

08

MODEL PERAMBATAN
GELOMBANG TSUNAMI DAN
ANTISIPASI BENCANA
LETUSAN GUNUNG ANAK
KRAKATAU

(Elin Herlinawati)

MODEL PERAMBATAN GELOMBANG TSUNAMI DAN ANTISIPASI BENCANA LETUSAN GUNUNG ANAK KRAKATAU

Elin Herlinawati
(elin@ecampus.ut.ac.id)

Abstrak

Perambatan gelombang tsunami dapat disimulasikan dengan menggunakan persamaan matematika sebagai upaya memperoleh prediksi waktu kedatangan dari sumber gelombang tersebut ke pantai. Gelombang tsunami di sekitar Banten dan Lampung tidak hanya disebabkan oleh gempa akibat letusan Gunung Anak Krakatau melainkan juga oleh longsoran erupsinya yang jatuh ke laut. Berdasarkan persamaan gelombang panjang non linear dua dimensi dengan metode beda hingga dari sumber gelombang di lokasi Gunung Anak Krakatau (posisi awal koordinat $6^{\circ}06'00''$ LS dan $105^{\circ}24'00''$ BT), maka perambatan gelombang menyebar dan terdispersi dengan waktu antara 58-84 menit untuk mencapai pesisir pantai. Model perambatan gelombang tsunami karena longsoran erupsi Gunung Anak Krakatau berdasarkan alat pengukur pasang surut memberikan hasil bahwa jeda waktu kedatangan dari pusat timbulnya gelombang ke masing-masing stasiun pengukur pasang surut sekitar 29-142 menit dengan tinggi gelombang maksimum berkisar antara 0,36-0,91 meter. Dengan diperolehnya prediksi waktu tempuh gelombang tsunami sampai ke pantai, sebagai antisipasi bencana yang sangat penting dilakukan adalah pemasangan dan pemeliharaan alat pendeteksi tsunami dan rambu-rambu arah evakuasi bencana.

Kata Kunci: Gunung Anak Krakatau, perambatan gelombang, tsunami

PENDAHULUAN

Gunung Anak Krakatau merupakan gunung vulkanik yang berada di Selat Sunda. Gunung ini terbentuk akibat letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883. Kejadian letusan pada tahun tersebut menyebabkan gelombang tsunami dahsyat dan menelan korban jiwa kurang lebih 36.417 orang. Tsunami yang terjadi pada tahun 1883 sangat besar beresiko akan terulang kembali (Mahi dan Zakaria, 2008). Hal ini disebabkan karena dari tahun 1927, Gunung Anak Krakatau terus bertambah tinggi dan pada tahun 2005, sekitar 75 tahun berlalu, ketinggiannya telah mencapai 315 meter di atas permukaan laut. Badan Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG) pernah menetapkan kondisi gunung ini dalam status Siaga (Level III) karena aktivitas vulkanik yang cukup tinggi pada saat itu. Status ini memberi peringatan bahwa nelayan, wisatawan, maupun penduduk sekitar dilarang mendekati gunung tersebut dalam radius tiga kilo meter, karena kemungkinan akan meletusnya gunung tersebut dalam waktu dekat adalah besar.

Salah satu upaya memperkirakan kemungkinan terjadinya tsunami akibat letusan Gunung Krakatau adalah dengan membuat model atau simulasi perambatan gelombang tsunami secara numerik. Pemodelan perambatan tsunami telah dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya pemodelan tsunami akibat gempa tektonik yang dilakukan oleh Marchuk & Anisimov (2001), Horrillo dkk (2004), Watts dkk (2005), Kowalk dan Proshutinsky (2006), dan pemodelan tsunami akibat gempa vulkanik yang dilakukan oleh Kawamata dkk (1993) dan Hantoro dkk (2007). Selain diakibatkan oleh gempa bumi, tsunami juga dapat diakibatkan oleh runtuhannya erupsi gunung api yang jatuh ke laut sehingga menyebabkan gelombang tinggi dan perambatan gelombang yang terjadi menyebabkan tsunami di pulau-pulau sekitarnya seperti erupsi Gunung Anak Krakatau yang terjadi pada tanggal 22 Desember 2018. Erupsi tersebut menyebabkan gelombang tsunami di sekitar pantai Anyer, Carita, Labuan, dan Lampung, serta pulau-pulau kecil di sekitarnya.

