

ESTIMASI TSUNAMI RUN-UP DENGAN PENDEKATAN MODIFIKASI HUKUM GREEN DALAM ZONA MITIGASI

Nur Alissa Anwar

Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya

Email: nuranwar@mhs.unesa.ac.id

Abstrak

Pengetahuan tentang evolusi tinggi amplitudo gelombang tsunami selama perambatan dari lepas pantai menuju garis pantai diperlukan untuk studi mitigasi. Ketika tiba di pantai, kecepatan fase tsunami tereduksi yang menyebabkan peningkatan amplitudo, biasa dikenal dengan tsunami *run-up* yang menimbulkan korban jiwa dan kerusakan properti. Dalam konteks pengurangan risiko bencana, estimasi tinggi *run-up* adalah vital. Dengan menggunakan data *run-up* dari survei lapangan kasus Samoa 2009 dan Palu-Donggala 2018, validitas *the basic Green's Law* berbasis efek *shoaling* saja diuji untuk estimasi tinggi *run-up*, di mana kegagalan hukum dasar Green tersebut terjadi pada sebagian besar lokasi pengamatan. Sebagai respons, kekekalan energi diterapkan untuk menurunkan *the modified Green's Law* dengan menyertakan efek refraksi. *The modified Green's Law* diuji untuk estimasi *run-up* dua kasus yang dipelajari, di mana tinggi *run-up* diparameterisasi oleh dua faktor sekaligus, yaitu efek *shoaling* karena perubahan kedalaman lokal dan efek refraksi karena kecepatan fase yang tereduksi saat tsunami mendekati garis pantai. Tujuan utama penelitian ini adalah mengkaji keberlakuan *the modified Green's Law* untuk estimasi tinggi *run-up* dengan memanfaatkan data kedalaman lokal sebagai parameter eksternal dan jarak antar muka gelombang sebagai parameter internal. Estimasi *run-up* dengan bantuan *the modified Green's Law* adalah akurat karena 95% hasil-hasil estimasi sesuai dengan nilai yang terukur dari survei lapangan, jauh lebih baik dari prediksi berbasis *the basic Green's Law* yang memberikan kesesuaian sebesar 20%. Kompleksitas batimetri dan topografi, morfologi pantai, dan efek refleksi belum ikut dipertimbangkan. Faktor-faktor tersebut juga penting, oleh karena itu perlu diselidiki dalam penelitian mendatang.

Kata Kunci : modifikasi Hukum Green, efek refraksi, efek *shoaling*, *run-up*

Abstract

The evolution of tsunami wave height during its propagation from open seas to coastal zones is required for mitigation study. When arriving at a shoreline, tsunami phase speed decreases causing increased wave height onshore, commonly known as tsunami *run-up* that leads to fatalities on population and infrastructures. In the context of disaster risk reduction, *run-up* estimate is of great importance. Using field data of *run-up* available from 2009 Samoa and 2018 Palu-Donggala events, we examined the applicability of the basic Green's law based on shoaling only to calculate *run-up* heights and found that it failed to predict *run-ups* in the majority of observational sites for all the events considered. We then applied concept of energy conservation to derive the modified Green's Law by incorporating refraction effect into the basic one. The modified Green's Law was tested for *run-up* estimates of all occurrences, where *run-up* height was parameterized with shoaling effect owing to changes in local ocean depth and refraction effect due to reduction in tsunami phase speed when approaching coastal lines. The objective of this study is thus to determine if the modified Green's law is applicable for *run-up* estimate using both local depths as external parameters and tsunami wave-front separation as internal parameters. The results are obtained with high accuracy as 95% of estimates are consistent with the measured *run-up* heights, much accurate than 20% of those derived from the basic Green's Law. Factors such as bathymetry and topography complexity, beach morphology, and wave reflection are not yet explored in the present study. These are also crucial and need to include for further investigation in future work.

Keywords: modified Green's law, refraction effect, shoaling effect, *run-up*

PENDAHULUAN

Kombinasi antara posisi geografis dan kondisi geologis Indonesia yang berada diantara Samudera Pasifik dan Hindia serta berada di zona pertemuan tiga lempeng tektonik yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik menjadi penyebab wilayah nusantara rentan mengalami bencana kebumihan. Data terbaru dari Pusat Studi Gempa Bumi Nasional (PusGeN, 2017), menunjukkan bahwa gempa bumi dan tsunami merupakan bencana kebumihan yang menimbulkan korban jiwa dan harta benda dengan persentase jauh lebih besar dibandingkan dengan bencana kebumihan yang lain.

