

ANALISIS RELASI ANTARA MAGNITUDO TSUNAMI DAN AMPLITUDO MAKSIMUM TSUNAMI

Ivo Nur Kholifah, Tjipto Prastowo

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

Email: ivo.17030224025@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Gempa tektonik dan tsunami adalah dua bencana geologi yang saling berhubungan dalam konteks gempa tektonik bisa memicu tsunami. Upaya mitigasi perlu dilakukan dengan mempelajari relasi antara parameter gempa tektonik dan parameter tsunami. Parameter gempa tektonik dikaji melalui magnitudo gempa bernilai tunggal yang tidak bergantung pada jarak pengamatan dari sumber dan dinyatakan dalam skala M_w . Parameter tsunami dikaji melalui magnitudo tsunami M_t dan elevasi muka laut atau dikenal sebagai amplitudo maksimum tsunami η . Fokus penelitian ini adalah relasi antara M_t dan η di laut lepas serta kesesuaian estimasi M_t terhadap M_w . Data penelitian ini meliputi tsunami lintas samudera, yaitu 18 kasus trans-Pasifik dan 7 kasus tsunami Indonesia yang diakses bebas melalui laman <http://ngdc.noaa.gov> dan https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html. Semua kasus tsunami adalah yang dipicu oleh gempa tektonik besar dengan magnitudo $M_w > 7,5$, di mana *epicentral distance* ditentukan oleh $d \geq 3000$ km (*far-field tsunami observations*). Hasil-hasil penelitian ini berupa persamaan empiris relasi antara M_t dan η untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik, $M_t = \log \eta + 9,30$ sedangkan untuk kasus tsunami Indonesia, $M_t = \log \eta + 9,17$. Perbedaan persamaan empiris untuk kasus trans-Pasifik dan tsunami Indonesia karena perbedaan batimetri dan topografi antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia selain faktor *tsunami directivity* dan keterbatasan instrumen pemantau tsunami untuk kawasan Samudera Hindia. Untuk seluruh kasus, penyimpangan estimasi M_t terhadap M_w adalah $\Delta \leq 0,2$. Berdasarkan kedua persamaan empiris tersebut, magnitudo tsunami M_t merupakan fungsi logaritmik amplitudo maksimum tsunami η sesuai dengan temuan terdahulu. Hasil-hasil penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan pemahaman tentang karakteristik gelombang tsunami di Indonesia dalam konteks upaya mitigasi bencana.

Kata Kunci: magnitudo tsunami, amplitudo maksimum tsunami, magnitudo momen gempa

Abstract

Tectonic earthquake and tsunami are geological disasters that are linked, where the earthquake can possibly induce a tsunami. Efforts in mitigation study are necessary to carry out by studying the relationship of earthquake and tsunami parameters. Earthquake parameter was examined using M_w scale, independent of observational distance from the source. Tsunami parameter was evaluated by tsunami magnitude M_t and associated tsunami maximum amplitude η . This study focused on the relationship of M_t and η in the open ocean and compared M_t estimates with the corresponding M_w values referenced. The data included trans-oceanic tsunamis containing 18 trans-Pacific tsunamis and 7 Indonesian cases, accessed from <http://ngdc.noaa.gov> and https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html. The tsunamis discussed were generated by large earthquakes with $M_w > 7.5$, where the distance was limited to $d \geq 3000$ km (*far-field observations*). The results are given in empirical relationships of M_t and η for the trans-Pacific, $M_t = \log \eta + 9,30$ and for the Indonesian tsunamis, $M_t = \log \eta + 9.17$. The difference in the equations is owing to differences in complex topography and bathymetry between the Pacific and Indian Oceans as well as tsunami directivity and limited monitoring instrument in the Indian Ocean tsunami case. For all cases, the M_t estimates deviated from the reference M_w values, measured to be $\Delta \leq 0.2$. Based on the equations, tsunami magnitude M_t is a function of the logarithmic scale of maximum tsunami amplitude η , consistent with previous work. The results are expected to increase understanding of the characteristics of Indonesian tsunamis in the context of hazard mitigation study.

Keywords: tsunami magnitude, tsunami maximum amplitude, earthquake moment magnitude

PENDAHULUAN

Wilayah Indonesia merupakan pertemuan antara tiga lempeng tektonik besar dunia yang aktif, yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik, dan Lempeng Indo-Australia. Oleh karena itu, wilayah Indonesia rawan potensi bahaya gerak relatif antar lempeng dalam bentuk bencana gempa tektonik dan tsunami (Cipta *et al.*, 2016; Cummins, 2017; Irsyam *et al.*, 2017). Dalam konteks ini, gelombang tsunami bisa dipicu oleh beberapa sumber, misalnya erupsi gunung api bawah laut, gempa tektonik, dan longsor tebing bawah laut (Ward, 2011; Harris and Major, 2016). Dampak bencana gelombang tsunami tidak

hanya menimbulkan kehancuran di daerah sekitar episenter, melainkan bisa juga berskala global hingga lintas samudera. Sebagai contoh, bencana tsunami Aceh 2004 yang dipicu oleh gempa tektonik di sepanjang zona subduksi Andaman-Sumatera (Satake *et al.*, 2012; Satake *et al.*, 2014) menyapu pantai dan daratan beberapa negara tepian Samudera Hindia (Suppasri *et al.*, 2015; Satake *et al.*, 2020).

