sunendar, H., Fujii, Y., Tanioka, U., Latief, H. and Yulianto, E. 2012. Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling. *Pure and Applied Geophysics*, doi:10.1007/s00024-012-0536-y, 1-17.
- Satake, K. 2014. Advances in earthquake and tsunami sciences and disaster risk reduction since the 2004 Indian ocean tsunami. *Geoscience Letters*, Vol.1, No.15, pp.1-13.