

MEKANIKA PERAMBATAN GELOMBANG TSUNAMI: STUDI KASUS TSUNAMI TELUK PALU DAN SELAT SUNDA TAHUN 2018

Roifatu Diana Zain, Tjipto Prastowo

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

Email: roifatu.18057@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Pemahaman mekanika perambatan gelombang tsunami adalah penting dalam studi mitigasi bencana tsunami. Aspek kinematik menjelaskan fenomena *tsunami time delay* dan aspek dinamik menjelaskan fenomena *tsunami run-up*. *Time delay* dihitung sebagai selisih waktu antara kedatangan gelombang tsunami dan estimasi waktu tiba berdasarkan aproksimasi *shallow water* dimana tsunami bergerak dengan kecepatan yang hanya bergantung pada kedalaman lokal. Estimasi *run-up* diuji menggunakan Hukum Green dengan hanya mempertimbangkan efek pendangkalan pantai dan Hukum Green yang telah dimodifikasi dengan menyertakan efek refraksi gelombang tsunami saat mendekati pantai. Tujuan penelitian adalah menguji apakah aspek kinematik dan dinamik perambatan gelombang tsunami berlaku untuk kasus tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda pada tahun 2018. Data penelitian diperoleh dari NOAA (lembaga kredibel yang dikelola oleh pemerintah US) dan beberapa publikasi yang relevan. Hasil-hasil penelitian berupa grafik *time delay* yang menunjukkan bahwa *observed travel times* lebih besar dibandingkan dengan *estimated travel times*. Hal ini berarti tsunami datang terlambat ke tepi pantai akibat deformasi fisis dasar laut. Selain itu, juga diperoleh grafik *time delay* terhadap *travel distance*, dimana untuk Teluk Palu diperoleh $R^2 \approx 0,61$ sedangkan untuk Selat Sunda, $R^2 \approx 0,82$. Faktor geometri Teluk Palu dan Selat Sunda yang relatif sempit dibandingkan dengan Samudera Pasifik menjadi alasan mengapa R^2 tidak sebesar kasus trans-Pasifik seperti temuan penelitian terdahulu. Estimasi *run-up* berbasis modifikasi Hukum Green memberikan hasil perhitungan yang lebih baik dibandingkan dengan menggunakan Hukum Green yang hanya mempertimbangkan efek pendangkalan, dimana ada peningkatan akurasi estimasi *run-up* sebesar 2-3 kali lipat. Kesimpulan penting adalah aspek kinematik dan dinamik perambatan gelombang tsunami masih berlaku untuk tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda dengan penyimpangan terbatas karena faktor geometri lokasi kejadian.

Kata Kunci: *tsunami time delay, travel time, tsunami run-up, shallow water, hukum Green*

Abstract

Understanding of mechanics of tsunami wave propagation is important for hazard mitigation study. Kinematic aspects explain tsunami time delay and dynamic perspectives predict tsunami run-up. Time delay is defined as the time difference between recorded arrival time at a particular station and estimated arrival time on the wave arrival calculated by shallow-water approximation where tsunamis propagate at a depth-dependence speed. Run-up was estimated using basic Green's law, considering only shoaling effects and modified Green's law, incorporating effects of wave refraction into calculation when a tsunami approaches coastal lines. The aim of the study is to examine whether kinematic and dynamic aspects of tsunami propagation remain valid for the 2018 Palu Bay and Sunda Strait tsunamis. The data were obtained from NOAA (a credible institution managed by the US govt) and some relevant publications. The results were given in graphs of time delay, where observed travel times are larger than estimated ones for both cases. It follows that a tsunami arrives late at the coasts due to speed reduction by bottom deformation. Further, it was found that time delay is a function of travel distance with $R^2 \approx 0,61$ for the Palu Bay and $R^2 \approx 0,82$ for the Sunda Strait. The geometry of Palu Bay and Sunda Strait is relatively narrow compared to the Pacific, leading to a reduction in R^2 for both events in comparison to the previous findings. Modified run-ups provided better estimates than those calculated from the only basic shoaling, where an increase of 2-3 times higher in accuracy was confirmed. Both aspects of tsunami propagation for Palu Bay and Sunda Strait tsunamis remain valid despite some deviation owing to the local geometrical factors.

Keywords: *tsunami time delay, travel time, tsunami run-up, shallow water approximation, Green's law*

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara di dunia dengan cakupan wilayah teritorial yang rentan terhadap bencana geologi, termasuk tsunami, gempa tektonik, dan erupsi gunung api (Cummins, 2017). Penelitian berbagai

topik kebumihian yang relevan dengan kondisi tektonik Indonesia (Irsyam *et al.*, 2017; Nugraha *et al.*, 2018; Gunawan and Widiyantoro, 2019; Widiyantoro *et al.*, 2020; Hutchings and Mooney, 2021; Titov, 2021) juga telah menemukan potensi tinggi bahaya bencana seismik yang dipicu oleh sesar aktif sepanjang jalur busur Sunda Besar

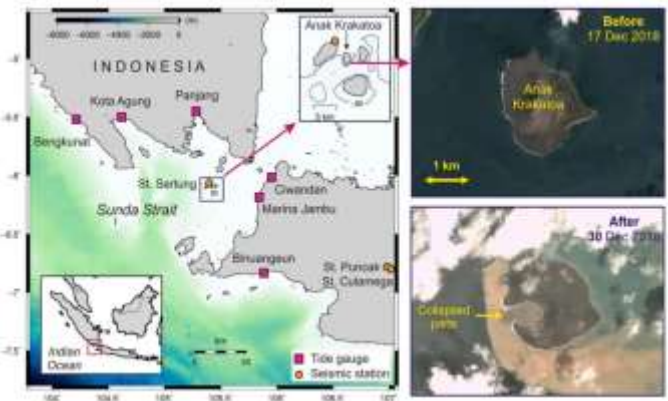
**Mekanika Perambatan Gelombang Tsunami:
Studi Kasus Tsunami Teluk Palu dan Tsunami Selat Sunda Tahun 2018**

dan Sunda Kecil sampai wilayah timur Indonesia.

Tsunami sebagai salah satu bencana geologi bisa dipicu oleh sumber seismik (sumber utama), misalnya gempa tektonik (Ward, 2011) dan sumber non-seismik, misalnya longsor bawah laut (Gusman *et al.*, 2019; Pakoksung *et al.*, 2019; Jing *et al.*, 2020) dan erupsi gunung api (Choi *et al.*, 2003; Fukao *et al.*, 2018; Sandanbata *et al.*, 2018; Muhari *et al.*, 2019; Heidarzadeh *et al.*, 2020b). Statistik studi kebencanaan di Indonesia (Irsyam *et al.*, 2017) mengatakan bahwa tsunami dan gempa tektonik adalah dua bencana seismik diantara bencana kebumihan dan non-kebumihan yang memberikan dampak paling parah di Indonesia. Hal inilah yang menjadi motivasi penelitian. Dengan demikian, sangat penting untuk mengetahui perilaku perambatan tsunami dari laut lepas (zona propagasi) menuju ke area pantai (zona mitigasi).

Penelitian ini menganalisis mekanika perambatan gelombang tsunami melalui pembahasan aspek kinematik (*tsunami time delay*) dan aspek dinamik (*tsunami run-up*). Dua studi kasus yang dipelajari adalah kasus tsunami terkini yang terjadi di Indonesia, yaitu tsunami Teluk Palu 28 September 2018 dan Selat Sunda 22 Desember 2018. Alasan pemilihan kedua kasus tersebut karena keunikan sumber pemicu tsunami, yaitu kombinasi gempa tektonik dan longsor bawah laut pada kasus tsunami Teluk Palu (Gusman *et al.*, 2019) serta kombinasi erupsi gunung api dan longsor badan gunung pada kasus tsunami Selat Sunda (Muhari *et al.*, 2019). Fokus perhatian penelitian adalah apakah perilaku perambatan gelombang tsunami pada kedua kasus tsunami tersebut masih mengikuti prinsip dasar seperti yang berlaku pada kasus tsunami yang dipicu oleh gempa tektonik murni atau tidak.

