

ANALISIS ATENUASI ENERGI TSUNAMI TERHADAP JARAK EPISENTRAL

Isnanto Haris

Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya
isnantoharis@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilaksanakan dengan tujuan mempelajari dinamika perambatan gelombang tsunami dari titik episenter menuju zona medan jauh dan mempelajari mekanisme pelemahan amplitudo tsunami terhadap jarak episentral. Beberapa faktor baik internal maupun eksternal bisa diajukan sebagai penyebab pelemahan energi dan amplitudo tsunami. Penelitian ini menganalisis fenomena pelemahan energi tsunami pada kasus Tohoku 2011, Chili 2010, dan Samoa 2009. Mekanisme pelemahan energi yang terukur sebagai pelemahan amplitudo tsunami terbagi menjadi 2 fase. Fase awal yang terjadi 1 jam sesudah OT tsunami merupakan konversi energi. Fase kedua terjadi sekitar 2-3 jam kemudian, di mana konversi energi antara energi potensial gravitasi dan energi kinetik sudah tidak terjadi lagi. Pada fase ini, energi total gelombang tsunami memiliki nilai yang relatif konstan. Dari ketiga grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap jarak episentral sebagai temuan utama penelitian skripsi ini berhasil mengungkap mekanisme pelemahan energi dan amplitudo tsunami. Selain itu, tiga grafik atenuasi amplitudo tersebut juga berhasil menunjukkan bahwa pelemahan energi dan amplitudo tsunami berlangsung paling cepat untuk kasus Samoa 2009 dan paling lambat untuk kasus Chili 2010.

Kata Kunci: atenuasi, energi, jarak, gelombang.

PENDAHULUAN

Tsunami adalah fenomena perambatan gelombang di permukaan laut karena dua alasan utama. Pertama, tsunami memiliki besaran karakteristik gelombang, yaitu frekuensi (periode) dan panjang gelombang. Kedua, saat merambat tsunami secara fisis memindahkan energi dalam ruang spasial. Saat berpindah dari wilayah yang satu ke wilayah lain di lautan, energi tsunami menunjukkan perilaku tertentu seiring bertambahnya jarak tempuh. Energi tsunami melemah selama perambatan dari lokasi episenter tsunami, di mana pelemahan energi tsunami bisa dideteksi melalui pelemahan amplitudo tsunami (Inazu and Saito, 2013; Allgeyer and Cummins, 2014; Watada *et al.*, 2014).

Pelemahan energi dan amplitudo tsunami merupakan salah satu parameter penting studi mitigasi bencana yang berguna untuk mengurangi risiko bencana. Penelitian tsunami sebelum ini yang relevan (Inazu and Saito, 2013; Allgeyer and Cummins, 2014; Watada *et al.*, 2014) menyatakan bahwa tsunami yang melintasi Samudra Pasifik dengan jarak tempuh lebih dari belasan ribu kilometer menunjukkan perbedaan sistematis antara waktu tempuh gelombang tsunami yang teramati dan hasil simulasi. Perbedaan waktu tempuh tersebut dikaitkan dengan variasi

kecepatan gelombang tsunami saat melaju menempuh jarak yang jauh. Variasi kecepatan tsunami yang memicu perbedaan waktu tempuh berhubungan dengan efek dispersi yang menyebabkan pelemahan energi dan amplitudo tsunami lintas samudera. Sebagai contoh dalam hal ini adalah kasus tsunami Aceh 2004 (Rabinovich *et al.*, 2011), tsunami Chili 2010 (Kato *et al.*, 2011; Fuji and Satake, 2013), dan tsunami Tohoku 2011 (Tang *et al.*, 2012; Grilli *et al.*, 2013), di mana waktu tempuh gelombang tsunami hasil simulasi adalah lebih cepat 15-20 menit daripada waktu tempuh gelombang tsunami di laut lepas (pengamatan lapangan).

Sebagaimana Dalam teori perambatan gelombang panjang non-dispersif, kecepatan fase gelombang tsunami tidak bergantung pada frekuensi melainkan hanya ditentukan parameter eksternal, yaitu kedalaman laut H . Menurut Kundu and Cohen (2002), kecepatan fase tsunami c seperti terlihat pada Gambar 2.1 diberikan oleh

$$c = (gH)^{1/2} \quad (2.1)$$

di mana g adalah percepatan gravitasi. Terlepas dari permukaan bola bumi yang tidak sempurna, percepatan gravitasi bumi yang ditulis oleh simbol g boleh dipertimbangkan konstan.