Tsunami lintas samudera (*trans-oceanic tsunamis*) biasanya dipicu oleh gempa tektonik besar ($M_w \sim 9.0$) atau erupsi gunung api (Schubert, 2015; Satake *et al.*, 2020). Analisis relasi antara magnitudo momen gempa dan tinggi maksimum gelombang tsunami dibahas dalam penelitian

terdahulu (Okal *et al.*, 2014; Heidarzadeh *et al.*, 2018) dalam konteks gempa tektonik yang memicu gelombang tsunami lintas Samudera Pasifik (tsunami Tohoku 2011, Jepang dan 3 kasus tsunami di Chili: Maule 2010, Iquique 2014, Illapel 2015). Namun belum ada penelitian relevan dengan episenter tsunami di sekeliling Samudera Pasifik dan tsunami lintas Samudera Hindia.

Dalam penelitian ini, tsunami sebagai fenomena gerak volume air laut dalam jumlah yang sangat besar dikaji melalui magnitudo tsunami M_t dan elevasi muka laut atau dikenal sebagai amplitudo maksimum tsunami η . Metode untuk mengukur M_t dilakukan dengan membuat analogi antara M_t dan magnitudo momen M_w (Abe, 1979; 1981; 1985; 1989) yang kemudian dibahas ulang secara komprehensif oleh Satake *et al.* (2020). Abe (1979; 1981) menentukan M_t dengan teknik kalibrasi terhadap M_w dan menggunakan logaritma η dari pengukuran elevasi muka laut di laut lepas. Hal ini mengingat M_t tidak berbeda signifikan dari M_w dalam batas ketakpastian pengukuran (Abe, 1985; 1989; Hatori, 1996; Papadopoulos, 2003; Yanagisawa *et al.*, 2016; Carjaval *et al.*, 2017). Penelitian terkini yang relevan dengan topik ini (Satake *et al.*, 2020) melaporkan persamaan empiris untuk menentukan M_t dengan mempertimbangkan faktor yang bergantung pada lokasi titik episenter dan jarak pengamatan dalam bentuk aspek rasio.

Penelitian ini bertujuan untuk mencari persamaan empiris yang mendeskripsikan relasi antara M_t dan η . Selain itu, penelitian ini juga membandingkan estimasi M_t terhadap nilai referensi M_w yang diberikan oleh USGS. Kasus tsunami yang ditinjau adalah kasus trans-Pasifik dengan episenter di sekeliling Samudera Pasifik dan kasus tsunami di perairan Indonesia. Hasil-hasil penelitian ini dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan untuk menguji kesesuaian persamaan empiris yang diperoleh dari data penelitian ini relatif terhadap persamaan empiris Satake *et al.* (2020). Berikut ini adalah beberapa metode penentuan M_t yang telah dilakukan oleh peneliti terdahulu.

Teori Abe

Dengan menggunakan data gempa besar di Pasifik antara tahun 1837-1974, Abe (1979) menentukan nilai M_t dengan bantuan data amplitudo maksimum tsunami η untuk pengamatan sejauh 1000 km dari episenter tsunami. Dengan mempertimbangkan beberapa faktor internal dan faktor eksternal medium perambatan gelombang, nilai M_t ditentukan melalui

$$M_t = \log \eta + \beta \quad (1)$$

di mana η adalah amplitudo maksimum tsunami (dalam meter) dan β adalah konstanta yang bergantung pada lokasi sumber dan observasi. Oleh karena η dipengaruhi oleh M_w melalui bentuk persamaan fungsi logaritmik yang serupa (Heidarzadeh *et al.*, 2018), dengan demikian

secara logika matematis M_t tidak berbeda jauh dari M_w . Dengan pertimbangan tersebut, nilai konstanta empiris β disesuaikan agar perhitungan M_t rata-rata untuk semua stasiun pengamatan kejadian tsunami tertentu tidak berbeda jauh dari M_w gempa pemicu tsunami tersebut.

Secara teknis, nilai konstanta empiris β ditentukan dengan menganalisis *tsunami datasets* dan gempa melalui kalibrasi M_t terhadap M_w . Sebagai hasil kalibrasi adalah β berbeda secara sistematis dari satu stasiun ke stasiun lain dan juga bervariasi dari satu kejadian ke kejadian lain. Rata-rata nilai β adalah sebagai berikut,

$$\beta = C + \Delta C \quad (2)$$

di mana C adalah 9,1 dan ΔC adalah penyimpangan dari C yang bervariasi antara 0,1 sampai 0,3.

Metode tersebut di atas tidak berlaku jika diterapkan untuk pengamatan medan dekat (*near-field*), $d < 3000$ km. Oleh karena itu, Abe (1981) meninjau pengamatan tsunami untuk medan dekat berdasarkan data regional. Metode ini kemudian merevisi bentuk persamaan (2) menjadi

$$\beta = \log \alpha + \text{'konstanta'} \quad (3)$$

di mana α adalah *epicentral distance* yang diukur dari lokasi stasiun pengamatan menuju ke episenter tsunami dengan 'konstanta' pada persamaan (2) yang nilainya bergantung pada analisis data statistik (Abe, 1981).

Dengan substitusi persamaan (3) ke persamaan (1) untuk sejumlah *tsunami datasets* yang digunakan saat itu, kemudian Abe (1981) melaporkan persamaan empiris M_t secara terpisah menjadi dua, yaitu

$$M_t = \log \eta + \log \alpha + 5,80 \quad (4)$$

untuk pengamatan tsunami dengan mengambil jarak dari permukaan laut menuju ke puncak gelombang tsunami sebagai amplitudo maksimum tsunami dan

$$M_t = \log \eta + \log \alpha + 5,55 \quad (5)$$

untuk pengamatan tsunami dengan mengambil jarak dari lembah gelombang menuju ke puncak gelombang tsunami sebagai amplitudo maksimum tsunami.