Tsunami Teluk Palu tanggal 28 September 2018 dipicu oleh gempa tektonik destruktif yang terekam pada jam 10:02 UTC (17:02 WIB) berkekuatan M_w 7,5 dan berpusat di Kabupaten Donggala, sekitar 77 km arah utara dari Kota Palu, Sulawesi Tengah (Patton *et al.*, 2019; Lahcene *et al.*, 2021). Gelombang tsunami menerjang daratan sepanjang wilayah Teluk Palu disertai dengan bencana likuefaksi. Kombinasi antara gempa tektonik, longsor bawah laut, tsunami dan likuefaksi sekaligus nyaris meluluhlantakkan wilayah pesisir dataran rendah sepanjang pantai Teluk Palu (Sassa and Takagawa, 2018; Takagi *et al.*, 2019; Widiyanto *et al.*, 2019). Tsunami Selat Sunda tanggal 22 Desember 2018 menyapu wilayah pesisir barat Propinsi Banten dan pesisir selatan Propinsi Lampung pada jam 14:38 UTC (21:38 WIB). Tsunami Selat Sunda dipicu oleh aktivitas erupsi beberapa bulan sampai sehari sebelum bencana tsunami dan keruntuhan sebagian badan atau lereng gunung (*flank-collapse*) Anak Rakata (Grilli *et al.*, 2019; Ren *et al.*, 2020) seperti terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Gunung Anak Rakata dan mekanisme keruntuhan badan gunung yang menjadi pemicu tsunami Selat Sunda 2018 (sumber: Heidarzadeh *et al.*, 2020a).

Penelitian ini fokus pada aspek kinematik (kecepatan dan waktu perambatan gelombang tsunami selama berada di zona propagasi) dan aspek dinamik (perubahan tinggi amplitudo gelombang tsunami saat tiba di zona mitigasi). Aspek kinematik menjelaskan fenomena *time delay*, yaitu keterlambatan kedatangan tsunami dibandingkan dengan estimasi waktu kedatangan di lokasi tertentu berdasarkan rumusan *long wave speed* di mana kecepatan gelombang tsunami diketahui hanya bergantung pada kedalaman laut (Choi *et al.*, 2003; Sorensen, 2006; Wessel, 2009; Watada *et al.*, 2014; Wang, 2015; Prastowo *et al.*, 2018; Jing *et al.*, 2020). Aspek dinamik menjelaskan fenomena *run-up* atau tinggi amplitudo tsunami saat tsunami tiba di daerah pantai yang dangkal (Synolakis, 1991; Reymond *et al.*, 2012; Cholifah and Prastowo, 2017a; Heidarzadeh *et al.*, 2020b). Dua efek penting, yaitu kasus pendangkalan pantai (*shoaling effect*) sebagai faktor eksternal dan efek refraksi gelombang sebagai faktor internal bersama diperhitungkan untuk menguji apakah estimasi *run-up* berbasis modifikasi Hukum Green (Cholifah and Prastowo, 2017a; Sandanbata *et al.*, 2018) memberikan kesesuaian yang lebih baik antara estimasi dan observasi.

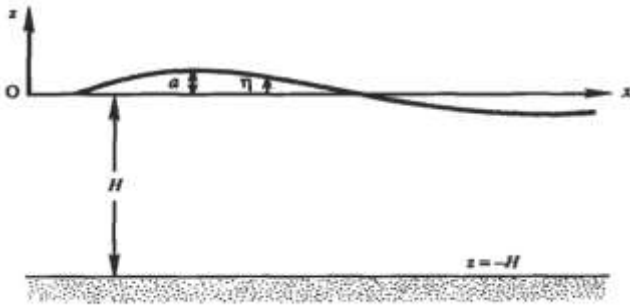
Aproksimasi *Shallow-Water*

Dinamika perambatan tsunami dipelajari melalui persamaan Navier-Stokes (Kundu and Cohen, 2002) yang berlaku untuk air laut yang bersifat fluida non-viskos. Asumsi berikutnya adalah aproksimasi Boussinesq, dimana variasi densitas air laut relatif kecil terhadap nilai densitas rata-rata (Kundu and Cohen, 2002). Asumsi penting lain adalah air laut bersifat inkompresibel sehingga berlaku *zero divergence* $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$ di mana \mathbf{u} adalah medan aliran air laut. Dengan mempertimbangkan semua asumsi dasar tersebut, maka dapat dituliskan persamaan gerak tsunami sebagai berikut,

$$\frac{\partial^2}{\partial t^2} (H + \eta) - g \frac{\partial}{\partial x} (H + \eta) \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

di mana H adalah kedalaman laut, η menyatakan elevasi muka laut, g adalah percepatan gravitasi Bumi. Kuantitas H

+ η adalah tinggi kolom air laut yang bervariasi sepanjang sumbu gerak (Gambar 2).



Gambar 2. Skema gangguan pada kolom air laut yang membangkitkan tsunami (sumber: Kundu and Cohen, 2002).

Dengan mempertimbangkan $\eta \ll H$, maka berlaku $H + \eta \approx H$ (H bersifat tetap) sehingga operasi matematis persamaan (1) menghasilkan bentuk

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gH \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

yang merepresentasikan persamaan gelombang tsunami dengan kecepatan yang dikenal sebagai *long wave speed*,

$$c = \sqrt{gH} \quad (3)$$

Persamaan (3) menunjukkan bahwa menurut aproksimasi *shallow-water*, kecepatan tsunami hanya dipengaruhi oleh kedalaman laut. Persamaan (3) tersebut digunakan untuk menghitung *travel time* yang dibutuhkan oleh tsunami untuk bergerak dari lokasi episenter menuju ke stasiun pengamatan.

Efek Deformasi Dasar Laut

Apabila dasar laut mengalami deformasi fisis, maka η adalah elevasi muka laut tanpa deformasi fisis dan $\eta_0 = \beta \eta$ adalah elevasi muka laut dengan deformasi fisis di mana β adalah kekuatan deformasi. Parameter $\eta - \eta_0$ menjadi kuantitas yang berfluktuasi selama gerak tsunami. Menurut Inazu and Saito (2013), persamaan gerak tsunami tidak lagi bisa dinyatakan oleh persamaan (2) melainkan

$$\frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} - gH(1 - \beta) \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

Persamaan (4) menjelaskan efek deformasi fisis dasar laut terhadap kecepatan tsunami pada persamaan (3) yang tereduksi karena faktor β . Bentuk eksplisit kecepatan tsunami akibat deformasi fisis dasar laut adalah

$$c = \sqrt{gH} \sqrt{1 - \beta} \quad (5)$$

Faktor β merupakan alasan mengapa tsunami terlambat datang dibandingkan dengan hasil simulasi berbasis *long wave speed*. Berdasarkan hal inilah, maka muncul istilah *time delay* (Inazu and Saito, 2013; Watada *et al.*, 2014; Wang, 2015; Cholifah and Prastowo, 2017b; Prastowo *et al.*, 2018).

Persamaan (5) bermanfaat untuk menganalisis *observed travel time* yang terbukti selalu lebih lama daripada *estimated travel time*. Selisih antara keduanya disebut sebagai *time delay* Δt (Wessel, 2009),

$$\Delta t = t_{\text{obs}} - t_{\text{est}} \quad (6)$$

di mana secara teoretik t_{obs} dan t_{est} dihitung dengan cara yang berbeda, yaitu *epicentral distance* (jarak terhitung dari lokasi episenter menuju lokasi stasiun pengamatan) dibagi dengan persamaan (5) dan persamaan (3).

Kerapatan Energi Tsunami

Untuk sistem fisis yang bergerak dalam pengaruh medan eksternal, energi total (mekanik) adalah jumlah dari energi kinetik dan energi potensial. Selama perambatan gelombang tsunami dari laut lepas menuju pantai dangkal, tidak ada energi mekanik yang hilang. Besaran yang sering digunakan untuk merepresentasikan energi total tsunami adalah kerapatan energi yang didefinisikan sebagai

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \rho g a^2 \quad (7)$$

di mana a menyatakan amplitudo maksimum tsunami (Gambar 2) dan ρ adalah densitas air laut. Persamaan (7) menjadi elemen penting penurunan Hukum Green untuk estimasi *tsunami run-up* (Cholifah and Prastowo, 2017a).

Perumusan Hukum Green

Besaran fluks energi tsunami menggambarkan seberapa cepat kerapatan energi tsunami dipindahkan dari satu lokasi ke lokasi lain di laut. Besaran ini bernilai tetap sepanjang sumbu gerak (Cholifah and Prastowo, 2017a) yang ditulis secara eksplisit sebagai kekekalan fluks energi tsunami dalam bentuk

$$H_1^{1/2} a_1^2 = H_2^{1/2} a_2^2 \quad (8)$$

Subscripts 1 dan 2 berturut-turut adalah lokasi *offshore* dan *onshore*. Persamaan (8) mendiskripsikan variasi amplitudo maksimum tsunami terhadap perubahan kedalaman lokal saat tsunami merambat (Synolakis, 1991).