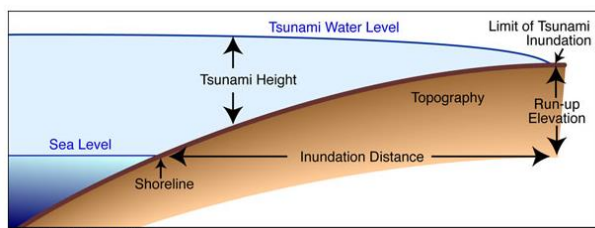
Salah satu contoh terkini adalah kasus gempa bumi tektonik dengan magnitudo 7,4 di sepanjang jalur patahan aktif Palu-Koro, yang dispekulasikan menjadi penyebab longsor bawah laut sehingga memicu tsunami di sekitar Palu dan Donggala tanggal 29 September 2018 (Kompas, 15 November 2018). Meskipun pada kasus tersebut terjadi tiga fenomena bencana sekaligus (gempa bumi, tsunami, dan liquefaksi), namun yang paling mematikan dan heboh adalah fenomena tsunami. Hal ini dipicu oleh kontroversi pencabutan peringatan dini tsunami oleh BMKG hanya berselang belasan menit sesudah gelombang pertama tiba di teluk Palu (Kompas, 23 Oktober 2018). Oleh karena itu,

penelitian ini fokus pada topik bahaya tsunami melalui pendekatan pada bagian hulu bencana. Bagian hulu berhubungan dengan pemahaman dan penanggulangan bencana yang memerlukan penguasaan ilmu fisika yang relevan dengan bencana kebumihan tertentu.

Tsunami adalah fenomena perambatan gelombang permukaan air laut yang dibangkitkan oleh pelepasan tenaga endogen dari dalam perut bumi melalui mekanisme gempa tektonik, longsor bawah laut, atau sumber lain (Ward, 2011). Tsunami bisa dipelajari dari fase saat dibangkitkan dalam zona generasi, saat tsunami merambat dalam zona propagasi, dan saat tsunami tiba di pantai dalam zona mitigasi. Zona mitigasi adalah zona yang penting mengingat pada zona inilah gelombang tsunami berinteraksi dengan populasi manusia, properti, dan infrastruktur lokal yang menimbulkan korban jiwa dan kerugian harta benda (Suppasri *et al.*, 2015). Oleh karena itu, penelitian ini membahas dinamika gelombang tsunami saat tiba di daerah pantai terdekat dalam zona mitigasi.

Pembahasan dinamika gelombang tsunami dalam zona mitigasi berkaitan dengan dua parameter fisis yang digunakan untuk mengkarakterisasi dampak tsunami. Kedua parameter tersebut adalah amplitudo maksimum gelombang tsunami yang tiba di pantai (*tsunami run-up*) dan jarak tempuh gelombang tsunami mencapai daratan (*horizontal inundation*). Pengetahuan mengenai *run-up* dan *inundation* merupakan isu penting dalam pengurangan risiko bencana (Mori *et al.*, 2011; Goto *et al.*, 2013). Namun karena kompleksitas kedua parameter, maka penelitian ini hanya membahas estimasi *tsunami run-up*.

Tsunami Terms



Gambar 1. Ilustrasi skematik gelombang tsunami saat tiba di *coastal area* atau daerah pantai dan terminologi terkait (<https://walrus.wr.usgs.gov/news/tsu-terms.html>).

Perambatan tsunami di laut lepas dapat dipelajari menggunakan dua pendekatan berbeda, yaitu *deep-water approximation* dan *shallow-water approximation*. Adapun penelitian ini berbasis pada *shallow-water approximation* dengan asumsi bahwa kedalaman laut jauh lebih kecil daripada panjang gelombang tsunami. Kecepatan tsunami dalam pendekatan ini adalah seperti berikut,

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

Perambatan gelombang tsunami untuk pengamatan medan dekat maupun medan jauh bersifat non-dispersif dengan kecepatan fase tidak bergantung pada panjang gelombang,

melainkan pada kedalaman lokal laut H . Pendekatan ini sesuai dengan pengamatan mengingat panjang gelombang tsunami mencapai 200 km, jauh lebih besar dari kedalaman lokal laut yang hanya sekitar 5 km, sehingga gelombang tsunami dikategorikan sebagai *a long surface gravity wave*. Dalam berbagai literatur, pendekatan ini disebut dengan *long-wave approximation* (Choi *et al.*, 2011; Charvet *et al.*, 2013; Cholifah and Prastowo, 2017).