Penelitian mengenai tsunami yang diakibatkan oleh fenomena longsoran erupsi letusan gunung ke laut ini (bukan akibat gempa bumi) telah dilakukan oleh beberapa peneliti, diantaranya yaitu Yokoyama (1987),

Nomanbhoy dan Satake (1995), dan Maeno dan Imamura (2011). Penelitiannya membahas mengenai simulasi propagasi tsunami selama berlangsungnya erupsi Gunung Krakatau 1883. Selain itu, Mader dan Gittings (2006) juga melakukan pemodelan numerik untuk ledakan hidrovulkanik dan tsunami Krakatau 1883, sedangkan Maeno (2005), Keating dan McGuire (2000), Ward (2001), Harbitz dkk (2006), Fritz dkk (2008), Waythomas dkk (2009), Kelfoun dkk (2010), Maeno dan Imamura (2011) dan Giachetti (2012) melakukan penelitian mengenai pembangkit tsunami dari erupsi vulkanik dan tanah longsor akibat reruntuhan vulkanik. Erupsi vulkanik di atas permukaan dapat menghasilkan longsor yang mengalir ke laut. Hal ini dapat memicu timbulnya gelombang tsunami.

Selanjutnya, dalam menghadapi peristiwa tsunami yang terjadi secara tiba-tiba, khususnya tsunami Gunung Anak Krakatau, tempat dan arah evakuasi menjadi salah satu perhatian utama dalam penanggulangan bencana tsunami. Penentuan tempat evakuasi bencana juga harus memperhitungkan kecepatan perambatan gelombang. Hal ini dapat dikaji dengan mempelajari histori kejadian tsunami Gunung Krakatau pada tahun 1883 dan tsunami yang pernah terjadi di daerah lain dengan karakteristik gunung api yang serupa dengan Gunung Anak Krakatau. Selain itu, pengkajian mengenai kontur permukaan bumi di wilayah jangkauan tsunami juga menjadi perhatian. Hal ini akan mempengaruhi waktu dan kecepatan datang tsunami di daerah pesisir pantai khususnya di wilayah pemukiman penduduk. Jeda waktu ini dapat dimanfaatkan oleh penduduk sekitar untuk melakukan penyelamatan diri ke tempat evakuasi bencana sebelum tsunami datang menghantam pemukiman penduduk.

Pada artikel ini, perambatan gelombang tsunami akibat gempa vulkanik dari letusan Gunung Anak Krakatau dimodelkan dengan persamaan gelombang panjang non linear dua dimensi dengan menggunakan pendekatan formula beda hingga dengan lokasi sumber gelombang diasumsikan sama dengan lokasi Gunung Anak Krakatau. Sementara itu, perambatan gelombang tsunami akibat longsor erupsi Gunung Anak Krakatau diobservasi dari waktu kedatangan di beberapa tempat kemudian dimodelkan secara numerik perambatan di sepanjang selat Sunda ke arah Banten dan Lampung. Berdasarkan model tersebut, dapat dilihat

karakteristik dan perilaku gelombang sehingga kecepatan dan arah perambatan gelombang dapat dipelajari. Hal ini diperlukan sebagai antisipasi bencana karena dapat diprediksinya selang waktu yang dibutuhkan gelombang tsunami sampai di pesisir/pemukiman.