Apabila simbol pada persamaan (8) diubah menjadi $H_1 = D$ dan $H_2 = d$ serta $a_1 = \eta$ dan $a_2 = R$, maka persamaan tersebut berubah menjadi

$$R = \left(\frac{D}{d}\right)^{1/4} \eta \quad (9)$$

di mana D dan d berturut-turut adalah kedalaman lokasi *offshore* dan *onshore* terkait pengamatan, dan R adalah tinggi elevasi muka laut di pantai (*run-up*). Persamaan (9) digunakan untuk estimasi *run-up* karena efek pendangkalan pantai (Sorensen, 2006).

Selain kedalaman lokal, efek geometri pantai juga ikut diperhitungkan dalam penelitian ini. Selama tsunami merambat di laut, maka tsunami mengalami efek refraksi, khususnya saat muka gelombang tsunami bertemu dengan perubahan kondisi fisis, misalnya perubahan kedalaman. Efek refraksi gelombang memberikan tambahan pelipatan amplitudo saat tsunami tiba di pantai. Kedua efek tersebut (pendangkalan pantai dan refraksi) dapat menentukan tinggi gelombang tsunami saat mendekati pantai. Oleh karena itu, kedua efek tersebut muncul bersama dalam estimasi *run-up* sekaligus sebagai koreksi terhadap persamaan (9).

Estimasi *run-up* dengan memperhitungkan efek

pendangkalan pantai dan refraksi bisa diturunkan dari konsep kekekalan fluks energi tsunami sebagai berikut,

$$H_1^{1/2} a_1^2 b_1 = H_2^{1/2} a_2^2 b_2 \quad (10)$$

Prosedur yang sama berlaku untuk simbol H dan a pada persamaan (10) sedangkan $b_1 = B$ dan $b_2 = b$ sehingga persamaan (10) berubah menjadi

$$R = \left(\frac{D}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{B}{b}\right)^{1/2} \eta \quad (11)$$

di mana B dan b berturut-turut menyatakan jarak antara dua muka gelombang tsunami yang berdekatan di *offshore* dan *onshore*. Persamaan (11) di atas merupakan estimasi *run-up* karena dua efek sekaligus, yaitu pendangkalan pantai dan refraksi gelombang (Sorensen, 2006; Cholifah and Prastowo, 2017a).

METODE

Dua masalah utama yang dibahas dalam penelitian ini adalah *time delay* dan *run-up*. Kedua masalah tersebut berturut-turut merepresentasikan aspek kinematik dan dinamik perambatan tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda. Aspek kinematik merupakan konsekuensi reduksi kecepatan tsunami akibat gangguan geofisis selama perambatan di laut. Rekaman data *travel time* dan *arrival time* mengalami keterlambatan datang (*time delay*) apabila dibandingkan dengan catatan yang diperoleh berdasarkan pendekatan *shallow-water*, di mana tsunami bergerak dengan kecepatan seperti ditulis pada persamaan (3). Aspek dinamik merupakan konsekuensi reduksi kecepatan tsunami saat mendekati pantai dangkal (*shoaling effect*), di mana amplitudo maksimum tsunami yang teramati menjadi berlipat (dibandingkan dengan amplitudo maksimum tsunami saat berada di laut lepas). Hal ini untuk menjamin kekekalan kerapatan energi dan volume air laut untuk dua kondisi fisis yang berbeda, yaitu *offshore* dan *onshore*.

Kedua aspek mekanik tersebut di atas dibuktikan melalui grafik *time delay* terhadap *travel distance* atau grafik *observed travel time* terhadap *estimated travel time* dan estimasi *run-up* berbasis hukum Green yang lengkap. Fokus bahasan adalah apakah estimasi *run-up* R_{est} akibat efek pendangkalan pantai (*shoaling effect*) mendekati nilai *run-up* yang diperoleh dari survei lapangan R_{obs} beberapa publikasi terdahulu yang relevan. Apabila tidak, maka *refraction* (efek refraksi gelombang) harus dipertimbangkan dalam estimasi.

Tiga variabel operasional dalam penelitian ini adalah variabel manipulasi, respons, dan kontrol. Untuk masalah *time delay*, variabel manipulasi adalah jarak dari episenter tsunami menuju ke lokasi stasiun monitoring tsunami (*travel distance*) sedangkan variabel respons adalah *travel time difference* antara *estimated travel time* dan *observed travel time*. Untuk masalah *run-up*, variabel manipulasi adalah batimetri lokasi instrumen ukur *tsunami*

wave height sedangkan variabel respons adalah *run-up* berdasarkan Hukum Green. Dalam kedua masalah penelitian tersebut, variabel kontrol adalah kasus tsunami Teluk Palu pada tanggal 28 September 2018 dan tsunami Selat Sunda pada tanggal 22 Desember 2018. Penelitian ini tidak membahas perdebatan sumber pemicu kejadian kedua kasus tsunami tersebut.

Data penelitian ini diperoleh dari beberapa sumber referensi yang kredibel dan relevan untuk masalah yang sedang dibahas, baik dari publikasi internasional di jurnal internasional bereputasi (terindeks Scopus dan berkategori Schimago Journal Ranking (SJR) Q1/Q2). Sumber data *online* juga diperoleh dari laman yang kredibel, misalnya <https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu.shtml> yang dikelola oleh (NGDC = National Geophysical Data Center, NOAA = National Oceanic and Atmospheric Administration). NGDC and NOAA adalah dua lembaga milik pemerintah US.

Selain sumber di atas, data penelitian diperoleh dari penelitian terdahulu yang relevan dengan kasus tsunami Teluk Palu 2018 dan Selat Sunda 2018 yang dikumpulkan dalam bentuk tabel yang berisi instrumen monitoring tsunami (*tide gauges* atau *surface buoys*) yang terdistribusi pada lokasi geografis yang berbeda. Data *travel distance* meliputi data pengamatan medan dekat (≤ 3200 km) dan pengamatan medan jauh (> 3200 km) seperti yang dibahas oleh Prastowo *et al.* (2018).

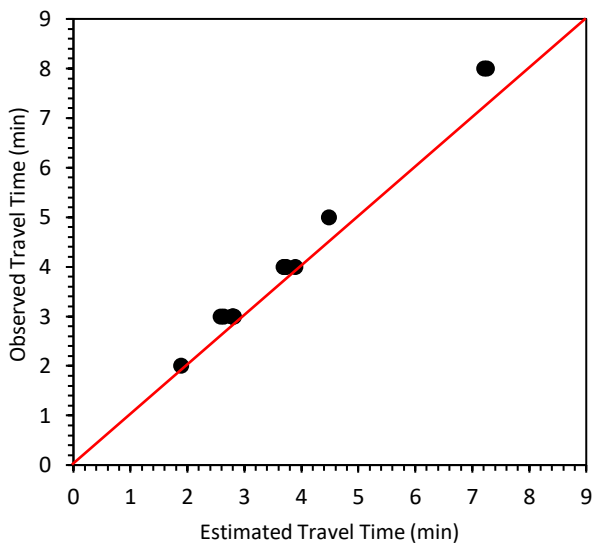
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tsunami Time Delay

Fenomena *time delay* merupakan aspek kinematik dalam perambatan gelombang tsunami, di mana tsunami lintas Samudra Pasifik dan Hindia dengan *travel distance* ribuan kilometer menunjukkan perbedaan yang signifikan antara estimasi waktu kedatangan gelombang tsunami dan yang teramati oleh stasiun pemantau di satu lokasi tertentu (Choi *et al.*, 2003; Wessel, 2009; Inazu and Saito, 2013; Watada *et al.*, 2014; Wang, 2015; Cholifah and Prastowo, 2017b; Prastowo *et al.*, 2018). Dua kasus tsunami terkini di Indonesia yang dibahas di sini adalah tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda pada tahun 2018. Fokus perhatian adalah apakah fenomena *time delay* yang terjadi untuk tsunami lintas samudera juga berlaku untuk kasus tsunami yang melintasi kawasan dengan geometri yang jauh lebih kecil (sempit dan pendek) seperti Teluk Palu dan Selat Sunda.

Tsunami Teluk Palu tanggal 28 September 2018 dipicu oleh gempa tektonik $M_w 7,5$ (Mikami *et al.*, 2019; Takagi *et al.*, 2019; Nakata *et al.*, 2020; Nagai *et al.*, 2021). Teluk Palu memiliki panjang 30 km dan lebar 6-7 km (Takagi *et al.*, 2019; Widiyanto *et al.*, 2019). Meskipun ditemukan beberapa lokasi longsor bawah laut di lapangan, namun penelitian ini mengasumsikan satu lokasi sumber, yaitu longsor utama di sebelah utara Teluk Palu dengan episenter $0,63^\circ$ LS $119,74^\circ$ BT (Pakoksung *et al.*, 2019).