Teori Satake

Dengan *global datasets* yang lebih luas cakupannya, Satake *et al.* (2020) menentukan skala M_t untuk berbagai kasus tsunami lintas samudera dengan menggunakan nilai logaritma amplitudo maksimum tsunami η yang diperoleh dari medan jauh (*far-field*). Persamaan empiris M_t menurut Satake *et al.* (2020) adalah sebagai berikut,

$$M_t = \log \eta + 9,1 + \Delta C^* \quad (6)$$

di mana η adalah amplitudo maksimum tsunami terukur oleh instrumen ukur saat pasang surut elevasi muka laut akibat *tsunami passage* (yang diukur dalam meter) dan ΔC^* didefinisikan sebagai faktor jarak dalam bentuk aspek rasio yang bervariasi antara -0,6 sampai 0,3 bergantung pada kombinasi lokasi episenter tsunami dan pengamatan medan rambat gelombang tsunami di zona propagasi (laut lepas). Satake *et al.* (2020) menerapkan persamaan (6) tersebut untuk pengamatan medan jauh dengan $d \geq 3000$ km.

METODE

Penelitian ini mengacu pada penelitian terdahulu (Satake *et al.*, 2020) tentang relasi antara magnitudo tsunami M_t dan amplitudo maksimum tsunami η dengan melibatkan magnitudo momen M_w gempa pemicu tsunami sebagai kalibrator. Dalam konteks ini, estimasi magnitudo tsunami dilakukan dalam 2 tahap. Pertama, menerapkan persamaan (6) dengan memasukkan $\Delta C^* = 0$ sehingga diperoleh bentuk

$$M_t = \log \eta + 9,1 \tag{7}$$

untuk melihat seberapa besar penyimpangan M_t dari M_w . Tahap ke 2 dilakukan dengan menerapkan persamaan (6) dan memasukkan $\Delta C^* = \Delta > 0$ atau $\Delta C^* = \Delta < 0$ asalkan tetap memenuhi $-0,6 \leq \Delta C^* = \Delta \leq 0,3$ seperti persyaratan dalam Satake *et al.* (2020). Persamaan empiris tahap ke 2 dituliskan sebagai

$$M_t^* = \log \eta + 9,1 + \Delta \tag{8}$$

di mana $\Delta > 0$ jika $M_t < M_w$ (dan sebaliknya) sedemikian sehingga fungsi empiris M_t^* menjadi optimum (nilai M_t^* mendekati M_w).

Prediksi Carvajal *et al.* (2017) adalah nilai M_t^* tidak akan berbeda jauh dari M_w . Oleh karena itu, bagian akhir penelitian ini membahas level akurasi estimasi M_t^* relatif terhadap M_w referensi dari USGS. Kasus yang dibahas adalah tsunami lintas samudera yang dipicu oleh gempa besar dengan kekuatan $M_w \geq 7,5$ yang meliputi 18 kasus trans-Pasifik dan 7 kasus tsunami di perairan Indonesia. Data penelitian merupakan data sekunder dari *Deep-ocean Assessment Reports of Tsunamis (DART) buoys* atau *tide gauges* yang diperoleh dari laman <http://ngdc.noaa.gov>. https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Variabel manipulasi adalah amplitudo maksimum tsunami η di laut lepas (zona propagasi tsunami) yang tercatat oleh instrument DARTs di stasiun pemantau. Variabel respons adalah magnitudo tsunami M_t untuk kasus trans-Pasifik dan tsunami di perairan Indonesia. Variabel kontrol adalah magnitudo momen M_w gempa pemicu tsunami untuk satu kejadian.

Data yang telah dikumpulkan kemudian dibuat tabulasi data terlebih dahulu untuk setiap kasus tsunami. Dalam hal ini, jumlah data pada setiap kasus tidak dibatasi karena karakteristik perambatan tsunami ditentukan oleh kualitas data bukan kuantitas data. Setelah tabulasi, data dari masing-masing tabel kemudian dikonversi menjadi grafik yang dianalisis dan dibandingkan dengan hasil-hasil penelitian terdahulu yang relevan (Abe, 1985; 1989; Satake *et al.*, 2020).

Dengan menggunakan aplikasi *Excel*, analisis data dan plot dilakukan untuk membuat grafik dan persamaan empiris yang mendeskripsikan relasi antara M_t^* dan η di laut lepas untuk kedua jenis kasus tsunami yang ditinjau.

Kemudian dilakukan plot M_t dan M_t^* relatif terhadap M_w untuk menguji kesesuaian estimasi M_t pada persamaan (7) dan M_t^* pada persamaan (8) yang diperoleh secara langsung via persamaan empiris yang diturunkan dari data penelitian. Dalam hal ini, analisis data dilakukan dengan menghitung penyimpangan estimasi M_t dan M_t^* relatif terhadap M_w dari USGS yang berfungsi sebagai referensi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil-hasil penelitian dikelompokkan menjadi dua, yaitu 18 tsunami trans-Pasifik dan 7 tsunami di Indonesia. Pembahasan kedua jenis kasus dilakukan terpisah sebelum dilakukan analisis menyeluruh.