Analisis perambatan tsunami untuk medan jauh ternyata menunjukkan adanya perbedaan

waktu tempuh gelombang tsunami antara hasil simulasi dan pengamatan (Inazu and Saito, 2013). Kecepatan perambatan tsunami dipengaruhi oleh faktor eksternal yang berasal dari efek topografi dan deformasi dasar laut yang diberikan oleh persamaan berikut,

$$c = (gH)^{1/2}(1 - \beta)^{1/2} \quad (2.2)$$

di mana β adalah faktor yang mempresentasikan efek topografi dan deformasi dasar laut yang menyebabkan penurunan kecepatan relatif dibandingkan dengan persamaan (2.1) sebanyak 1-2%.

Faktor β pada persamaan (2.2) tersebut di atas ditentukan secara empiris melalui catatan perambatan tsunami yang diperoleh langsung dari pengukuran tekanan hidrostatik di dasar laut. Persamaan itu menunjukkan bahwa variasi kecepatan tsunami terjadi sepanjang arah utama perambatan tsunami di laut lepas (Watada *et al.*, 2013). Variasi kecepatan tsunami ini menyebabkan perbedaan waktu tempuh tsunami antara nilai yang diperkirakan dari simulasi numerik dengan menggunakan model perambatan dan yang diperoleh dari pengamatan langsung (Allgeyer and Cummins, 2014; Cholifah and Prastowo, 2017).

Tsunami merambat menjauh dari lokasi episenter karena energi kinetik yang diperoleh dari konversi energi potensial yang dibangkitkan oleh aktivitas tektonik bawah laut. Persamaan (2.2) menceritakan variasi kecepatan tsunami terhadap jarak perambatan diukur dari titik episenter. Variasi kecepatan tersebut bisa juga dipelajari melalui fenomena atenuasi energi tsunami (Rabinovich *et al.*, 2013) yang direpresentasikan oleh persamaan berikut,

$$E(t) = E_0 e^{-\delta t} \quad (2.3)$$

di mana E_0 adalah indeks energi tsunami, δ adalah koefisien pelemahan atau atenuasi energi dan t adalah waktu pelemahan atau atenuasi perambatan tsunami. Contoh faktual kasus atenuasi energi tsunami dapat dipelajari dari kasus tsunami Aceh 2004 di Samudra Hindia (Rabinovich *et al.*, 2011), tsunami Samoa 2009, dan Chili 2010, serta Tohoku 2011 di Samudra Pasifik (Rabinovich *et al.*, 2013). Menurut persamaan teoritik (2.3), energi tsunami diprediksi akan melemah secara eksponensial seiring dengan bertambahnya waktu tempuh dan jarak tempuh.

Prastowo and Cholifah (2017) mempresentasikan atenuasi energi tsunami yang terukur melalui pelemahan atau atenuasi amplitudo gelombang tsunami. Gagasan fundamentalnya adalah amplitudo merupakan ukuran besar kecilnya energi gelombang seperti terlihat dari konsep fisis gelombang merupakan getaran yang merambat dalam ruang, di mana energi mekanik getaran sebanding dengan kuadrat amplitudo.

$$E = \frac{1}{2} k A^2 \quad (2.4)$$

di mana E menyatakan energi mekanik getaran, A menyatakan amplitudo getaran, dan k adalah konstanta yang bergantung pada karakteristik sistem yang bergetar.

METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian Penelitian ini merupakan penelitian penerapan karena menerapkan teori fisika yang relevan dengan atenuasi energi tsunami terhadap jarak episentral (Rabinovich *et al.*, 2011; Rabinovich *et al.*, 2013; Prastowo and Cholifah, 2017) dengan menggunakan data sekunder yang menjadi input untuk menganalisis perilaku energi tsunami yang teramati sebagai atenuasi amplitudo tsunami. Atenuasi amplitudo tsunami disebabkan beberapa faktor, salah satunya adalah deformasi dasar laut. Hubungan kualitatif efek deformasi dasar laut pada kecepatan tsunami dirumuskan persamaan (2.2) sedangkan persamaan analitik atenuasi amplitudo digambarkan persamaan (2.3). Luaran yang diharapkan adalah dapat menganalisis perilaku energi tsunami di laut lepas (zona propagasi) melalui uji kesesuaian antara grafik atenuasi amplitudo tsunami hasil penelitian dan teori atenuasi energi untuk kasus tsunami Samoa 2009, Chili 2010, dan Tohoku 2011.