Gambar 3 adalah grafik relasi antara *estimated travel time* dengan *observed travel time*, di mana grafik tersebut jelas memberikan informasi *observed travel time* lebih besar daripada *estimated travel time*. Hal ini bisa dilihat dari semua titik pengamatan berada pada ‘bagian sebelah kiri’ garis lurus berwarna merah yang membentuk sudut 45° terhadap sumbu horisontal (data pengamatan diperoleh dari publikasi Mikami *et al.* (2019) dan Pakoksung *et al.* (2019)). Dengan demikian, $\Delta t \geq 0$ karena $t_{\text{obs}} \geq t_{\text{est}}$ selalu dipenuhi untuk kasus Teluk Palu, seperti terlihat pada persamaan (6), sekaligus mengkonfirmasi temuan Wessel (2009).

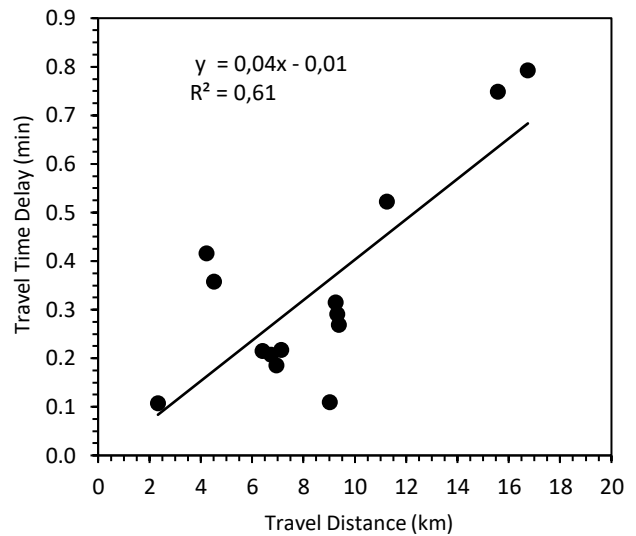


Gambar 3. Grafik *observed versus estimated travel time* kasus tsunami Teluk Palu 2018.

Argumen yang bisa digunakan untuk menjelaskan *time delay* adalah reduksi kecepatan gelombang tsunami karena faktor eksternal, yaitu efek deformasi dasar laut yang direpresentasikan parameter β pada persamaan (5), seperti dibahas oleh Inazu and Saito (2013). Hasil simulasi gelombang tsunami (Watada *et al.*, 2014) untuk dua kasus tsunami lintas Samudera Pasifik, yaitu tsunami Chili 2010 dan Tohoku 2011 juga jelas menunjukkan efek deformasi fisis dasar laut terhadap kecepatan tsunami, khususnya untuk pengamatan medan jauh. Analisis teoritik terhadap model reduksi kecepatan tsunami akibat ketidakseragaman topografi diberikan Wang (2015) yang bertanggung jawab terhadap kelahiran *time delay*.

Untuk satu hal, Gambar 3 tersebut telah membantu membuktikan eksistensi *time delay* namun belum mampu menunjukkan perilaku *time delay* terhadap *travel distance*. Cholifah and Prastowo (2017b) dan Prastowo *et al.* (2018) membuktikan bahwa *time delay* merupakan fungsi linier terhadap *travel distance* untuk posisi pengamatan medan dekat (≤ 3200 km) sampai medan jauh (> 3200 km) dengan mengambil studi kasus tsunami Samudera Pasifik dan Hindia. Dalam penelitian ini, seluruh titik pengamatan

berasal dari medan dekat mengingat geometri Teluk Palu yang sempit dan pendek. Gambar 4 berikut menunjukkan grafik hubungan antara *time delay* terhadap *travel distance* untuk kasus tsunami Teluk Palu 2018.



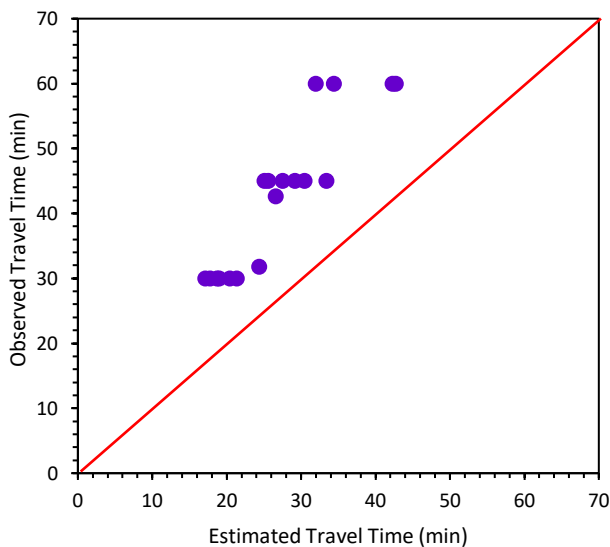
Gambar 4. *Time delay* terhadap *travel distance* untuk kasus tsunami Teluk Palu 2018.

Waktu tempuh (*travel time*) perambatan tsunami diukur dari episenter tsunami menuju ke stasiun pengamatan (*travel distance*). Gambar 4 memberikan informasi perilaku *time delay* terhadap *travel distance* yang menunjukkan nilai koefisien korelasi $R^2 \approx 0,61$ ditemukan untuk kasus tsunami Teluk Palu. Nilai R^2 tersebut tidak jauh berbeda dengan temuan Prastowo *et al.* (2018) pada kasus Aceh 2004 dan Mentawai 2010. Oleh karena itu, *time delay* dalam kasus tsunami Teluk Palu bukan merupakan fungsi linear dari *travel distance*. Peran *local environment* (geometri teluk) diduga lebih besar dan memicu penyimpangan dari sifat linearitas *time delay-travel distance* seperti pada kasus trans-Pasifik (Cholifah and Prastowo, 2017b; Prastowo *et al.*, 2018). *Time delays* dalam rentang 0.1–0.8 menit dengan jarak tempuh dalam pengamatan ini dalam rentang 2-17 km memberikan gambaran mengapa banyak korban berjatuh pada tsunami Palu saat itu terlepas dari bencana liquefaksi yang menyertai. Geometri teluk yang sempit mendorong gelombang tsunami masuk wilayah teluk dengan energi yang relatif besar (Gusman *et al.*, 2019; Mikami *et al.*, 2019), mengalami pantulan berulang (*multiple reflection*) yang memicu pelipatan energi. Hal inilah yang terekam dalam survei lapangan, di mana ditemui jejak ketinggian *run-up* yang tidak biasa untuk tsunami yang dibangkitkan dari gempa M_w 7,5 tidak terlalu kuat (Gusman *et al.*, 2019; Patton *et al.*, 2019).

Tsunami Selat Sunda tanggal 22 Desember 2018 yang menyapu wilayah barat Propinsi Banten dan wilayah selatan Propinsi Lampung dipicu secara langsung oleh keruntuhan sebagian bodi Anak Rakata pada sisi barat

(Grilli *et al.*, 2019; Widiyanto *et al.*, 2020). Peristiwa ini adalah salah satu contoh tsunami vulkanik yang bukan dipicu langsung oleh erupsi dari hasil pengamatan survei lapangan (Heidarzadeh *et al.*, 2020b; Muhari *et al.*, 2019). Runtuhnya sebagian volume gunung ternyata bisa juga membangkitkan gelombang tsunami (Hunt *et al.*, 2021) yang merambat di perairan Selat Sunda dengan lebar lebih dari 100 km (diukur menggunakan kalkulator online di <https://keisan.casio.com/exec/system/1224587128>). Lokasi episenter perambatan adalah $6,11^\circ$ LS dan $119,40^\circ$ BT yang ditandai dengan volume air laut yang dipindahkan sebesar $0,677 \text{ km}^3$ (Heidarzadeh *et al.*, 2020a).

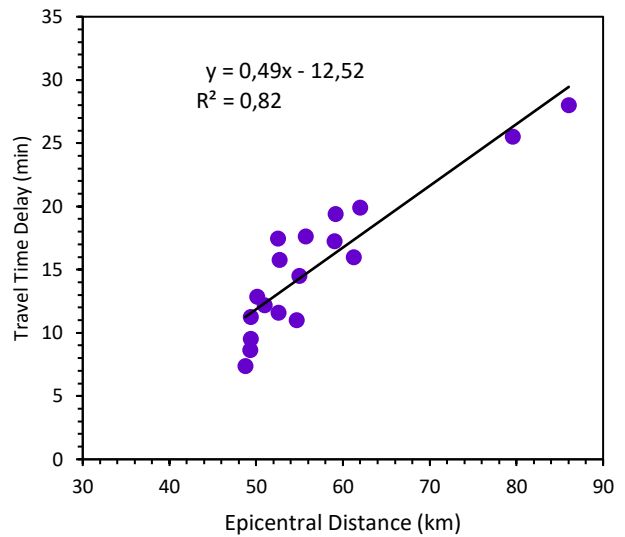
Gambar 5 merupakan grafik relasi antara *estimated travel time* dengan *observed travel time* untuk kasus tsunami Selat Sunda, di mana grafik tersebut memberikan informasi bahwa *observed travel time* lebih besar daripada *estimated travel time*, sesuai dengan temuan terdahulu (Choi *et al.*, 2003; Wessel, 2009). Hal ini dapat dilihat dengan jelas dari semua titik pengamatan yang berkumpul pada ‘bagian sebelah kiri’ garis lurus berwarna merah yang membentuk sudut 45° terhadap sumbu horisontal. Fitur grafis ini mirip dengan yang diperoleh untuk kasus tsunami Teluk Palu.