Kasus Tsunami Trans-Pasifik

Tabel 1 memberikan 18 data tsunami trans-Pasifik yang dibangkitkan oleh gempa besar $M_w \geq 7,5$.

Tabel 1. Data 18 kasus tsunami trans-Pasifik.

No	Nama Kasus	M_w	Episenter Tsunami		η (m)	M_t
			Bujur	Lintang		
1	Chili 1960	9,2	73,23° BB	37,47° LS	0,37	8,6
2	Alaska 1964	9,2	147,48° BB	61,05° LU	0,93	9,0
3	Andreanov 1996	7,9	177,59° BB	51,60° LU	0,15	8,1
4	Peru 2001	8,4	73,50° BB	16,38° LS	0,19	8,3
5	Jepang 2003	8,3	143,87° BT	41,86° LU	0,15	8,1
6	Kuril 2006	8,3	153,27° BT	46,58° LU	0,16	8,1
7	Kuril 2007	8,1	154,55° BT	46,23° LU	0,11	8,1
8	Solomon 2007	8,1	157,06° BT	8,43° LS	0,10	8,1
9	Peru 2007	8,0	76,61° BB	13,38° LS	0,08	7,9
10	Samoa 2009	8,1	172,03° BB	15,51° LS	0,14	8,2
11	Selandia Baru 2009	7,8	166,58° BT	45,75° LS	0,05	7,7
12	Maule-Chili 2010	8,8	72,90° BB	36,12° LS	0,55	8,7
13	Tohoku 2011	8,9	142,37° BT	38,30° LU	0,65	8,8
14	Solomon 2013	8,0	165,14° BT	10,74° LS	0,08	7,9
15	Iquique 2014	8,2	70,82° BB	19,64° LS	0,13	8,1
16	Illapel 2015	8,3	71,65° BB	31,57° LS	0,15	8,1
17	Solomon 2016	7,8	161,33° BT	10,68° LS	0,06	7,9
18	Alaska 2018	7,9	149,07° BB	56,05° LS	0,06	7,8

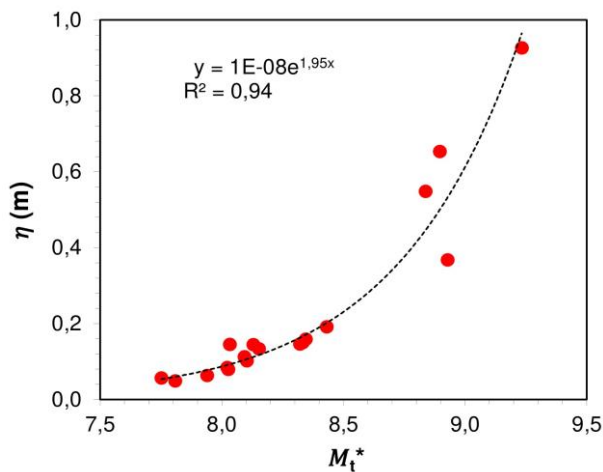
Dari 18 data kasus tsunami trans-Pasifik sejak tahun 1960 sampai 2018, nilai η dan M_t dalam Tabel 1 di atas diperoleh dari perataan terhadap nilai yang diberikan oleh masing-masing instrumen ukur pada stasiun pemantau yang digunakan untuk mengamati peristiwa perambatan tsunami. Masing-masing hasil ukur oleh stasiun pemantau diperoleh dari penerapan persamaan (7). Hasil perhitungan M_t masih terpaut relatif jauh dari nilai M_w (USGS) sebagai referensi karena belum dilakukan kalibrasi seperti metodologi dalam penelitian terdahulu yang relevan (Abe, 1979; 1981; Satake *et al.*, 2020).

Dengan teknik kalibrasi, di mana faktor koreksi Δ (antara -0,6 sampai 0,3) harus ikut serta diperhitungkan dalam proses perhitungan magnitudo tsunami sehingga fungsi M_t^* pada persamaan (8) menjadi optimal, maka Tabel 1 diperbaiki menjadi Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Data 18 kasus tsunami trans-Pasifik dengan melibatkan faktor koreksi Δ dan M_t^* .

No	Nama Kasus	M_w	η (m)	M_t	Δ	M_t^*
1	Chili 1960	9,2	0,37	8,6	0,3	8,9
2	Alaska 1964	9,2	0,93	9,0	0,2	9,2
3	Andreanov 1996	7,9	0,15	8,1	-0,1	8,0
4	Peru 2001	8,4	0,19	8,3	0,1	8,4
5	Jepang 2003	8,3	0,15	8,1	0,2	8,3
6	Kuril 2006	8,3	0,16	8,1	0,2	8,3
7	Kuril 2007	8,1	0,11	8,1	0,0	8,1
8	Solomon 2007	8,1	0,10	8,1	0,0	8,1
9	Peru 2007	8,0	0,08	7,9	0,1	8,0
10	Samoa 2009	8,1	0,14	8,2	-0,1	8,1
11	Selandia Baru 2009	7,8	0,05	7,7	0,1	7,8
12	Maule-Chili 2010	8,8	0,55	8,7	0,1	8,8
13	Tohoku 2011	8,9	0,65	8,8	0,1	8,9
14	Solomon 2013	8,0	0,08	7,9	0,1	8,0
15	Iqueque 2014	8,2	0,13	8,1	0,1	8,2
16	Illapel 2015	8,3	0,15	8,1	0,2	8,3
17	Solomon 2016	7,8	0,06	7,9	-0,1	7,8
18	Alaska 2018	7,9	0,06	7,8	0,1	7,9

Estimasi M_t^* dari persamaan (8) pada Tabel 2 tidak berbeda jauh dari M_w (Carvajal *et al.*, 2017), di mana penyimpangan terhitung sebagai standar deviasi (STD) hanya 0,08 dibandingkan dengan penyimpangan estimasi M_t dari persamaan (7) terhitung sebagai STD sebesar 0,16. Gambar 1 berikut memberikan ilustrasi kebergantungan η terhadap M_t^* dalam bentuk fungsi eksponensial.