B. Variabel Operasional Penelitian

Definisi operasional menyangkut definisi yang digunakan dalam penelitian. Tiga variabel operasional penelitian, yaitu: variabel manipulasi, variabel respons, dan variabel kontrol. Untuk penelitian skripsi ini, variabel manipulasi adalah jarak tempuh gelombang tsunami dihitung dari titik episenter atau biasa dikenal sebagai jarak episentral (dalam satuan kilometer). Variabel respons dalam penelitian ini adalah parameter amplitudo maksimum atau *maximum tsunami amplitude* atau *vertical sea surface displacement* (dalam satuan meter)

yang dapat diperoleh dari rekaman data instrumen Deep-ocean Assessment Reports of Tsunamis (DART) *buoys and tide gauges* (https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html) untuk kasus tsunami (kejadian tsunami Samoa 2009, Chili 2010, dan Tohoku 2011). Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah ketiga kasus tsunami tersebut karena data atenuasi energi yang teramati sebagai atenuasi amplitudo tsunami terhadap jarak episentral dipelajari untuk setiap kasus tsunami besar yang melintasi Samudera Pasifik.

C. Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh dari data sekunder berupa *maximum amplitude* beserta jarak episentral terkait dari kasus tsunami besar Samoa 2009, Chili 2010, dan Tohoku 2011 (dari https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html) dan laman lain yang relevan, misalnya

- <https://nctr.pmel.noaa.gov/samoa20090929/> (Samoa)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/chile20100227/> (Chili)
- <https://nctr.pmel.noaa.gov/honshu20110311/> (Tohoku)

D. Teknik Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini hanya menggunakan aplikasi excel namun bisa mendiskripsikan perilaku energi dan amplitudo tsunami saat merambat di laut lepas (zona propagasi). Data jarak episentral dihitung dengan mengasumsikan permukaan bumi adalah datar sehingga jarak episentral pengamatan merupakan hipotenusa dari segitiga siku-siku yang dibentuk dari sisi-sisi selisih antara koordinat lintang dan bujur titik episenter tsunami dan lokasi stasiun atau instrumen pemantau tsunami di lapangan. Dalam proses menghitung jarak episentral ini digunakan pendekatan sebagai berikut: 1° bujur atau lintang ≈ 110 km dengan memasukkan data jari-jari bumi ≈ 6400 km.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pembahasan Hasil Penelitian

Bagian ini akan menganalisis hasil-hasil penelitian tentang atenuasi energi gelombang tsunami yang dapat dipelajari dan terukur melalui atenuasi amplitudo maksimum gelombang tsunami. Tiga kasus tsunami trans-Pasifik yang ditinjau

berturut-turut adalah kasus tsunami Tohoku 2011, Chili 2010, dan Samoa 2009. Fokus pembahasan adalah perbandingan antara hasil-hasil penelitian skripsi (terutama bentuk grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap jarak episentral, yaitu Gambar 4.3 untuk kasus Tohoku 2011, Gambar 4.6 untuk kasus Chili 2010, dan Gambar 4.9 untuk kasus Samoa 2009) dan persamaan teoritik pelemahan energi tsunami (2.3). Analisis terhadap bentuk grafik atenuasi amplitudo tsunami akan diberikan dalam konteks mekanisme fisis yang bertanggung jawab terhadap proses perambatan tsunami di laut terbuka. Hasil analisis akan dibandingkan dengan temuan utama Rabinovich *et al.* (2013) tentang *energy decay times* untuk ketiga kasus tsunami trans-Pasifik yang dikemukakan dalam penelitian ini.

Sebagaimana terlihat pada Gambar 4.3, Gambar 4.6, dan Gambar 4.9, amplitudo gelombang tsunami meluruh secara cepat pada tahap awal perambatan, yaitu sekitar 3-4 jam dihitung dari saat pembangkitan (*origin time* - OT tsunami) gelombang tsunami di laut terbuka. Selang waktu selama itu dapat disetarakan dengan waktu tempuh tsunami sekitar 3000 km dihitung dari titik episenter dan jarak tempuh sejauh itu biasa dikenal sebagai zona pengamatan medan dekat (Cholifah and Prastowo, 2017; Prastowo and Cholifah, 2017).

Temuan penelitian tersebut di atas menunjukkan bahwa sekurang-kurangnya ada 2 mekanisme fisis yang bisa menjelaskan bentuk grafik atenuasi amplitudo tsunami terhadap jarak episentral. Mekanisme pertama terjadi pada saat awal proses pembangkitan dan perambatan (3-4 jam dari OT tsunami atau ~ 3000 km dari episenter). Fase ini ditandai dengan pelemahan cepat amplitudo (energi) tsunami terutama pada 1 jam pertama sebagai akibat dari konversi energi dari energi potensial gravitasi yang tersedia untuk pembangkitan gelombang tsunami menjadi energi kinetik yang diperlukan untuk memulai gerak adveksi.