Menurut Sorensen (2006), energi kinetik per satuan lebar kolom massa air laut dituliskan sebagai,

$$K = \frac{1}{16} \rho gh^2 L \quad (2)$$

di mana ρ adalah densitas air laut dan h tinggi gelombang tsunami. Sedangkan energi potensial per lebar kolom air laut dituliskan sebagai,

$$P = \frac{1}{16} \rho gh^2 L \quad (3)$$

Dengan asumsi bahwa tidak ada energi yang hilang selama perambatan tsunami (Lehfeldt *et al.*, 2007), maka energi mekanik per satuan lebar kolom massa air laut bersifat tetap dan dapat dihitung dari jumlah energi kinetik dan energi potensial sebagai berikut,

$$E = \frac{1}{8} \rho gh^2 L \quad (4)$$

Kerapatan energi tsunami ini dapat diturunkan langsung dari persamaan (4) sebagai berikut,

$$\varepsilon = \frac{E}{L} = \frac{1}{8} \rho gh^2 \quad (5)$$

Apabila h diasumsikan sebagai kedalaman kolom air laut yang dipindahkan selama perambatan gelombang, maka dalam batas yang masih valid h didefinisikan sebagai jarak vertikal antara titik puncak dan lembah gelombang, sehingga $h = 2a$ (WMO, 1998; Sorensen, 2006; Cholifah and Prastowo, 2017). Persamaan (5) berubah menjadi,

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \rho ga^2 \quad (6)$$

Persamaan di atas berlaku untuk *shallow water waves* dan menjadi basis penurunan Hukum Green baik bentuk *basic* atau *modified* yang berguna untuk estimasi *tsunami run-up* (Cholifah and Prastowo, 2017).

Perumusan Hukum Green

Laju perpindahan kerapatan energi tsunami atau yang dikenal dengan fluks energi, merupakan hasil kali kecepatan tsunami c dengan kerapatan energi tsunami ε ,

$$\phi = \sqrt{gH} \frac{1}{2} \rho ga^2 \quad (7)$$

Cholifah and Prastowo (2017) menyebutkan bahwa besaran fluks energi tsunami bersifat konstan sepanjang gerak gelombang tsunami di laut lepas menuju pantai. Secara matematis, hal ini dituliskan sebagai,

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{d}{dx} H^{1/2} a^2 = 0 \quad (8)$$

Persamaan (8) tersebut mendiskripsikan kekekalan fluks energi tsunami untuk perambatannya dari *offshore* (titik 1) menuju *onshore* (titik 2) dalam bentuk berikut,

$$H_1^{1/2} a_1^2 = H_2^{1/2} a_2^2 \quad (9)$$

di mana H_1 dan a_1 adalah kedalaman lokal dan amplitudo maksimum di *offshore* dan H_2 dan a_2 adalah kedalaman lokal dan amplitudo maksimum di *onshore*.

Sebagaimana literatur teknis yang relevan dengan perambatan tsunami saat mendekati pantai (WMO, 1998; Sorensen, 2006; Ward, 2011) dan beberapa penelitian yang relevan (Synolakis, 1991; Lehfeltd *et al.*, 2007; Marchuk and Vasiliev, 2014;), persamaan (9) diartikan sebagai variasi amplitudo tsunami terhadap perubahan kedalaman lokal saat tsunami merambat dari *offshore* menuju *onshore*. Dengan mengikuti simbol yang dibahas oleh Cholifah and Prastowo (2017), persamaan (9) di atas dapat diubah menjadi bentuk matematis dengan substitusi $H_1 = D$ dan $H_2 = d$ serta $a_1 = \eta$ dan $a_2 = R$ yang digunakan untuk estimasi *tsunami run-up* sebagai berikut,

$$R = \left(\frac{D}{d}\right)^{1/4} \eta \quad (10)$$

di mana R merupakan estimasi *run-up* (Sorensen, 2006, Lehfeltd *et al.*, 2007; Marchuk and Vasiliev, 2014) karena pengaruh pendangkalan lokal (*shoaling effect*). Menurut Cholifah and Prastowo (2017), persamaan di atas disebut *basic Green's Law* untuk membedakannya dengan bentuk modifikasi yang menyertakan efek refraksi gelombang.

Marchuk and Vasiliev (2014) menggunakan suatu metode yaitu *numerical modeling* untuk membahas radiasi gelombang tsunami dari titik sumber yang menyebar ke area sekitarnya mengikuti simetri silinder. Apabila metode tersebut ditempatkan pada konteks perambatan gelombang tsunami tanpa ada disipasi energi atau energi mekanik gelombang tsunami bernilai tetap selama perambatannya, maka persamaan (6) berubah menjadi,

$$E = \frac{1}{2} \rho g a^2 L = \frac{1}{2} \rho g a^2 2\pi r \quad (11)$$

di mana $L = 2\pi r$ adalah 'panjang karakteristik' kolom massa air laut dengan permukaan silindris yang bersifat variatif sepanjang arah perambatan tsunami, sedangkan $r \sim b/2$ menyatakan *geometrical-spacing width*, yaitu jarak tegak lurus antara dua muka gelombang tsunami.