Gambar 5. Grafik *observed versus estimated travel time* kasus tsunami Selat Sunda 2018.

Gambar 6 adalah grafik yang menunjukkan relasi antara *time delay* terhadap *travel distance* kasus tsunami Selat Sunda, di mana $R^2 \approx 0,82$. Meskipun nilai koefisien relasi ini tidak lebih baik dari temuan Prastowo *et al.* (2018) untuk kasus trans-Pasifik, namun R^2 tsunami Selat Sunda jauh lebih baik dibandingkan dengan kasus Teluk Palu. Argumen yang dapat menjelaskan hal ini adalah geometri Selat Sunda yang lebih lebar yaitu lebih dari 100 km dengan *time delays* dalam rentang 7–28 menit untuk *travel distances* yang relatif jauh dibandingkan dengan kasus Teluk Palu memberikan peluang lebih kecil terjadi

multiple reflection.



Gambar 6. *Time delay* terhadap *travel distance* untuk kasus tsunami Selat Sunda 2018.

Kedua kasus tsunami yang terjadi di Indonesia pada tahun 2018 ini merupakan jenis tsunami medan dekat karena jarak tempuh tsunami dari episenter menuju lokasi stasiun pengamatan adalah kurang dari 100 km, jauh lebih kecil dari batas jangkauan pengamatan medan dekat ($\leq 3200 \text{ km}$). Temuan lapangan pada kedua kasus tsunami yang dipelajari, khususnya untuk kasus Teluk Palu 2018 jelas menunjukkan bahwa *time delay* sepertinya bukan merupakan fungsi linear dari *travel distance* seperti yang dilaporkan oleh Cholifah and Prastowo (2017b) dan Prastowo *et al.* (2018). Selain faktor geometri Teluk Palu dan Selat Sunda, pengamatan yang terlalu dekat dengan sumber merupakan pembeda terhadap kasus tsunami trans-Pasifik.

Tsunami Run-up

Fenomena *run-up* merupakan aspek dinamik dalam perambatan tsunami karena membahas kekekalan kerapatan energi dan kontinuitas fluida inkompresibel (Synolakis, 1991; Sorensen, 2006; Cholifah and Prastowo, 2017a; Heidarzadeh *et al.*, 2020b). Fokus perhatian adalah apakah *run-up* pada kasus tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda pada tahun 2018 harus mempertimbangkan efek refraksi sebagai tambahan faktor agar estimasi *run-up* mendekati hasil ukur *run-up surveys* pada tsunami Teluk Palu (Patton *et al.*, 2019; Heidarzadeh *et al.*, 2020b) dan Selat Sunda (Grilli *et al.*, 2019; Muhari *et al.*, 2019).

Pada tahap awal, *run-up* berbasis Hukum Green hanya mempertimbangkan pendangkalan pantai (Sorensen, 2006). Parameter dinamik D dan d didapatkan secara bebas dari laman <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/>. Parameter η diperoleh dari penelitian terdahulu yang relevan dan laman NOAA dalam bentuk skala bergambar dari laman <https://nctr.pmel.noaa.gov/sulawesi20180928/>. Kasus yang pertama dibahas adalah tsunami Teluk Palu.

**Mekanika Perambatan Gelombang Tsunami:
Studi Kasus Tsunami Teluk Palu dan Tsunami Selat Sunda Tahun 2018**

Tabel 1 memberikan hasil perhitungan *run-up* pada kasus Teluk Palu. *Run-up* yang teramati R_{obs} di lokasi pengamatan dibandingkan dengan perhitungan *run-up* R_{est} berdasarkan persamaan (9). Dengan mengadopsi metode Cholifah and Prastowo (2017a), apabila $R_{est} > R_{obs}$ maka digolongkan sebagai *over-estimate cases*. Rasio berikut $\frac{R_{obs}}{R_{est}} \times 100\%$ perlu dihitung. Sedangkan jika $R_{est} < R_{obs}$

maka digolongkan sebagai *under-estimate cases*. Rasio yang dihitung adalah $\frac{R_{est}}{R_{obs}} \times 100\%$. Apabila salah satu rasio untuk kasus yang ditemui (*over-estimates* atau *under-estimates*) bernilai $\geq 70\%$, maka kesesuaian antara R_{obs} dan R_{est} adalah baik. Kesesuaian baik tersebut ditandai dengan simbol “✓”, sedangkan yang tidak memenuhi kriteria ditandai dengan simbol “✗” pada kolom terakhir Tabel 1.

Tabel 1. Estimasi *run-up* berbasis efek pendangkalan pantai untuk tsunami Teluk Palu 2018.

D (m)	Lintang	Bujur	η (m)	d (m)	Lintang	Bujur	R (m)		Hasil
							R_{est}	R_{obs}	
178	0,57°LS	119,74°BT	0,30	9	0,54°LS	119,77°BT	0,63	0,90	✓
79	0,71°LS	119,80°BT	0,25	31	0,69°LS	119,83°BT	0,32	1,80	✗
106	0,68°LS	119,80°BT	0,25	62	0,70°LS	119,76°BT	0,29	0,40	✓
95	0,70°LS	119,80°BT	0,30	15	0,71°LS	119,77°BT	0,48	1,20	✗
130	0,81°LS	119,83°BT	0,40	41	0,82°LS	119,81°BT	0,53	1,50	✗
78	0,82°LS	119,83°BT	0,20	59	0,82°LS	119,81°BT	0,21	0,30	✓
93	0,70°LS	119,79°BT	0,25	48	0,68°LS	119,82°BT	0,29	1,50	✗
179	0,63°LS	119,76°BT	0,35	81	0,62°LS	119,80°BT	0,43	1,20	✗
82	0,77°LS	119,83°BT	0,30	128	0,70°LS	119,76°BT	0,27	1,40	✗
117	0,84°LS	119,84°BT	0,35	2	0,88°LS	119,84°BT	0,97	1,38	✓
124	0,84°LS	119,85°BT	0,40	27	0,88°LS	119,86°BT	0,59	2,09	✗
105	0,73°LS	119,81°BT	0,40	44	0,71°LS	119,85°BT	0,50	2,31	✗
150	0,63°LS	119,76°BT	0,40	2	0,66°LS	119,74°BT	1,18	2,25	✗
167	0,63°LS	119,78°BT	0,30	109	0,61°LS	119,80°BT	0,33	1,90	✗
137	0,79°LS	119,83°BT	0,30	47	0,62°LS	119,81°BT	0,39	1,78	✗

Tabel 1 jelas menunjukkan bahwa seluruh R_{est} lebih kecil daripada R_{obs} . Hal ini berarti seluruh titik pengamatan pada Tabel 1 adalah *under-estimates*. Hanya terdapat 4 dari 15 titik pengamatan, di mana berlaku $R_{est} \geq 0,7 R_{obs}$ yang mengkonfirmasi kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} . Hal ini berarti hanya 26% titik pengamatan yang memberikan data yang mendukung prediksi *run-up* berbasis persamaan (9). Dengan demikian, Hukum Green dalam bentuk yang paling dasar yaitu mempertimbangkan efek pendangkalan pantai saja belum akurat digunakan untuk estimasi *run-up* pada kasus tsunami teluk Palu.

Kasus kedua adalah tsunami Selat Sunda, di mana distribusi η diperoleh dari Grilli *et al.* (2019). Seperti pada tabel sebelumnya, Tabel 2 juga memberikan perhitungan *run-up* R_{est} dengan menggunakan Hukum Green bentuk dasar pada persamaan (9) dan *run-up* hasil pengamatan lapangan R_{obs} . Tabel 2 menunjukkan mayoritas estimasi *run-up* tsunami Selat Sunda menyimpang jauh dari fakta *run-up* yang diperoleh dari survei lapangan. Hanya 3 titik

pengamatan yang memenuhi $R_{est} > R_{obs}$ (*over-estimates*) sedangkan sisanya berlaku $R_{est} < R_{obs}$ (*under-estimates*). Data R_{obs} diperoleh dari referensi yang relevan, antara lain Heidarzadeh *et al.* (2020b), Widiyanto *et al.* (2020) dan Muhari *et al.* (2019).