Gambar 1. Plot η vs M_t^* untuk tsunami trans-Pasifik.

Berdasarkan fungsi eksponensial η vs M_t^* seperti terlihat pada Gambar 1, relasi antara η terhadap M_t^* untuk kasus tsunami trans-Pasifik dituliskan sebagai berikut,

$$M_t^* = 1,17 \log \eta + 9,44 \quad (9)$$

di mana digunakan bantuan konversi $\ln x = 2,303 \log x$. Koefisien korelasi $R^2 = 0,94$ pada Gambar 1 menunjukkan bahwa relasi antara η terhadap M_t^* adalah benar berbentuk eksponensial. Dengan kata lain, magnitudo tsunami terukur M_t^* merupakan fungsi logaritmik dari amplitudo tsunami η seperti terlihat pada persamaan (9) sesuai dengan temuan terdahulu (Abe, 1979; Abe, 1981; Satake *et al.*, 2020).

Meskipun persamaan (9) telah sesuai dengan temuan penelitian terdahulu, namun koefisien suku logaritmiknya belum berharga 1 seperti persamaan empiris terdahulu, khususnya jika dibandingkan dengan persamaan empiris temuan Satake *et al.* (2020) pada persamaan (8). Analisis matematis sederhana yang diterapkan pada persamaan (9) mengubah persamaan tersebut menjadi

$$M_t^* = \log \eta + 9,1 + 0,17 \log \eta + 0,34 \quad (10)$$

Dengan mengambil $\log \eta$ pada persamaan (10) tersebut sebagai perataan dari semua nilai logaritma η pada Tabel 1 atau Tabel 2, di mana $\log \eta = -0,81$ (perataan 18 kasus) kemudian mensubstitusikannya pada persamaan (10), maka diperoleh bentuk berikut,

$$M_t^* = \log \eta + 9,1 + 0,2 \quad (11)$$

Perbandingan langsung antara bentuk persamaan (11) dan persamaan (8) memberikan $\Delta = 0,20$ sekaligus memberikan pemahaman bahwa estimasi magnitudo tsunami berbasis rumusan Satake *et al.* (2020) dan dalam penelitian ini adalah *underestimate* terhadap nilai referensi M_w gempa pemicu tsunami yang diberikan oleh USGS. Dalam konteks radiasi energi gempa dan aspek *transport of energy* dari fenomena gempa menuju fenomena tsunami, maka wajar jika energi tsunami yang diukur oleh magnitudo tsunami memiliki nilai yang lebih kecil daripada energi gempa yang diukur oleh magnitudo gempa.

Kasus Tsunami Indonesia

Tabel 3 memberikan 7 tsunami di perairan Indonesia yang dibangkitkan oleh gempa besar $M_w \geq 7,5$. Seluruh kasus terjadi di perairan barat Pulau Sumatera, sehingga radiasi energi tsunami terjadi di Samudera Hindia.

Tabel 3. Data 7 kasus tsunami Indonesia.

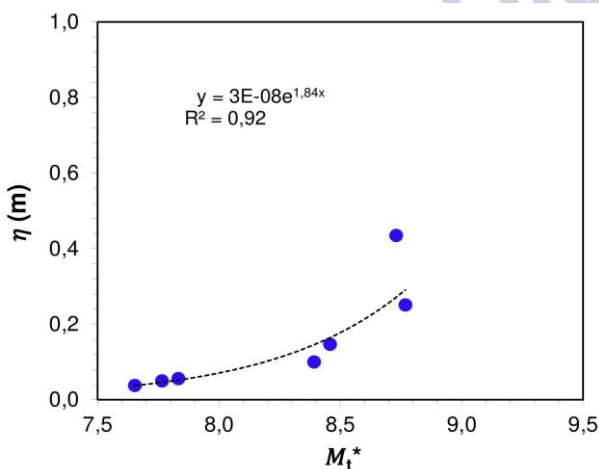
No	Nama Kasus	M_w	Episenter Tsunami		η (m)	M_t
			Bujur	Lintang		
1	Aceh 2004	9,0	95,98° BT	3,30° LU	0,25	8,5
2	Nias 2005	8,6	97,01° BT	2,07° LU	0,44	8,7
3	Sumatera 2007	8,5	101,37° BT	4,44° LS	0,15	8,3
4	Mentawai 2010	7,7	97,13° BT	2,36° LU	0,04	7,4
5	Sumatera 2010	7,8	100,11° BT	3,48° LS	0,06	7,8
6	Sumatera 2012	8,6	93,06° BT	2,33° LU	0,10	8,1
7	Sumatera 2016	7,8	94,28° BT	4,91° LS	0,05	7,6

Analogi dengan kasus tsunami trans-Pasifik, nilai η dan M_t pada 7 kasus tsunami Indonesia diperoleh dari perataan terhadap nilai yang diberikan oleh masing-masing instrumen ukur pada stasiun pemantau. Hasil perhitungan M_t masih terpaut relatif jauh dari nilai M_w (USGS) karena belum dilakukan kalibrasi seperti pada penelitian terdahulu yang relevan (Abe, 1979; 1981; Satake *et al.*, 2020). Dengan faktor koreksi Δ (antara -0,6 sampai 0,3) harus diperhitungkan juga dalam proses perhitungan magnitudo tsunami, maka Tabel 3 diperbaiki menjadi Tabel 4.