Mekanisme kedua atau fase berikutnya terjadi sesudah gelombang tsunami menempuh jarak episentral sejauh kurang lebih 3000 km yang setara dengan waktu tempuh 3-4 jam. Pada fase ini, gelombang tsunami mulai meninggalkan zona medan dekat menuju zona medan menengah. Fase ini ditandai dengan konservasi energi total gelombang tsunami, di mana energi total relatif

konstan (Figure 12a dari Tang *et al.*, 2012) selama perambatan tsunami di laut terbuka.

Diskripsi menarik juga bisa diperoleh apabila laju pelemahan amplitudo (energi) tsunami diperhatikan lebih cermat untuk ketiga kasus tsunami yang ditinjau dalam penelitian ini. Berdasarkan pengamatan visual grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak episentral pada Gambar 4.9, maka jelas terlihat amplitudo maksimum (energi) tsunami pada kasus Samoa 2009 melemah lebih cepat dibandingkan kasus Tohoku 2011 dan Chili 2010. Hal ini sesuai dengan temuan utama Rabinovich *et al.* (2013) yang menyatakan bahwa tsunami Samoa 2009 memiliki waktu pelemahan energi paling singkat (17,3 jam) dibandingkan dengan Tohoku 2011 (24,6 jam) dan Chili (24,7 jam). Meskipun penelitian ini tidak mengukur pelemahan energi tsunami secara langsung, namun mampu mengungkap tsunami yang melemah paling cepat.

Bagian penutup pembahasan adalah terkait dengan temuan penelitian bahwa semua grafik atenuasi amplitudo maksimum tsunami terhadap jarak episentral untuk kasus tsunami Tohoku 2011, Chili 2010, dan Samoa 2009 memiliki nilai koefisien korelasi $R^2 > 0,80$. Hal ini berarti korelasi matematis antara variabel manipulasi penelitian (jarak episentral) dan variabel respons penelitian (amplitudo maksimum) adalah sesuai dengan bentuk persamaan empiris yang dihasilkan oleh sekumpulan *datasets* dari masing-masing kasus tsunami yang ditinjau.

PENUTUP

Simpulan

Tsunami sebagai fenomena alam gelombang permukaan di laut terbuka mengalami pelemahan energi yang terdeteksi dan terukur melalui pelemahan amplitudo (Inazu and Saito, 2013; Watada *et al.*, 2014). Beberapa faktor baik internal maupun eksternal bisa diajukan sebagai penyebab pelemahan energi dan amplitudo tsunami, misalnya efek dispersi gelombang dan stratifikasi air laut (efek internal) serta topografi dasar laut (efek eksternal).

Mengikuti ide Rabinovich *et al.* (2013), maka penelitian ini menganalisis fenomena pelemahan energi tsunami pada kasus Tohoku 2011, Chili 2010, dan Samoa 2009, di mana untuk kasus Tohoku 2011,

Prastowo and Cholifah (2017) telah melaporkan pelemahan amplitudo maksimum tsunami trans-Pasifik terhadap jarak episentral. Berikut adalah beberapa temuan penting penelitian skripsi ini. Saat merambat dari lokasi sekitar episenter dalam daerah medan dekat menuju daerah medan jauh, gelombang tsunami mengalami reduksi kecepatan karena efek internal dan eksternal (Cholifah and Prastowo, 2017). Reduksi kecepatan ini bisa menjadi penyebab pelemahan energi tsunami.

Mekanisme pelemahan energi yang terukur sebagai pelemahan amplitudo tsunamiterbagi menjadi 2 fase. Fase awal yang terjadi 1 jam sesudah OT tsunami merupakan konversi energi dari energi potensial gravitasi menjadi energi kinetik yang ditandai dengan pelemahan energi dan amplitudo maksimum secara cepat. Fase kedua terjadi sekitar 2-3 jam kemudian, di mana konversi energi antara energi potensial gravitasi dan energi kinetik sudah tidak terjadi lagi. Pada fase ini, energi total gelombang tsunami memiliki nilai yang relatif konstan. Kedua fase ini digambarkan dengan baik oleh grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap jarak episentral pada Gambar 4.3 (Tohoku 2011), Gambar 4.5 (Chili 2010), dan Gambar 4.9 (Samoa 2009).