Dengan menerapkan prosedur yang sama seperti kasus Teluk Palu, dari 25 data lapangan hanya 7 lokasi pengamatan di mana ada kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} . Hal ini berarti hanya 28% dari total keseluruhan data yang menunjukkan $R_{est} \geq 0,7 R_{obs}$ untuk kasus *under-estimates* dan $R_{obs} \geq 0,7 R_{est}$ untuk kasus *over-estimates*. Persentase kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} pada tsunami Selat Sunda tidak beda jauh dari tsunami Teluk Palu. Hal ini berarti penerapan Hukum Green bentuk dasar pada persamaan (9) yang hanya mengandalkan efek pendangkalan pantai untuk estimasi *run-up* adalah tidak valid. Penyimpangan yang terjadi bisa juga dipicu oleh beberapa faktor lain, misalnya akurasi batimetri di tepi pantai. Situasi yang sama juga dilaporkan oleh Cholifah and Prastowo (2017a).

Tabel 2. Estimasi *run-up* berbasis efek pendangkalan pantai untuk tsunami Selat Sunda 2018.

D(m)	Lintang	Bujur	η (m)	d (m)	Lintang	Bujur	R (m)		Hasil
							R _{est}	R _{obs}	
3	6,39°LS	105,71°BT	0,5	2	6,42°LS	105,82°BT	0,55	0,90	×
42	6,40°LS	105,62°BT	2,0	11	6,48°LS	105,65°BT	2,80	4,00	✓
86	6,36°LS	105,56°BT	2,0	20	6,56°LS	105,61°BT	2,88	5,20	×
59	6,56°LS	105,55°BT	2,5	20	6,57°LS	105,61°BT	3,28	4,60	✓
89	6,52°LS	105,54°BT	2,0	68	6,70°LS	105,54°BT	2,14	3,00	✓
47	6,14°LS	105,72°BT	2,0	6	6,14°LS	105,85°BT	3,35	4,70	✓
32	6,21°LS	105,73°BT	2,0	5	6,20°LS	105,83°BT	3,18	5,40	×
30	6,23°LS	105,73°BT	1,5	5	6,26°LS	105,83°BT	2,35	3,60	×
21	6,30°LS	105,73°BT	2,0	3	6,31°LS	105,83°BT	3,25	4,60	✓
23	6,40°LS	105,70°BT	2,5	15	6,52°LS	105,75°BT	2,78	1,60	×
17	6,41°LS	105,70°BT	1,0	2	6,50°LS	105,67°BT	1,71	1,10	×
58	6,39°LS	105,65°BT	2,5	5	6,48°LS	105,65°BT	4,61	3,00	×
60	6,39°LS	105,63°BT	2,0	10	6,50°LS	105,64°BT	3,13	9,20	×
61	6,55°LS	105,57°BT	2,0	21	6,65°LS	105,58°BT	2,61	4,20	×
41	6,14°LS	105,75°BT	0,5	9	6,15°LS	105,85°BT	0,73	3,74	×
34	6,16°LS	105,76°BT	1,0	7	6,16°LS	105,84°BT	1,48	3,29	×
37	6,17°LS	105,74°BT	1,0	9	6,17°LS	105,84°BT	1,42	4,54	×
33	6,37°LS	105,68°BT	2,0	2	6,23°LS	105,82°BT	4,03	5,80	×
41	6,24°LS	105,64°BT	1,5	18	6,23°LS	105,82°BT	1,84	5,34	×
33	6,26°LS	105,69°BT	1,5	4	6,26°LS	105,82°BT	2,54	4,57	×
63	6,38°LS	105,61°BT	2,5	4	6,48°LS	105,65°BT	4,98	7,07	✓
92	6,31°LS	105,51°BT	3,0	6	6,50°LS	105,63°BT	5,94	8,51	✓
85	6,42°LS	105,49°BT	3,0	10	6,51°LS	105,63°BT	5,12	13,49	×
90	6,44°LS	105,53°BT	3,0	20	6,52°LS	105,62°BT	4,37	10,94	×
90	6,41°LS	105,54°BT	3,0	10	6,52°LS	105,62°BT	5,20	13,20	×

Kegagalan keberlakuan Hukum Green bentuk dasar pada persamaan (9) untuk kedua kasus tsunami 2018 yang ditunjukkan Tabel 1 (Teluk Palu) dan Tabel 2 (Selat Sunda) memaksa perhitungan ulang agar diperoleh data yang valid. Oleh karena itu, diperlukan Hukum Green dalam bentuk modifikasi dengan menambahkan efek refraksi gelombang yang merupakan respons variasi kedalaman pantai. *Run-up* dengan modifikasi Hukum Green berbasis persamaan (11) diterapkan untuk kedua kasus tsunami, hasil perhitungan diberikan berturut-turut pada Tabel 3 dan Tabel 4. Faktor efek refraksi $\left(\frac{B}{b}\right)^{1/2}$ pada persamaan (11) bisa dituliskan sebagai koefisien refraksi $K_r = \left(\frac{B}{b}\right)^{1/2}$ (Sandanbata *et al.*, 2018) yang harus lebih besar dari 1 karena efek refraksi di lokasi Teluk Palu dan Selat Sunda sangat kuat. Mengadopsi metodologi Cholifah and Prastowo (2017a), K_r diambil

sama untuk kedua kasus yaitu 2, lebih kecil dari jangkauan koefisien refraksi sebesar 4,5-4,9 yang ditemukan oleh Sandanbata *et al.* (2018), di mana variasi nilai koefisien refraksi tidak memberikan pengaruh pada perhitungan estimasi amplitudo tsunami atau *run-up* dalam penelitian ini. Kemudian faktor efek pendangkalan pantai $\left(\frac{D}{d}\right)^{1/4}$ dituliskan sebagai koefisien *shoaling* $K_s = \left(\frac{D}{d}\right)^{1/4}$.

Tabel 3 berikut ini mendiskripsikan perbandingan antara perhitungan *run-up* menurut persamaan (9) yang merepresentasikan Hukum Green dalam bentuk dasar dan persamaan (11) yang merepresentasikan Hukum Green yang telah dimodifikasi untuk kasus tsunami Teluk Palu. Perhatikan bahwa K_s adalah nilai observasi sedangkan K_r adalah nilai prediktif. Jumlah titik pengamatan tetap sama seperti pada Tabel 1, yaitu 15 titik pengamatan.

**Mekanika Perambatan Gelombang Tsunami:
Studi Kasus Tsunami Teluk Palu dan Tsunami Selat Sunda Tahun 2018**

Tabel 3. Estimasi *run-up* berbasis efek pendangkalan pantai dan refraksi untuk tsunami Teluk Palu 2018.

D (m)	d (m)	η (m)	K_s	K_r	R (m)		Hukum Green	Modifikasi Hukum Green
					R_{est}	R_{obs}		
178	9	0,30	2,11	2	1,27	0,90	✓	✓
79	31	0,25	1,26	2	0,63	1,80	×	×
106	62	0,25	1,14	2	0,57	0,40	✓	✓
95	15	0,30	1,59	2	0,95	1,20	×	✓
130	41	0,40	1,33	2	1,07	1,50	×	✓
78	59	0,20	1,07	2	0,43	0,30	✓	✓
93	48	0,25	1,18	2	0,59	1,50	×	×
179	81	0,35	1,22	2	0,85	1,20	×	✓
82	128	0,30	0,89	2	0,54	1,40	×	×
117	2	0,35	2,77	2	1,94	1,38	✓	✓
124	27	0,40	1,46	2	1,17	2,09	×	×
105	44	0,40	1,24	2	0,99	2,31	×	×
150	2	0,40	2,94	2	2,35	2,25	×	✓
167	109	0,30	1,11	2	0,67	1,90	×	×
137	47	0,30	1,31	2	0,78	1,78	×	×

Tabel 3 jelas menunjukkan 5 titik pengamatan yang memenuhi $R_{est} > R_{obs}$ (*over-estimates*) dan 10 lokasi yang lainnya berlaku $R_{est} < R_{obs}$ (*under-estimates*). Pada kolom terakhir, terdapat 8 simbol “✓” yang dua kali lebih banyak dibandingkan 4 simbol “✓” pada kolom sebelumnya. Presentase kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} meningkat dari 26% menjadi 53%. Dengan peningkatan estimasi *run-up* R_{est} yang lebih banyak mendekati nilai observasi R_{obs} ,

maka penerapan estimasi *run-up* menggunakan modifikasi Hukum Green berbasis persamaan (11) untuk Teluk Palu adalah lebih baik dibandingkan dengan persamaan (9). Hasil baik ini memberikan konfirmasi temuan terdahulu (Cholifah and Prastowo, 2017a; Sandanbata *et al.*, 2018). Keberhasilan ini juga akan dibuktikan pada kasus tsunami Selat Sunda dengan geometri yang berbeda dari Teluk Palu yang akan diberikan pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Estimasi *run-up* berbasis efek pendangkalan pantai dan refraksi untuk tsunami Selat Sunda 2018.