Dibandingkan dengan laju perpindahan kerapatan energi gelombang tsunami seperti pada persamaan (7), laju perpindahan energi mekanik gelombang tsunami lebih relevan digunakan untuk mengakomodasi efek 'shoaling' dan refraksi sekaligus. Dalam hal ini didefinisikan sebagai,

$$\psi = \sqrt{gH} \frac{1}{2} \rho g a^2 \pi b \quad (12)$$

maka persamaan (8) berkembang menjadi,

$$\frac{d\psi}{dx} = \frac{d}{dx} H^{1/2} a^2 b = 0 \quad (13)$$

Dengan menggunakan indeks 1 dan 2 secara berturut-turut menyatakan lokasi yang berada di *offshore* dan *onshore*, kekekalan energi mekanik tsunami dituliskan sebagai,

$$H_1^{1/2} a_1^2 b_1 = H_2^{1/2} a_2^2 b_2 \quad (14)$$

di mana b_1 dan b_2 berturut-turut menyatakan jarak antara dua muka gelombang tsunami di *offshore* dan *onshore*.

Apabila menggunakan prosedur yang sama, yaitu penggantian beberapa simbol, $H_1 = D$, $H_2 = d$, $a_1 = \eta$, $a_2 = R$, $b_1 = B$ dan $b_2 = b$ seperti juga telah dibahas oleh Cholifah and Prastowo (2017), maka persamaan (10) berubah menjadi,

$$\mathcal{R} = \left(\frac{D}{d}\right)^{1/4} \left(\frac{B}{b}\right)^{1/2} \eta \quad (15)$$

di mana \mathcal{R} adalah estimasi *run-up* dengan menyertakan dua efek sekaligus, yaitu pendangkalan pantai (*shoaling*) dan refraksi gelombang (WMO, 1998; Sorensen, 2006, Lehfeltd *et al.*, 2007; Marchuk and Vasiliev, 2014). Menurut Cholifah and Prastowo (2017), persamaan di atas disebut sebagai *modified Green's Law*.

Kedua besaran yaitu B dan b pada persamaan (15) dalam praktiknya sulit untuk ditentukan, oleh karena itu diperkenalkan koefisien refraksi yaitu K_r dan koefisien *shoaling* dituliskan sebagai K_s untuk kesetaraan penulisan,

$$\mathcal{R} = K_s K_r \eta \quad (16)$$

persamaan di atas digunakan untuk estimasi tinggi *run-up* yang dihitung dengan *modified Green's Law*.

METODE

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data sekunder yang diperoleh dari rekaman instrumen ukur lapangan *Deep-ocean Assessment Reports of Tsunamis (DART) buoys and tide gauges* yang dikelola oleh NOAA di laman https://nctr.pmel.noaa.gov/database_devel.html (berupa informasi grafis dalam bentuk *waveform* dan data numerik elevasi muka laut η saat gelombang tsunami tiba di stasiun pengamatan), data batimetri global (kedalaman lokal laut *offshore* D dan kedalaman pantai *onshore* d) di <https://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/>. Dengan kedua data batimetri global tersebut, yaitu D dan d diukur pada posisi lintang dan bujur tertentu.

Estimasi *run-up* dalam penelitian ini menggunakan persamaan (10) yang disebut dengan *basic Green's Law* dan persamaan (15) yang disebut *modified Green's Law*. Rumusan *basic Green's Law* hanya melibatkan parameter eksternal akibat pendangkalan lokal yang dikenal sebagai efek 'shoaling'. Sedangkan *modified Green's Law* selain parameter eksternal, juga melibatkan parameter internal dari gelombang yaitu efek refraksi. Efek ini terjadi ketika gelombang tsunami menemui struktur fisis yang berbeda sehingga mengalami pembelokan arah rambat gelombang. Ditunjukkan dengan adanya perubahan muka gelombang tsunami yang lebih rapat saat mendekati pantai.

Penelitian ini membahas estimasi *tsunami run-up* untuk 2 kasus, yaitu Samoa 2009 dan Palu-Donggala 2018. Estimasi *run-up* menggunakan *the basic Green's Law* dan *the modified Green's Law* dihitung menggunakan aplikasi excel, lalu hasil estimasi dibandingkan dengan data survei lapangan R_{obs} yang ditampilkan dalam bentuk tabel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil estimasi *run-up* untuk 2 kasus tsunami yang dihitung dengan *the basic Green's Law* dan *the modified Green's Law* dibahas pada bagian setelah ini.