Tabel 4. Data 7 kasus tsunami di perairan Indonesia dengan melibatkan faktor koreksi Δ dan M_t^* .

No	Nama Kasus	M_w	η (m)	M_t	Δ	M_t^*
1	Aceh 2004	9,0	0,25	8,5	0,3	8,8
2	Nias 2005	8,6	0,44	8,7	0,0	8,7
3	Sumatera 2007	8,5	0,15	8,3	0,2	8,5
4	Mentawai 2010	7,7	0,04	7,4	0,3	7,7
5	Sumatera 2010	7,8	0,06	7,8	0,0	7,8
6	Sumatera 2012	8,6	0,10	8,1	0,3	8,4
7	Sumatera 2016	7,8	0,05	7,6	0,2	7,8

Estimasi M_t^* dari persamaan (8) pada Tabel 4 tidak berbeda jauh dari M_w (Carvajal *et al.*, 2017), di mana penyimpangan terhitung sebagai standar deviasi (STD) hanya 0,12 dibandingkan dengan penyimpangan estimasi M_t dari persamaan (7) terhitung sebagai STD sebesar 0,23. Gambar 2 berikut memberikan ilustrasi kebergantungan η terhadap M_t^* dalam bentuk fungsi eksponensial. Sekali lagi diperoleh hasil hitung di mana penyimpangan M_t^* adalah separuh dari penyimpangan M_t relatif terhadap nilai M_w yang diberikan oleh USGS. Gambar 2 berikut memberikan ilustrasi kebergantungan η terhadap M_t^* untuk 7 kasus tsunami Indonesia.



Gambar 2. Plot η vs M_t^* untuk kasus tsunami Indonesia.

Berdasarkan fungsi eksponensial η vs M_t^* seperti terlihat pada Gambar 1, relasi antara η terhadap M_t^* untuk

kasus tsunami Indonesia dituliskan sebagai berikut,

$$M_t^* = 1,25 \log \eta + 9,41 \tag{12}$$

di mana digunakan bantuan konversi $\ln x = 2,303 \log x$. Koefisien korelasi $R^2 = 0,92$ (Gambar 2) menunjukkan sekali lagi bahwa relasi antara η terhadap M_t^* adalah benar merupakan fungsi eksponensial, oleh karena itu magnitudo tsunami M_t^* merupakan fungsi logaritmik amplitudo tsunami η seperti terlihat pada persamaan (12) sesuai dengan temuan terdahulu (Abe, 1979; Abe, 1981; Satake *et al.*, 2020).

Analogi dengan kasus tsunami trans-Pasifik, maka persamaan (12) diubah

$$M_t^* = \log \eta + 9,1 + 0,25 \log \eta + 0,31 \tag{13}$$

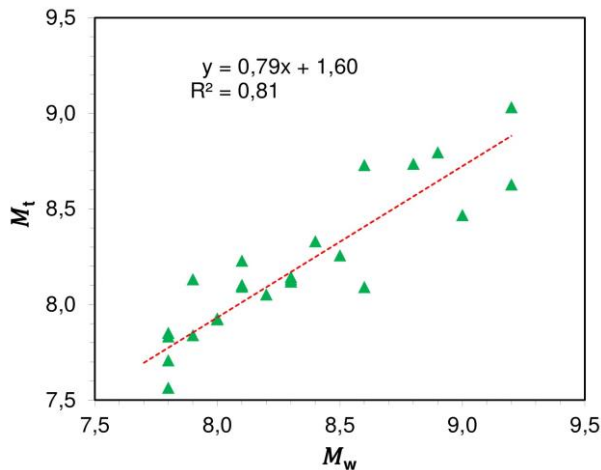
Dengan mengambil $\log \eta$ pada persamaan (13) tersebut sebagai perataan dari semua nilai logaritma η pada Tabel 3 atau Tabel 4, di mana $\log \eta = -0,97$ (perataan 7 kasus) kemudian mensubstitusikannya pada persamaan (13), maka diperoleh bentuk berikut,

$$M_t^* = \log \eta + 9,1 + 0,07 \tag{14}$$

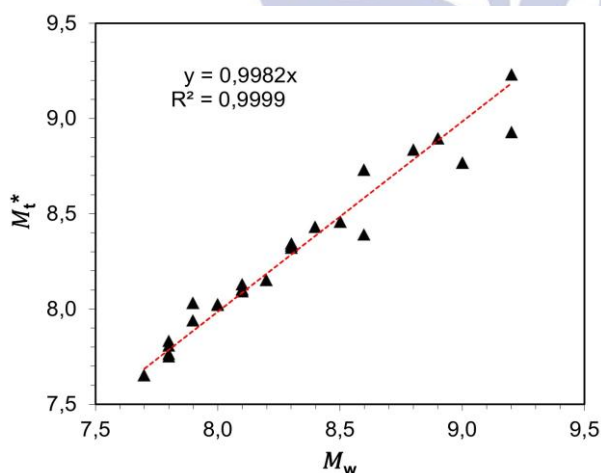
Perbandingan antara persamaan (14) dan (8) memberikan $\Delta = 0,07$ sekaligus pemahaman bahwa estimasi magnitudo tsunami berbasis rumusan Satake *et al.* (2020) dan dalam penelitian ini adalah *underestimate* terhadap M_w (USGS). Hal ini berarti dalam proses transmisi energi dari kejadian gempa menuju pembangkitan tsunami ada sebagian energi yang hilang. Energi yang hilang tersebut terdeteksi sebagai data statistik, di mana magnitudo tsunami terukur lebih kecil daripada magnitudo gempa.