Berbagai upaya perlu dilakukan oleh berbagai pihak dalam menghadapi kemungkinan bencana dari aktivitas Gunung Anak Krakatau. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir korban dan kerugian jika sewaktu-waktu bencana tsunami Gunung Anak Krakatau terjadi. Upaya yang dilakukan diantaranya dengan mengamati setiap aktivitas Gunung Anak Krakatau, memasang alat pendeteksi tsunami dan pemeliharannya, melakukan pemodelan perambatan gelombang tsunami untuk mengestimasi waktu kedatangan dan kecepatan gelombang tsunami, literasi bencana, dan rencana evakuasi bencana dan pasca bencana, dan upaya-upaya lainnya. Semua upaya tersebut akan mencapai hasil yang optimum jika terciptanya kolaborasi dan kerjasama yang baik dari semua pihak. Pada tulisan disajikan pemodelan perambatan gelombang tsunami sebagai salah satu upaya untuk mengestimasi waktu kedatangan dan kecepatan gelombang tsunami dari letusan dan erupsi Gunung Anak Karakatau sampai ke pantai pesisir Provinsi Banten dan Lampung.

PEMBAHASAN

Gunung Anak Krakatau

Krakatau merupakan salah satu kepulauan vulkanik dan masih aktif. Krakatau juga merupakan nama gunung berapi. Gunung Krakatau (yang sekarang telah hilang akibat letusan pada tahun 1883) juga berada di kepulauan ini. Persisnya, Gunung Krakatau terletak di perairan Selat Sunda yang diapit oleh Pulau Sumatera dan Jawa. Setelah 200 tahun tertidur, pada tahun 1883, Gunung Krakatau memuntahkan isi perut bumi dengan sangat dahsyat. Akibat letusan yang terjadi pada saat itu, Gunung Krakatau dikenal dunia. Awan panas dan tsunami akibat letusan ini menyebabkan puluhan ribu korban meninggal. Suara letusannya terdengar hingga Australia dan Afrika, sekitar 4.653 km dari pusat letusan. Daya ledaknya diperkirakan mencapai 30.000 kali bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki

pada akhir Perang Dunia II. Letusan Gunung Krakatau pada tahun 1883 menjadi salah satu letusan gunung api terdahsyat pada abad ke-19 setelah Gunung Tambora pada tahun 1815 (Tantri, 2014).



Sumber: Sandick (1890)

Gambar 1.
Letusan Gunung Krakatau Tahun 1883

Pada masa itu, letusan ini menyebabkan perubahan suhu dan iklim dunia. Perubahan iklim terjadi di Eropa, Jepang, dan Amerika Serikat. Atmosfer menjadi gelap akibat debu vulkanik yang menutupi atmosfer bumi. Sebagian besar sinar matahari tidak dapat mencapai permukaan bumi karena tidak dapat menembus lapisan atmosfer. Matahari bersinar redup sampai satu tahun berikutnya. Suhu turun drastis hingga tujuh derajat celsius. Hamburan debu tampak di langit Norwegia hingga New York. Getarannya pun terasa hingga Eropa. Diperkirakan tsunami yang terjadi setinggi 40 meter dan mencapai 30 mil (kurang lebih 48,28 km) dari pantai menghancurkan pemukiman di pesisir pantai. Tsunami juga

menenggelamkan beberapa kota seperti Caringin, Panimbang, hingga Cirebon (Tantri, 2014).

Setelah kurang lebih 40 tahun letusan Gunung Krakatau, sekitar tahun 1927, dari kawasan kaldera purba muncul gunung api yang dikenal sebagai Anak Krakatau. Gunung api tersebut masih aktif dan terus bertambah tinggi. Kecepatan pertumbuhan tingginya sekitar 0,5 meter per bulan. Catatan lain mengatakan, pertumbuhannya sekitar 4 cm per tahun. Jika dihitung, maka dalam waktu 25 tahun, penambahan tinggi anak Karakatu bisa mencapai 190 meter lebih tinggi dari 25 tahun sebelumnya. Saat ini ketinggian Anak Krakatu mencapai sekitar 230 meter di atas permukaan laut, sedangkan Gunung Karakatau sebelum meletus memiliki tinggi 813 meter di atas permukaan laut.