Kasus Samoa 2009 dengan basic Green's Law

Hasil estimasi *run-up* pada kasus Samoa 2009 yang dihitung menggunakan *the basic Green's Law* di 10 lokasi pengamatan ditampilkan pada tabel 1. Informasi pada tabel menunjukkan bahwa data pada 2 lokasi pengamatan menunjukkan nilai R_{est} mendekati R_{obs} , ditandai dengan tanda centang pada kolom terakhir. Sedangkan mayoritas data memiliki perbedaan signifikan antara nilai R_{est} dan R_{obs} yaitu melebihi 20%, yang ditunjukkan dengan tanda silang. Sebagian merepresentasikan lokasi dengan kondisi *under-estimate*, $R_{est} < R_{obs}$ dan sebagian yang lain dengan kondisi *over-estimate*, $R_{est} > R_{obs}$.

Tabel 1. Estimasi tsunami *run-up* berbasis persamaan (10) untuk kasus Samoa 2009.

D (m)	Lintang	Bujur	η (m)	d (m)	Lintang	Bujur	R (m)		Basic Green's Law
							R_{est}	R_{obs}	
94	14,27° LS	170,87° BB	3,80	3,55	14,32° LS	170,84° BB	8,63	8,97	✓
152	14,34° LS	170,70° BB	2,80	1,61	14,32° LS	170,70° BB	8,73	8,14	✓
79	14,35° LS	170,83° BB	3,80	3,2	14,33° LS	170,83° BB	8,47	7,00	x
360	14,27° LS	170,81° BB	3,80	1,8	14,30° LS	170,81° BB	14,29	5,78	x
38	14,27° LS	170,74° BB	3,10	0,75	14,29° LS	170,72° BB	8,26	5,00	x
277	13,50° LS	172,88° BB	0,80	53,0	13,50° LS	172,79° BB	1,21	4,57	x
54	14,27° LS	170,68° BB	2,31	6,09	14,27° LS	170,69° BB	3,99	3,04	x
76	13,74° LS	171,75° BB	0,78	11,0	13,83° LS	171,76° BB	1,26	2,81	x
41	14,27° LS	170,69° BB	2,31	5,77	14,28° LS	170,69° BB	3,77	2,73	x
161	13,80° LS	172,32° BB	0,90	2,0	13,77° LS	172,32° BB	2,70	1,92	x

Kasus Palu-Donggala 2018 dengan basic Green's Law

Tsunami di Palu dan Donggala dipicu oleh aktivitas seismik di sesar Palu-Koro. Pada penelitian ini, 10 lokasi pengamatan berada di sekitar Teluk Palu, di mana hanya terdapat satu instrumen ukur ketinggian gelombang, yaitu *tide gauge* di Pelabuhan Pantoloan. Oleh karena itu, data elevasi laut η di setiap lokasi pengamatan bernilai sama. Meskipun demikian, R_{est} yang dihitung di masing-masing lokasi memiliki nilai yang berbeda. Hal ini menunjukkan bahwa kedalaman lokal laut dan pantai memiliki peran yang sangat krusial dalam menentukan ketinggian *run-up*, sesuai prediksi *basic Green's Law* berbasis efek *shoaling*. Namun mayoritas data pada tabel 2 bertanda silang, yang menunjukkan bahwa R_{est} menyimpang jauh dari R_{obs} . Sehingga dapat diketahui bahwa estimasi *run-up* berbasis persamaan (10) masih meleset jauh dari fakta di lapangan. Hal ini mengimplikasikan perlunya perluasan teori *basic Green's Law* dengan memasukkan efek internal dari gelombang tsunami saat merambat mendekati pantai dan mengalami reduksi kecepatan, yaitu efek refraksi.

Tabel 2. Estimasi tsunami *run-up* berbasis persamaan (10) untuk kasus Palu-Donggala 2018.

D (m)	Lintang	Bujur	η (m)	d (m)	Lintang	Bujur	R (m)		Basic Green's Law
							R_{est}	R_{obs}	
140	0,84° LS	119,84° BT	1,7	4	0,88° LS	119,84° BT	4,13	6,08	x
139	0,78° LS	119,83° BT	1,7	11,3	0,78° LS	119,80° BT	3,18	5,4	x
157	0,78° LS	119,84° BT	1,7	31,76	0,78° LS	119,86° BT	2,53	4,75	x
144	0,76° LS	119,81° BT	1,7	20,19	0,76° LS	119,79° BT	2,78	4,33	x
122	0,68° LS	119,80° BT	1,7	41,45	0,68° LS	119,82° BT	2,23	3,25	x
127	0,70° LS	119,80° BT	1,7	27,86	0,70° LS	119,84° BT	2,48	3,13	x
82	0,86° LS	119,84° BT	1,7	10,52	0,88° LS	119,84° BT	2,84	3	✓
84	0,65° LS	119,79° BT	1,7	23,29	0,65° LS	119,81° BT	2,34	2,5	✓
131	0,68° LS	119,79° BT	1,7	10	0,68° LS	119,77° BT	3,23	2	x
66	0,67° LS	119,78° BT	1,7	14	0,67° LS	119,75° BT	2,5	1,7	x