D(m)	d (m)	η (m)	K_s	K_r	R (m)		Hukum Green	Modifikasi Hukum Green
					R_{est}	R_{obs}		
3	2	0,5	1,11	2	1,11	0,90	×	✓
42	11	2,0	1,40	2	5,59	4,00	✓	✓
86	20	2,0	1,44	2	5,76	5,20	×	✓
59	20	2,5	1,31	2	6,55	4,60	✓	✓
89	68	2,0	1,07	2	4,28	3,00	✓	✓
47	6	2,0	1,67	2	6,69	4,70	✓	✓
32	5	2,0	1,59	2	6,36	5,40	×	✓
30	5	1,5	1,57	2	4,70	3,60	×	✓
21	3	2,0	1,63	2	6,51	4,60	✓	✓
23	15	2,5	1,11	2	5,56	1,60	×	×
17	2	1,0	1,71	2	3,41	1,10	×	×
58	5	2,5	1,85	2	9,23	3,00	×	×

**Mekanika Perambatan Gelombang Tsunami:
Studi Kasus Tsunami Teluk Palu dan Tsunami Selat Sunda Tahun 2018**

D(m)	d (m)	η (m)	K_s	K_r	R (m)		Hukum Green	Modifikasi Hukum Green
					R_{est}	R_{obs}		
60	10	2,0	1,57	2	6,26	9,20	×	×
61	21	2,0	1,31	2	5,22	4,20	×	✓
41	9	0,5	1,46	2	1,46	3,74	×	×
34	7	1,0	1,48	2	2,97	3,29	×	✓
37	9	1,0	1,42	2	2,85	4,54	×	×
33	2	2,0	2,02	2	8,06	5,80	×	✓
41	18	1,5	1,23	2	3,69	5,34	×	×
33	4	1,5	1,69	2	5,08	4,57	×	✓
63	4	2,5	1,99	2	9,96	7,07	✓	✓
92	6	3,0	1,98	2	11,87	8,51	✓	✓
85	10	3,0	1,71	2	10,24	13,49	×	✓
90	20	3,0	1,46	2	8,74	10,94	×	✓
90	10	3,0	1,73	2	10,39	13,20	×	✓

Tabel 4 memberikan 25 pengamatan yang terdiri dari 14 titik pengamatan yang memenuhi $R_{est} > R_{obs}$ (*over-estimates*) dan 11 titik pengamatan yang lain berlaku $R_{est} < R_{obs}$ (*under-estimates*). Tabel 4 memperlihatkan bahwa terjadi peningkatan jumlah kesesuaian estimasi *run-up* R_{est} yang nilainya mendekati *run-up* teramati R_{obs} untuk kasus tsunami Selat Sunda 2018 yang ditandai dengan simbol “✓” (berjumlah 18) yang mendominasi kolom terakhir. Persentase yang dihasilkan mencapai 72% dari keseluruhan data (dibandingkan dengan 28% pada kolom sebelum kolom terakhir), di mana $R_{est} \geq 0,7 R_{obs}$ untuk kasus *under-estimates* dan $R_{obs} \geq 0,7 R_{est}$ untuk kasus *over-estimates* berlaku valid. Hal ini membuktikan dengan jelas bahwa jika efek refraksi ditambahkan pada persamaan (9), maka kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} menjadi lebih tinggi.

Berdasarkan hasil-hasil perhitungan pada Tabel 3 dan Tabel 4, maka persamaan (11) sebagai representasi perluasan Hukum Green dengan memasukkan faktor refraksi (Sorensen, 2006; Cholifah and Prastowo, 2017a; Sandanbata *et al.*, 2018) menjadi solusi alternatif estimasi *run-up*. Persentase kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} yang lebih besar lagi bisa saja diperoleh jika memasukkan faktor ketiga, misalnya efek geometri lokasi perambatan gelombang tsunami, namun efek ini bukan menjadi fokus penelitian ini. Data *run-up* pada Tabel 3 dan Tabel 4 memperlihatkan tanda “✓” mengalami peningkatan hingga 2 kali lipat untuk kasus Teluk Palu dan hampir 3 kali lipat untuk kasus Selat Sunda. Hal ini berarti persamaan (11) berlaku valid untuk kedua kasus tsunami yang dibahas dalam penelitian ini, di mana kedua kasus ini merupakan kasus tsunami yang dipicu oleh sumber non-seismik.

KESIMPULAN

Penelitian ini membahas kinematika dan dinamika perambatan tsunami yang menjelaskan fenomena *time delay* dan *run-up* pada kasus tsunami dengan pemicu non-seismik, yaitu tsunami Teluk Palu dan Selat Sunda pada tahun 2018. Grafik *time delay* untuk kedua kasus tsunami memberikan konfirmasi adanya *time delay*. Perilaku *time delay* bukan merupakan fungsi linier dari *travel distance* untuk kedua kasus tsunami karena $R^2 \approx 0,61$ untuk kasus Teluk Palu dan $R^2 \approx 0,82$ untuk kasus Selat Sunda. Geometri Teluk Palu dan Selat Sunda yang sempit dan pendek dibandingkan dengan Samudera Pasifik menjadi alasan mengapa nilai R^2 pada penelitian ini tidak sebesar temuan pada kasus tsunami trans-Pasifik. Estimasi *run-up* berdasarkan Hukum Green yang telah dimodifikasi berhasil memberikan kesesuaian yang lebih baik antara estimasi dan observasi *run-up* untuk kedua kasus tsunami yang ditinjau. Dengan demikian, aspek kinematik dan dinamik perambatan gelombang tsunami dari laut lepas menuju daerah pantai masih berlaku valid untuk tsunami yang dipicu oleh sumber-sumber non-seismik, yaitu longsor bawah laut (tsunami Teluk Palu) dan keruntuhan sebagian bodi gunung (tsunami Selat Sunda) dengan penyimpangan terbatas yang bisa diterima karena faktor geometri lokasi terjadinya tsunami dan medan pengamatan.