Sumber: Wikipedia Contributor (2008)

Gambar 2.
Gunung Anak Krakatau (Februari 2008)

Gunung Anak Krakatau terus melakukan erupsi hingga puncaknya pada tanggal 22 Desember 2018. Erupsi Gunung Anak Krakatau menyebabkan runtuhnya bagian puncak Gunung Anak Krakatau yang kemudian bergerak cepat jatuh ke laut. Hal ini menyebabkan terjadinya gelombang tinggi (dalam hal ini gelombang tsunami) yang perambatannya sampai pada

sebagian pantai provinsi Banten dan Lampung. Gelombang tsunami juga menghempas pulau-pulau kecil di sekitar Gunung Anak Krakatau. Kecepatan perambatan gelombang tersebut dapat diprediksi dengan melakukan pemodelan dari gelombang tsunami yang terjadi.

MODEL PERAMBATAN GELOMBANG TSUNAMI

Model matematika yang digunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami dalam artikel ini menggunakan model hidrodinamik persamaan gelombang panjang yang diturunkan dari persamaan Navier-Stokes dan *digital elevation model (DEM)*.

1. Tsunami Akibat Gempa Vulkanik Gunung Anak Krakatau

a. Persamaan Gelombang

Pada artikel ini, pemodelan perambatan gelombang tsunami menggunakan persamaan gelombang panjang non linear dua dimensi. Model tersebut berupa persamaan momentum gerak gelombang permukaan baik dari arah sumbu x maupun sumbu y , dan persamaan kontinuitas. Zakaria (2009) menjelaskan persamaan-persamaan tersebut sebagai berikut.

- Persamaan momentum,

Arah sumbu- x

$$\partial u \partial t + u \partial u \partial x + v \partial u \partial y = g \partial \eta \partial x - r \cdot u \cdot u^2 + v^2 D, (1)$$

Arah sumbu- y

$$\partial v \partial t + u \partial v \partial x + v \partial v \partial y = g \partial \eta \partial y - r \cdot v \cdot u^2 + v^2 D, (2)$$

- Persamaan kontinuitas

$$\partial \eta \partial t = \partial(D \cdot u) \partial x - \partial(D \cdot v) \partial y, (3)$$

dengan η menyatakan besar elevasi dari permukaan air (dalam meter), r menyatakan koefisien gesekan dasar perairan yakni $r = 0,025$, u menyatakan kecepatan pada arah x , v kecepatan pada arah y , g percepatan

gravitasi (dalam meter/detik²), dan $D = h + \eta$ menyatakan kedalaman air total.

Kemudian, untuk mencari solusi dari persamaan perambatan gelombang non linear dua dimensi tersebut, digunakanlah *finite different method* khususnya metode ekspilisit dengan domain waktu. Metode ini dapat dihampiri dengan menggunakan akurasi orde dua sebagai berikut.

$$\partial u \partial t = u_{i,j(k+1)} - u_{i,jk} \Delta x, \quad (4)$$

dengan Δt menyatakan tahapan waktu yakni 0,01 detik, dan $\Delta x = \Delta y$ menyatakan lebar grid. Dalam hal ini lebar grid yang digunakan sebesar 850 meter. Selanjutnya, dari persamaan (4) diperoleh

$$u \partial u \partial x = u_{i,jk} (u_{i+1,jk} - u_{i,jk} \Delta x),$$

$$v \partial u \partial y = v_{i,jk} (u_{i,(j+1)k} - u_{i,jk} \Delta y),$$

$$g \partial \eta \partial x = g (\eta_{i+1,jk} - \eta_{i,jk} \Delta x), \text{ dan}$$

$$r \cdot u \cdot u^2 + v^2 D = r \cdot u_{i,jk} (u_{i,jk})^2 + (v_{i,jk})^2 D,$$

sehingga persamaan momentum arah sumbu- x dapat ditulis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} u_{i,j(k+1)} - u_{i,jk} \Delta x + u_{i,jk} (u_{i+1,jk} - u_{i,jk} \Delta x) + v_{i,jk} (u_{i,(j+1)k} - u_{i,jk} \Delta y) \\ = g (\eta_{i+1,jk} - \eta_{i,jk} \Delta x - r \cdot u_{i,jk} (u_{i,jk})^2 + (v_{i,jk})^2 D). \end{aligned}$$