Perbedaan yang cukup signifikan antara $\Delta = 0,2$ untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan $\Delta \approx 0,1$ untuk kasus tsunami Indonesia (dalam batas tertentu bisa disebut sebagai tsunami lintas Samudera Hindia) sebagai ‘faktor jarak’ dalam konteks persamaan empiris (8) dari Satake *et al.* (2020) ditemukan dalam penelitian ini. Namun, analisis data η menunjukkan ketidakbergantungan pada faktor jarak episentral (jarak dari episenter tsunami menuju stasiun pemantau). Misalnya, η yang terukur oleh instrumen pada stasiun pemantau jauh bisa saja memberikan nilai yang lebih besar daripada nilai yang diberikan oleh instrumen pada stasiun pemantau dekat. Hal ini menunjukkan bahwa *tsunami directivity* ikut menentukan variasi η terhadap jarak episentral. Penelitian terdahulu mengungkap faktor yang mempengaruhi variasi η terhadap jarak episentral. Misalnya, kompleksitas topografi dan batimetri yang berbeda antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia (Rabinovich *et al.*, 2011; Prastowo *et al.*, 2018; Prastowo *et al.*, 2019). Dengan demikian, perbedaan nilai Δ untuk kedua kasus tsunami lintas samudera yang ditinjau dalam penelitian ini bisa dipandang sebagai perbedaan karakteristik perambatan gelombang tsunami pada kedua samudera dengan variasi hambatan geofisik. Selain itu, ketersediaan data tsunami Indonesia relatif lebih sedikit daripada tsunami lintas Samudera Pasifik karena keterbatasan instrumen pemantau tsunami (DARTs dan *tide gauges*) di Samudera Hindia yang relatif lebih sedikit.

Persamaan empiris yang mendiskripsikan relasi antara magnitudo tsunami dan amplitudo tsunami telah ditemukan, yaitu persamaan (11) untuk kasus trans-Pasifik dan persamaan (14) untuk tsunami di perairan Indonesia. Berikut adalah analisis seberapa dekat estimasi magnitudo tsunami terhadap magnitudo gempa pemicu tsunami. Agar lebih jelas, maka analisis diberikan melalui inspeksi visual terhadap sebaran data M_t relatif terhadap M_w (Gambar 3) dan M_t^* relatif terhadap M_w (Gambar 4) dari USGS yang berfungsi sebagai referensi.



Gambar 3. Plot M_t vs M_w untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan di perairan Indonesia.



Gambar 4. Plot M_t^* vs M_w untuk kasus tsunami lintas Samudera Pasifik dan di perairan Indonesia.

Berdasarkan Gambar 3 dan Gambar 4 di atas, maka terlihat bahwa sebaran data M_t^* vs M_w lebih rapat dengan $R^2 \approx 1$ daripada sebaran data M_t vs M_w dengan $R^2 \approx 0,8$. Oleh karena itu, estimasi magnitudo tsunami M_t^* berbasis persamaan (8) yang mengadopsi metodologi penelitian terdahulu (Abe, 1979; 1981; Satake *et al.*, 2020) untuk kasus tsunami trans-Pasifik dan di perairan Indonesia dengan simpangan ukur sebesar $\Delta \leq 0,2$ dinyatakan valid. Prediksi Carvajal *et al.* (2017) yang menyatakan bahwa tidak ada perbedaan signifikan antara magnitudo gempa

dan magnitudo tsunami untuk kasus tsunami oleh gempa besar di wilayah timur Pasifik juga terbukti, sebagaimana juga telah dibuktikan untuk tsunami di wilayah barat Pasifik (Abe, 1985; 1989).

Bentuk persamaan empiris $M_t = \log \eta + 9,30$ untuk kasus tsunami trans-Pasifik dan $M_t = \log \eta + 9,17$ untuk kasus tsunami Indonesia temuan penelitian ini (di mana pergantian simbol $M_t^* \rightarrow M_t$ telah dilakukan) adalah identik dengan temuan terdahulu (Papadopoulos, 2003; Okal *et al.*, 2014; Heidarzadeh *et al.*, 2018) yang menyatakan bahwa magnitudo gempa pemicu tsunami adalah fungsi logaritmik amplitudo maksimum tsunami untuk *far-field observations*. Dengan memperhatikan temuan penelitian ini dan bahasan yang relevan dari penelitian terdahulu (Schubert, 2015; Suppasri *et al.* 2015; Yanasigawa *et al.*, 2016), maka studi *paleo-tsunami* (Satake *et al.*, 2020) menjadi lengkap dengan peluang deteksi dini tsunami melalui *coastal measurements* seperti yang dilaporkan Song *et al.* (2007).