SARAN

Dengan memperhatikan hasil-hasil perhitungan *run-up* untuk kedua kasus tsunami yang dibahas pada penelitian ini, maka estimasi *run-up* yang lebih akurat bisa dilakukan untuk penelitian lanjutan dengan menambahkan parameter dispersi dan disipasi energi sebagai faktor tambahan kedua kesesuaian antara R_{est} dan R_{obs} bisa lebih baik lagi.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada NOAA atas link <https://www.ncei.noaa.gov/maps/bathymetry/> yang telah menyediakan data batimetri laut yang sangat berguna dalam penelitian ini. Selain itu ucapan terimakasih disampaikan kepada *reviewers* yang telah memberikan penilaian dan masukan untuk kesempurnaan artikel IFI ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Choi, B. H., Pelinovsky, E., Kim, K. O. and Lee, J. S. 2003. Simulation of the trans-oceanic tsunami propagation due to the 1883 Krakatau volcanic eruption. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 3, No. 5, pp. 321-332.
- Cholifah, L. and Prastowo, T. 2017a. A simple parameterization for tsunami run-up prediction. *Journal of Science and Science Education*, Vol. 1, No. 2, pp. 7-13.
- Cholifah, L. and Prastowo, T. 2017b. Travel time difference between estimated and observed values of the 2011 trans-oceanic Tohoku tsunami. *Proceedings. 7th Basic Science International Conference (BaSIC)*, Faculty of Science, The University of Brawijaya: Malang.
- 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.
- Fukao, Y., Sandanbata, O., Sugioka, H., Ito, A., Shiobara, H., Watada, S. and Satake, K. 2018. Mechanism of the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, Japan. *Science Advances*, Vol. 4, No. 4.
- Grilli, S. T., Tappin, D. R., Carey, S., Watt, S. F. L., Ward, S. N., Grilli, A. R., Engwell, S. L., Zhang, C., Kirby, J. T., Schambach, L. and Muin, M. 2019. Modelling of the tsunami from the December 22, 2018 lateral collapse of Anak Krakatau volcano in the Sunda Straits, Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-13.
- Gunawan, E. and Widiyantoro, S. 2019. Active tectonic deformation in Java, Indonesia inferred from a GPS-derived strain rate. *Journal of Geodynamics*, Vol. 123, pp. 49-54.
- Gusman, A. R., Supendi, P., Nugraha, A. D., Power, W., Latief, H., Sunendar, H., Widiyantoro, S., Daryono, Wiyono, S. H., Hakim, A., Muhari, A., Wang, X., Burbidge, D., Palgunadi, K., Hamling, I. and Daryono, M. R. 2019. Source model for tsunami inside Palu Bay following the 2018 Palu earthquake, Indonesia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 15, pp. 8721-8730.
- Heidarzadeh, M., Ishibe, T., Sandanbata, O., Muhari, A. and Wijanarto, A. B. 2020a. Numerical modeling of the subaerial landslide source of the 22 December 2018 Anak Krakatoa volcanic tsunami, Indonesia. *Ocean Engineering*, Vol. 195, 106733.
- Heidarzadeh, M., Putra, P. S., Nugroho, S. H. and Rashid, D. B. Z. 2020b. Field survey of tsunami heights and runups following the 22 December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 177, No. 10, pp. 4577-4595.
- Hunt, J. E., Tappin, D. R., Watt, S. F. L., Susilohadi, S., Novellino, A., Ebmeier, S. K., Cassidy, M., Engwell, S. L., Grilli, S. T., Hanif, M., Priyanto, W. S., Clare, M. A., Abdurrachman, M. and Udrek, U. 2021. Submarine landslide megablocks show half of Anak Krakatau island failed on December 22nd, 2018. *Nature communications*, Vol. 12, No. 1, pp.1-15.
- Hutchings, S. J. and Mooney, W. D. 2021. The seismicity of Indonesia and tectonic implications. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, Vol. 22, Issue 9.
- Inazu, D. and Saito, T. 2013. Simulation of distant tsunami propagation with a radial loading deformation effect. *Earth, Planets and Space*, Vol. 65, No. 8, pp. 835-842.
- Irsyam, M. I., Widiyantoro, S., Natawidjaja, D. H., Meilano, I., Rudiyanto, A., Hidayati, S., Triyoso, W., Hanifa, N. R., Djarwadi, D., Faizal, L. *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. pp. 1-376. Bandung: Penerbit Pusat Studi Gempa Nasional dan Pusat Litbang Perumahan dan Permukiman, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Kementerian PUPR.
- Jing, H., Gao, Y., Liu, C. and Hou, J. 2020. Far-field characteristics of linear water waves generated by a submerged landslide over a flat seabed. *Journal of Marine Science and Engineering*, Vol. 8, No. 3.
- Kundu, P. K. and Cohen, I. M. 2002. Fluid Mechanics 2nd Edition. San Diego: Academic Press, US, 1-730. ISBN-13: 978-0121782511.
- Lahcene, E., Ioannou, I., Suppasri, A., Pakoksung, K., Paullik, R., Syamsidik, S., Bouchette, F. And Imamura, F. 2021. Characteristics of building fragility curves for seismic and non-seismic tsunamis: case studies of the 2018 Sunda Strait, 2018 Sulawesi-Palu and 2004 Indian Ocean tsunamis. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, December*, pp. 2133-2344.

**Mekanika Perambatan Gelombang Tsunami:
Studi Kasus Tsunami Teluk Palu dan Tsunami Selat Sunda Tahun 2018**

- 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*, Vol. 176, No. 8, pp. 3291-3304.
- Muhari, A., Heidarzadeh, M., Susmoro, H., Nugroho, H. D., Kriswati, E., Supartoyo, Wijanarto, A. B., Imamura, F. and Arikawa, T. 2019. The December 2018 Anak Krakatau volcano tsunami as inferred from post-tsunami field surveys and spectral analysis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, No. 12, pp. 5219-5233.
- Nagai, K., Muhari, A., Pakoksung, K., Watanabe, M., Suppasri, A., Arikawa T. and Imamura, F. 2021. Consideration of submarine landslide induced by 2018 Sulawesi earthquake and tsunami within Palu Bay. *Coastal Engineering Journal*, Vol. 63, Issue 4. pp. 446-466.
- Nakata, K., Katsumata, A. and Muhari, A. 2020. Submarine landslide source models consistent with multiple tsunami records of the 2018 Palu tsunami, Sulawesi, Indonesia. *Earth Planet and Space*, Vol. 72, No. 44.
- Nugraha, A. N., Shiddiqi, H. A., Widiyantoro, S., Thurber, C. H., Pesicek, J. D., Zhang, H., Wiyono, S. H., Ramdhan, M., Wandono and Irsyam, M., 2018. Hypocenter relocation along the Sunda Arc in Indonesia, using a 3D seismic-velocity model. *Seismological Research Letters*, Vol. 89(2A), pp. 603-612.
- Pakoksung, K., Suppasri, A., Imamura, F., Athanasius, C., Omang, A. and Muhari, A. 2019. Simulation of the submarine landslide tsunami on 28 September 2018 in Palu Bay, Sulawesi Island, Indonesia using a two-layer model. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 176, No. 8, pp. 3323-3350.
- Patton, J. R., Wilson, R., Dengler, L., LaDuke, Y. and Miller, K. 2019. EERI Preliminary notes on tsunami information and response: Tsunami generated by M_w 7.5 Sulawesi, Indonesia earthquake on 28 September 2018. *Earthquake Engineering Research Institute (EERI)*, pp. 1-23.
- Prastowo, T., Cholifah, L., Madlazim. 2018. Analysis of travel time delay for large tsunamis across the Pacific and Indian oceans. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 37, No.4, pp 195-212.
- Ren, Z., Wang, W., Wang, Y., Hou, J. 2020. Numerical study of the triggering mechanism of the 2018 Anak Krakatau tsunami: eruption or collapsed landslide ? *Natural Hazardz*, Vol. 102. No. 1, pp 1-14.
- Reymond, D., Okal, E. A., Hébert, H. and Bourdet, M. 2012. Rapid forecast of tsunami wave height from a database of pre-computed simulations, and application during the 2011 Tohoku tsunami in French Polynesia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 39, No. 11, pp. 1-6.
- Sandanbata, O., Watada, S., Satake, K., Fukao, Y., Sugioka, H., Ito, A. and Shiobara, H. 2018. Ray tracing for dispersive tsunamis and source amplitudo estimation based on Green's law: application to the 2015 volcanic tsunami earthquake near Torishima, South of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 175, No. 4, pp. 1371-1385.
- Sassa, S. and Takagawa, T. 2018. Liquefied gravity flow-induced tsunami: first evidence and comparison from the 2018 Indonesia Sulawesi earthquake and tsunami disasters. *Landslides*, Vol. 16, No. 1, pp. 195-200.
- Sorensen, R. M. 2006. Basic Coastal Engineering. *Basic Coastal Engineering: Third Edition*, pp. 1-324.
- Synolakis, C. E. 1991. Green's law and the evolution for solitary waves. *Physics of Fluid A*, Vol. 3, No. 3, pp. 490-491.
- Takagi, H., Pratama, M. B., Kurobe, S., Esteban, M., Aranguiz, R. and Ke, B. 2019. Analysis of generation and arrival time of landslide tsunami to Palu city due to the 2018 Sulawesi earthquake. *Landslide*, Vol. 16, pp. 983-991.
- Titov, V. V. 2021. Hard lessons of the 2018 Indonesian tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 178, No. 4, pp. 1121-1133.
- Wang, D. 2015. An ocean depth-correction method for reducing model errors in tsunami travel time: application to the 2010 Chile and 2011 Tohoku tsunamis. *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 34, No. 1, pp. 1-22.
- Ward, S. N. 2011. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics: Tsunami. Edited by Harsh K. Gupta. National Geophysical Research Institute (NGRI). Council 52 of Scientific and Industrial Research (CSIR). Springer Netherlands: Dordrecht, Netherlands, 1-1539. e-ISBN: 978-90-481-8702-7.
- 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 Geophysical Research*, Vol. 119, pp. 4287-4310.

- Wessel, P. 2009. Analysis of observed and predicted tsunami travel times for the Pacific and Indian oceans. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 166, pp. 301-324.
- Widiyanto, W., Santoso, P. B., Hsiao., S. C. and Imananta, R. T. 2019. Post-event field survey of 28 September 2018 Sulawesi earthquake and tsunami. *Natural Hazards and System Sciences*, Vol. 1, pp. 1-23.
- Widiyanto, W., Hsiao, S. C., Chen, W. B., Santoso, P. B., Imananta, R. T. and Lian, W. C. 2020. Run-up, inundation, and sediment characteristics of the 22 Desember 2018 Sunda Strait tsunami, Indonesia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 20, pp. 933-946.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D. and Putra, H. E. 2020. Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1, pp. 1-11.