Selanjutnya, tinjau persamaan momentum arah sumbu- y ,

$$\partial v \partial t = v_{i,j(k+1)} - v_{i,jk} \Delta t,$$

$$v \partial v \partial y = v_{i,jk} (v_{i,(j+1)k} - v_{i,jk} \Delta y),$$

$$u \partial v \partial x = u_{i,jk} (v_{i+1,jk} - v_{i,jk} \Delta x),$$

$$g \partial \eta \partial y = g (\eta_{i,(j+1)k} - \eta_{i,jk} \Delta y),$$

$$r \cdot v \cdot u^2 + v^2 D = r \cdot v_{i,jk} (u_{i,jk})^2 + (v_{i,jk})^2 D,$$

diperoleh

$$v_{i,j(k+1)} - v_{i,jk} \Delta t + u_{i,jk} (v_{i+1,jk} - v_{i,jk} \Delta x) + v_{i,jk} (v_{i,(j+1)k} - v_{i,jk} \Delta y) = -g(\eta_{i,(j+1)k} - \eta_{i,jk} \Delta y) - r \cdot v_{i,jk} (u_{i,jk})^2 - (v_{i,jk})^2 D.$$

dengan $D_{i,jk} = h_{i,jk} + \eta_{i,jk}$.

Kemudian dengan menggunakan metode beda hingga pada persamaan kontinuitas dengan diperoleh

$$\eta_{i,j(k+1)} - \eta_{i,jk} \Delta t = -\partial(D_{i,jk} \cdot (u_{i,jk} - u_{i-1,jk} \Delta x) - u_{i,jk} \cdot (D_{i,jk} - D_{i-1,jk} \Delta x))$$

dan

$$Dv\partial y = D_{i,jk} \cdot (v_{i,jk} - v_{i,j-1k} \Delta y) + v_{i,jk} \cdot (D_{i,jk} - D_{i,j-1k} \Delta y).$$

b. Kondisi Batas Model

Persamaan yang digunakan untuk menghitung kondisi batas pada model perambatan gelombang tsunami adalah persamaan kondisi batas terbuka yang diformulasikan sebagai berikut,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \text{ dan } \frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

dengan h menyatakan kedalaman (konstan) sehingga refleksi dari *boundary* dapat direduksi menjadi

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \pm \sqrt{g \cdot h} \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta \right) = 0$$

Dengan h menyatakan kedalaman dasar perairan (dalam meter) sehingga perambatan gelombang untuk arah negatif dapat dituliskan sebagai berikut,

$$u_2 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_2 = u_2 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_1$$

dan perambatan gelombang untuk arah positif dituliskan sebagai berikut.

$$u_2 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_2 = u_0 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_0.$$

c. Kondisi Awal Model

Kondisi awal perambatan gelombang tsunami diasumsikan seperti diakibatkan meletusnya Gunung Krakatau tahun 1883. Sumber gelombang dalam pemodelan numerik merupakan sumber berupa titik. Pada lokasi Gunung Anak Krakatau diasumsikan terjadi pergerakan muka air atau gelombang setinggi 200 meter, hal ini diperlukan agar gelombang tersebut nantinya akan mengalami perambatan gelombang yang akan dihitung tinggi gelombang serta waktu yang diperlukan mencapai pantai.