PENUTUP

Salah satu sumber pembangkit gelombang tsunami adalah gempa tektonik bawah laut dengan dampak yang dihasilkan berskala luas bisa mencapai lintas samudera. Oleh karena itu, penelitian tentang relasi parameter tsunami dan sumber gempa pemicu tsunami tersebut adalah penting. Penelitian ini mengacu pada penelitian Satake *et al.* (2020) tentang analisis hubungan antara magnitudo tsunami dan amplitudo maksimum tsunami. Kasus yang dibahas adalah 18 tsunami trans-Pasifik dan 7 tsunami Indonesia, di mana semua kasus dipicu oleh gempa besar dengan $M_w \geq 7,5$. Untuk kasus tsunami trans-Pasifik, persamaan empiris hasil penelitian adalah $M_t = \log \eta + 9,30$ sedangkan untuk kasus tsunami Indonesia, $M_t = \log \eta + 9,17$. Perbedaan kedua persamaan empiris tersebut karena perbedaan batimetri dan topografi antara Samudera Pasifik dan Samudera Hindia. Selain itu, *tsunami directivity* dan keterbatasan instrumen pemantau tsunami untuk kawasan Samudera Hindia juga ikut berpengaruh. Untuk semua kasus dalam penelitian ini, penyimpangan estimasi M_t terhadap magnitudo momen M_w adalah $\Delta \leq 0,2$. Hasil-hasil penelitian ini bisa meningkatkan pemahaman karakteristik perambatan gelombang tsunami sebagai bagian dari upaya mitigasi bahaya bencana tsunami di Indonesia.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada NOAA untuk akses data sekunder penelitian ini secara gratis dari https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html <http://ngdc.noaa.gov>. Penulis menyampaikan terimakasih kepada 2 orang *reviewers* yang bertindak sebagai penguji dan telah memberi masukan/kritik/komentar bermanfaat untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abe, K. 1979. Size of great earthquakes of 1837-1974 inferred from tsunami data. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, No. B4, pp. 1561-1568.
- Abe, K. 1981. Physical size of tsunamigenic earthquakes of the northwestern Pacific. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 27, pp. 194-205.
- Abe, K. 1985. Quantification of major earthquake tsunamis of the Japan Sea. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, Vol. 38, pp. 214-223.
- Abe, K. 1989. Quantification of tsunamigenic earthquakes by the M_t scale. *Tectonophysics*, Vol. 166, pp. 27-34.
- Carvajal, M., Cisternas, M., Gubler, A., Catalán, P. A., Winckler, P. and Wesson, R. L. 2017. Reexamination of the magnitudes for the 1922 Chilean earthquakes using Japanese tsunami amplitudes: implications for source depth constraints. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 122, Issue 1, pp. 4-17.
- Cipta, A., Robiana, R., Griffin, J. D., Horspool, N., Hidayati, S. and Cummins, P. 2016. A probabilistic seismic hazard assessment for Sulawesi, Indonesia. In: Cummins, P.R. & Meilano, I. (eds) Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441.
- Cummins, P. R. 2017. Geohazards in Indonesia: Earth science for disaster risk reduction—introduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441, pp. 1-7.
- Harris, R. and Major, J. 2016. Waves of destruction in the East Indies: the Wichmann catalogue of earthquakes and tsunami in the Indonesian region from 1538 to 1877. In: Cummins, P.R. & Meilano, I. (eds) Geohazards in Indonesia: Earth Science for Disaster Risk Reduction. *Geological Society of London: Special Publications*, Vol. 441.
- Hatori, T. 1996. Tsunami magnitudes in Taiwan, the Philippines and Indonesia. *Natural Hazard Mitigation*, Vol. 38, No. 3, pp. 313-319.
- 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.
- 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.
- Papadopoulos, G. A. 2003. *Quantification of tsunamis: a review*. NATO Advance Research and Workshop Underwater Ground Failures on Tsunami Generation, Modeling, Risk and Mitigation, Kluwer Academic Publishing, Istanbul, May 23-26, 2001, pp. 285-289.
- 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.
- 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.
- 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*, Vol. 170, pp. 1567-1582.
- 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.
- Satake, K., Heidarzadeh, M., Quiroz, M. and Cienfuegos, R. 2020. History and features of trans-oceanic tsunamis and implications for paleo-tsunami studies. *Earth-Science Reviews*, Vol. 202, No. 103112.
- Schubert, G. 2015. *Tsunamis*, in Treatise on Geophysics (Second Edition), Vol. 4, Elsevier: Netherland, pp. 477-504, eBook ISBN: 9780444538031.
- Song, Y. T. 2007. Detecting tsunami genesis and scales directly from coastal GPS stations. *Geophysical Research Letters*, Vol. 34, No. L19602.
- Suppasri, A., Goto, K., Muhari, A., Ranasinghe, P., Riyaz, M., Affan, M., Mas, E., Yasuda, M. and Imamura, F. 2015. A decade after the 2004 Indian Ocean Tsunami: the progress in disaster preparedness and future challenges in Indonesia, Sri Lanka, Thailand and Maldives. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.

172, pp. 3313-3341.

Ward, S. N. 2011. *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics: Tsunami*. Edited by Harsh K. Gupta. National Geophysical Research Institute (NGRI). Council of Scientific and Industrial Research (CSIR). Springer Netherlands: Dordrecht, Netherlands, 1-1539.

Yanagisawa, H., Goto, K., Sugawara, D., Kanamaru, K., Iwamoto, N. and Takamori, Y. 2016. Tsunami earthquake can occur elsewhere along the Japan trench—Historical and geological evidence for the 1677 earthquake and tsunami. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Vol. 121, pp. 3504-3516.