Meskipun memiliki persamaan empiris yang berbeda dengan prediksi teori pelemahan energi tsunami, tiga grafik atenuasi amplitudo maksimum terhadap jarak episentral sebagai temuan utama penelitian skripsi ini berhasil mengungkap mekanisme pelemahan energi dan amplitudo tsunami yang sesuai dengan temuan Tang *et al.* (2012). Selain itu, tiga grafik atenuasi amplitudo tersebut juga berhasil menunjukkan bahwa pelemahan energi dan amplitudo tsunami berlangsung paling cepat untuk kasus Samoa 2009 dan paling lambat untuk kasus Chili 2010 sesuai dengan temuan Rabinovich *et al.* (2013).

Saran

Pelemahan energi dan amplitudo tsunami merupakan salah satu parameter penting studi mitigasi bencana kebumihantaran terkait bahaya bencana tsunami yang berguna untuk mengurangi risiko bencana sampai sekecil mungkin. Oleh karena dinamika perambatan gelombang tsunami dapat dibedakan menjadi 3 bagian, yaitu zona generasi, propagasi, dan mitigasi (daerah dekat pantai dan

daratan), maka sangat baik bila sesudah ini dirancang penelitian lanjutan yang membahas fenomena perubahan tinggi gelombang tsunami akibat perubahan kedalaman laut saat gelombang tsunami mendekati garis pantai. Penelitian lanjutan ini berbasis dinamika perambatan tsunami dalam zona propagasi dan mitigasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Allgeyer, S. and Cummins, P. 2014. Numerical tsunami simulation including elastic loading and seawater density stratification. *Geophysical Research Letter*, Vol.41, doi:10.1002/2014GL059348, pp.2368-2375.
- Cholifah, L. 2016. *Estimasi anomali lokal medan magnet bumi akibat perambatan gelombang tsunami dalam perspektif teori dinamo aliran air laut*. Skripsi. Tidak dipublikasikan. Jurusan Fisika, FMIPA, Unesa.
- Cholifah, L. and Prastowo, T. 2017. Travel time difference between estimated and observed values of the 2011 trans-oceanic Tohoku tsunami. *Proceedings of The 7th Basic Science International Conference*, Vol.1, ISSN.2338-0128, pp.93-95.
- 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, doi:10.1007/s00024-012-0555-8, pp.1295-1307.
- Grilli, S. T., Harris, C., Bakhsh, T. S. T., Masterlark, T. L., Kyriakopoulos, C., Kirby, J. T., Shi, F. 2013. Numerical simulation of the 2011 Tohoku tsunami based on a new transient FEM co-seismic source: comparison to far- and near-field observations. *Pure and Applied Geophysics*, Vol.170, doi:10.1007/s00024-021-0528-y, pp.1333-1359.
- Inazu, D. and Saito, T. 2013. Simulation of distant tsunami propagation with a radial loading deformation effect. *Earth Planets Space*, Vol.65, pp.835-842.
- Kato, T., Terada, Y., Nishimura, H., Nagai, T., Koshimura, S. 2011. Tsunami records due to the 2010 Chile earthquake observed by GPS buoys established along the Pasific coast of Japan. *Earth Planets Space*, Vol.63, pp.e5-e8.
- Kundu, P. K., and Cohen, I. M. 2002. *Fluid Mechanics*. San Diego: Academic Press, US. pp.1-730.
- Prastowo, T. and Cholifah, L. 2017. A systematic decrease in tsunami amplitude with epicentral distance. *Proceedings of The 7th Basic Science International Conference*, Vol.1, ISSN.2338-0128, pp.89-92.
- 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, doi:10.1007/s00024-011-0279-1, 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, doi:10.1002/grl.50625, pp.3157-3162.
- 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., Gica, E. 2012. Direct energy estimation of the 2011 Japan tsunami using deep-ocean pressure measurments. *Journal of Geophysical Research*, Vol.117, doi:10.1029/2011JC007635, pp.1-28.
- Tjasyono, B. 2017. *Sains kebunian dan antariksa*. Unesa University Press, Surabaya.
- 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, doi:10.1002/grl.50147, pp.492-496.
- Watada, S. 2013. Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans. *Geophysics Research Letters*, Vol.40, doi:10.1002/grl.50785, pp.4001-4006.
- Watada, S., Kusumoto, S. and Satake, K. 2014. Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic earth. *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, Vol.119, doi:10.1002/2013JB010841, pp.4287-4310.
- Yonghai, C. and Jiancheng, L. 2014. Extraction of two tsunamis signals generated by earthquakes around the Pacific rim. *Geodesy Geodynamics*, Vol.5, No.2, doi:10.3724/SP.J.1246.2014.02038, pp.38-47.