Kasus Samoa 2009 dengan modified Green's Law

Estimasi tinggi *run-up* pada tsunami Samoa 2009 yang dihitung dengan *modified Green's Law* ditampilkan pada tabel 3. Sesuai isian pada tabel, beberapa lokasi tidak memberikan data koefisien refraksi K_r , sehingga nilai R_{est} tidak dapat ditentukan. Satu lokasi pengamatan yaitu baris ke 6, memberikan penyimpangan yang sangat besar antara R_{est} dan R_{obs} . Temuan ini tidak berarti bahwa estimasi *run-up* dengan menggunakan persamaan (15) tidak lebih baik daripada persamaan (10) mengingat mayoritas data pada tabel 3 menunjukkan hal sebaliknya (6 dari 10 titik pengamatan memberikan $R_{est} \sim R_{obs}$).

Tabel 3. Estimasi tsunami *run-up* berbasis persamaan (15) untuk kasus Samoa 2009.

D (m)	d (m)	K_s	K_r	η (m)	R (m)		Basic Green's Law	Modified Green's Law
					R_{est}	R_{obs}		
94	3,55	2,27	1,16	3,80	8,63	8,97	✓	✓
152	1,61	3,12	-1,03	2,80	8,73	8,14	✓	✓
79	3,2	2,23	0,78	3,80	8,47	7,00	x	✓
360	1,8	3,76	0,33	3,80	14,29	5,78	x	✓
38	0,75	2,66	0,65	3,10	8,26	5,00	x	✓
277	53	1,51	0,99	0,80	1,21	4,57	x	x
54	6,09	1,73	-	2,31	3,99	3,04	x	-
76	11	1,62	-	0,78	1,26	2,81	x	-
41	5,77	1,63	-	2,31	3,77	2,73	x	-
161	2	3	0,67	0,90	2,70	1,92	x	✓

Kasus Palu-Donggala 2018 dengan modified Green's Law

Estimasi tinggi *run-up* R_{est} pada kasus tsunami Palu-Donggala 2018 yang didiskripsikan pada tabel 4 memiliki kesesuaian yang lebih baik jika dibandingkan dengan estimasi *run-up* R_{est} berbasis persamaan (10). Sebagaimana terlihat dari jumlah tanda ✓ (centang) pada kolom terakhir yang jauh lebih banyak daripada kolom sebelumnya, sekaligus menunjukkan bahwa dalam hal estimasi *run-up*, *modified Green's Law* adalah lebih baik jika dibandingkan dengan *basic Green's Law*.

Tabel 4. Estimasi tsunami run-up berbasis persamaan (15) untuk kasus Palu-Donggala 2018.

D (m)	d (m)	K _s	K _r	η (m)	R (m)		Basic Green's Law	Modified Green's Law
					R _{est}	R _{obs}		
140	4	2,43	-	1,7	-	6,08	x	-
139	11,3	1,87	1,53	1,7	4,87	5,4	x	✓
157	31,76	1,49	1,58	1,7	4	4,75	x	✓
144	20,19	1,63	1,44	1,7	4	4,33	x	✓
122	41,45	1,31	1,29	1,7	2,88	3,25	x	✓
127	27,86	1,46	1,06	1,7	2,63	3,13	x	✓
82	10,52	1,67	0,94	1,7	2,67	3	✓	✓
84	23,29	1,38	0,96	1,7	2,25	2,5	✓	✓
131	10	1,9	-	1,7	-	2	x	-
66	14	1,47	-	1,7	-	1,7	x	-

Kegagalan basic Green's Law

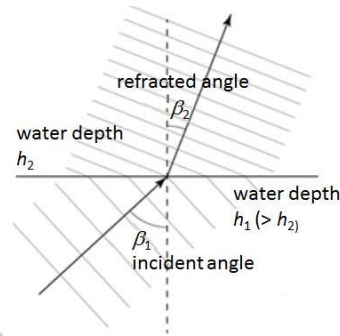
Hasil-hasil perhitungan R_{est} dalam penelitian ini dibandingkan dengan data nilai R_{obs} dari survei lapangan, di mana kesesuaian nilai antara keduanya telah dilaporkan dalam tabel 1 dan tabel 2. Batas maksimal penyimpangan R_{est} dari R_{obs} yang masih diperbolehkan adalah 20% (Cholifah and Prastowo, 2017). Hal ini berarti apabila R_{est} menyimpang lebih dari 20% relatif terhadap R_{obs}, maka persamaan (10) dinyatakan tidak valid (x) dan apabila R_{est} menyimpang kurang dari 20%, maka persamaan (15) dinyatakan valid (✓). Data run-up pada tabel 1 dan tabel 2 memberikan fakta bahwa dari 10 lokasi, estimasi run-up yang menyimpang dari data lapangan adalah sebesar 80%, baik kondisi under-estimated maupun over-estimated.

Penyimpangan R_{est} dari R_{obs} bisa terjadi karena banyak faktor yang ikut menentukan run-up, misalnya karena pengaruh kompleksitas topografi dan akurasi batimetri dekat pantai (Sorensen, 2006; Mori et al., 2011). Selain itu basic Green's Law pada persamaan (10) hanya melibatkan parameter eksternal yang terkait dengan efek pendangkalan pantai, sedangkan parameter internal terkait fenomena refraksi saat gelombang tsunami mengalami reduksi kecepatan akibat perubahan kedalaman lokal laut belum disertakan. Dengan demikian, perluasan rumusan basic Green's Law dengan memasukkan 1 faktor dominan yang berasal dari perilaku gelombang yaitu efek refraksi harus dilakukan.

Keberhasilan modified Green's Law

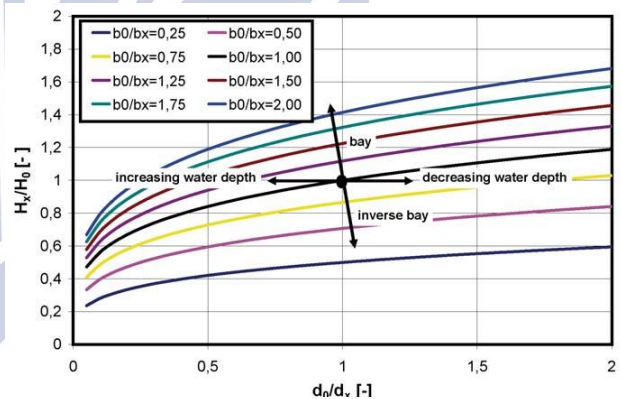
Rumusan modified Green's Law selain melibatkan parameter eksternal yaitu efek shoaling, juga menyertakan parameter internal yaitu efek refraksi. Data run-up pada tabel 3 dan tabel 4 menunjukkan bahwa jumlah tanda ✓ mengalami peningkatan. Level kesesuaian rata-rata antara R_{est} dan R_{obs} adalah 95% (dengan mengabaikan lokasi pengamatan yang tidak memberikan K_r sehingga R_{est} tidak bisa dihitung). Kesesuaian yang tinggi memberikan konfirmasi bahwa efek refraksi adalah penting.

Terdapat satu fenomena fisika yang penting dan pasti dialami oleh gelombang apabila menemui 'hambatan', misalnya perubahan arah rambat gelombang. Hambatan yang dimaksud bisa berasal dari perubahan kecepatan fase gelombang akibat perubahan kedalaman area lokal.



Gambar 2. Sketsa refraksi gelombang akibat perubahan kedalaman (SATREPS Chile Tsunami Project, 2016).

Lehfeldt et al. (2007) bahkan mengilustrasikan ketergantungan run-up terhadap perubahan kedalaman lokal (shoaling effect) dan perubahan arah rambat ('bay' atau refraction effect) dalam bentuk grafis berikut,



Gambar 3. Sketsa ketergantungan run-up terhadap efek kedalaman lokal dan efek refraksi gelombang (sumber: Lehfeldt et al., 2007).

Kesesuaian yang tinggi dari R_{est} terhadap R_{obs} juga menegaskan bahwa evolusi amplitudo gelombang tsunami dari offshore menuju onshore yang terukur sebagai tinggi run-up akan lebih akurat apabila dipelajari dan dihitung dengan menggunakan modified Green's Law yang diberikan oleh persamaan (15) dibandingkan dengan basic Green's Law yang diberikan oleh persamaan (10). Satu kasus yang dikaji dalam penelitian ini adalah kasus tsunami Palu-Donggala 2018, di mana diyakini sumber penyebab tsunami adalah longsor bawah laut yang dipicu oleh aktivitas seismik pada jalur patahan Palu-Koro (Kompas, 15 November 2018). Hal ini berarti bahwa persamaan (15) berlaku valid tanpa dipengaruhi sumber dan mekanisme gempa pemicu tsunami, apakah aktivitas seismik di zona subduksi atukah pada jalur patahan aktif.

PENUTUP

Simpulan

Penelitian ini menghitung tinggi *tsunami run-up* dengan menggunakan Hukum Green. Berdasarkan hasil penelitian, dapat ditarik kesimpulan yaitu:

- 1) Parameter fisis yang disertakan dalam Hukum Green adalah parameter eksternal, yang disebut dengan efek 'shoaling' karena dipicu oleh perubahan kedalaman lokal laut saat gelombang tsunami mendekati garis pantai dan parameter internal yang dikenal dengan efek refraksi karena dipicu oleh perubahan kecepatan saat tsunami menemui pendangkalan lokal sehingga berakibat mengalami pembelokan arah rambat.
- 2) Penelitian ini menganalisis estimasi *tsunami run-up* menggunakan *basic Green's Law* dan membandingkan validitas estimasi dengan *modified Green's Law* relatif terhadap referensi dari data survei lapangan. Untuk dua kasus tsunami yang ditinjau dalam penelitian ini yaitu Samoa 2009 dan Palu-Donggala 2018, hasil estimasi *run-up* R_{est} yang menggunakan *modified Green's Law* memberikan kesesuaian $\sim 95\%$ terhadap data survei lapangan R_{obs} , lebih baik daripada *basic Green's Law* yang hanya memberikan kesesuaian $\sim 20\%$. Dengan kata lain, persamaan (15) yaitu *modified Green's Law* adalah efektif untuk estimasi *run-up*.
- 3) Validitas *modified Green's Law* tersebut berlaku untuk kasus tsunami, baik yang dibangkitkan melalui mekanisme gempa tektonik di zona subduksi atau zona patahan. Persamaan (15) atau yang disebut *modified Green's Law*, diturunkan dengan mengabaikan efek refleksi dan bentuk geometri pantai. Dengan kata lain, kedua faktor tersebut (efek refleksi dan geometri pantai) merupakan faktor minor yang tidak dibahas dalam penelitian ini.

Saran

Estimasi *tsunami run-up* merupakan salah satu parameter penting studi mitigasi terkait bahaya bencana tsunami yang bermanfaat untuk mereduksi risiko bencana di wilayah kepulauan Indonesia dengan kerentanan yang tinggi sampai sekecil mungkin. Oleh karena itu, sangat baik bila sesudah ini dirancang penelitian lanjutan yang menerapkan Hukum Green untuk estimasi *run-up* dengan data dari kasus tsunami yang lebih komprehensif dan melaporkannya dalam bentuk grafis agar perilaku tsunami saat tiba di pantai dapat dipahami dengan lebih baik. Penelitian lanjutan bisa pula mengembangkan Hukum Green dengan memasukkan 1 faktor tambahan, misalnya efek refleksi atau geometri (morfologi) pantai.

DAFTAR PUSTAKA

- Charvet, I., Eames, I. and Rossetto, T. 2013. New tsunami runup relationships based on long wave experiments. *Ocean Modelling*, **69**, 79-92.
- Cholifah, L. and Prastowo, T. 2017. A simple parameterization for tsunami run-up prediction. *Journal of Science and Science Education*, **1**(2), 7-13.
- Choi, B. H., Kaistrenko, V., Kim, K. O., Min, B. I. and Pelinovsky, E. 2011. Rapid forecasting of tsunami runup heights from 2-D numerical simulations, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 707-714.
- Goto, K., Fujima, K., Sugawara, D., Fujino, S., Imai, K., Tsudaka, R., Abe, T. and Haraguchi, T. 2013. Field measurements and numerical modeling for the run-up heights and inundation distances of the 2011 Tohoku-oki tsunami at Sendai plain, Japan. *Earth, Planets Space*, **64**, 1247-1257.
- 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. 2016. *Pemutakhiran Sumber dan Peta Gempa Indonesia 2017*. Pusat Studi Gempa Bumi Nasional: Jakarta.
- Lehfeldt, R., Milbradt, P., Plüss, A. and Schüttrumpf. 2007. Propagation of a tsunami-wave in the North Sea. *Die Küste*, **72**, 105-123.
- Marchuk, A. G. and Vasiliev, G. S. 2014. The fast method for a rough tsunami amplitude estimation. *Mathematical Modeling in Geophysics*, **17**, 21-34.
- Mori, N., Takahashi, T., Yasuda, T. and Yanagisawa, H. 2011. Survey of 2011 Tohoku earthquake tsunami inundation and run-up. *Geophysical Research Letters*, **38**, L00G14.
- SATREPS Chile Tsunami Project. 2016. *Tsunami Basics for Engineering*. Publication Series Vol. 3. 1-46
- Sorensen, R. M. 2006. *Basic Coastal Engineering*. 3rd Edition. New Delhi: Springer, US, 1-324. e-ISBN: 978-0-387-23333-8.
- 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*, **172**, 3313-3341.
- Synolakis, C. E. 1991. Green's law and the evolution for solitary waves. *Physics of Fluid A*, **3**(3), 490-491.
- 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. e-ISBN: 978-90-481-8702-7.
- World Meteorological Organisation (WMO). 1998. *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. 2nd Edition. WMO-No.702: Geneva, Switzerland, 1-168. ISBN: 92-63-12702-6.