d. Data Bathymetri

Pemodelan perambatan gelombang tsunami memerlukan data kontur kedalaman air. Kontur ini dinamakan bathymetri. Format yang dipergunakan adalah dalam format x, y , dan z . Data dengan lebar grid Δx dan Δy atau dengan resolusi 1 menit atau lebih kurang 800 meter. Data ini bisa diperoleh dari GEODAS dan GEBCO. GEODAS dan GEBCO tidak hanya memberikan data bathymetri tapi juga data topografi.

e. Hasil Simulasi

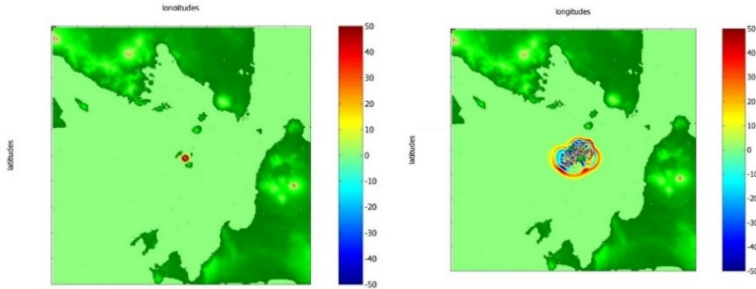
Sumulasi dilakukan pada tiga titik yaitu Teluk Betung, Kalianda, dan Merak. Sebagai pembanding waktu perambatan gelombang, percobaan dilakukan dalam tiga kali simulasi. Hal ini diperlukan untuk membandingkan galat dari masing-masing simulasi sehingga dapat diperkirakan waktu kedatangan gelombang di pesisir pantai. Hasil simulasi perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya Gunung Anak Krakatau disajikan dalam tabel berikut.

Tabel 1.
Waktu Perambatan Gelombang

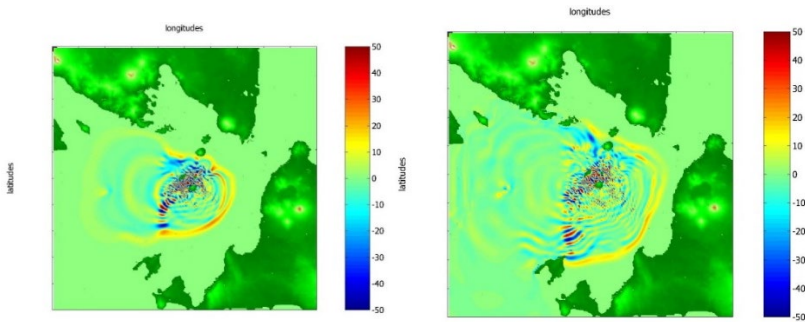
Lokasi	Simulasi 1 (menit)	Simulasi 2 (menit)	Simulasi 3 (menit)	Hasil
Teluk Betung	76	82	78	<5000 detik
Kalianda	48	48	45	2500 detik
Merak	51	47	58	< 3500 detik

Sumber: Zakaria (2009)

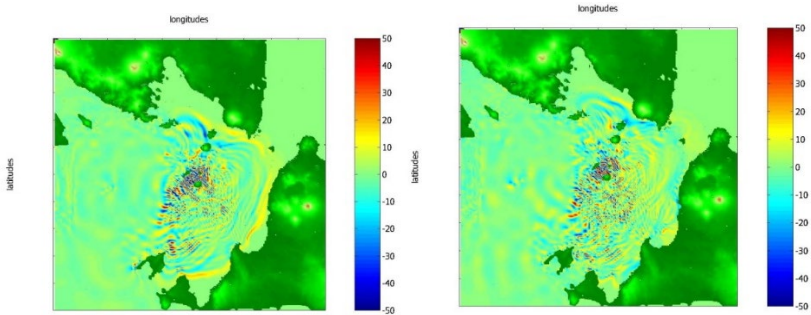
Perambatan gelombang dimulai dari pusat lokasi terbentuknya gelombang air laut kemudian menyebar ke sebagian pesisir pantai pulau Jawa dan Sumatera. Berdasarkan tabel di atas, hasil simulasi perambatan gelombang tsunami adalah sebagai berikut.



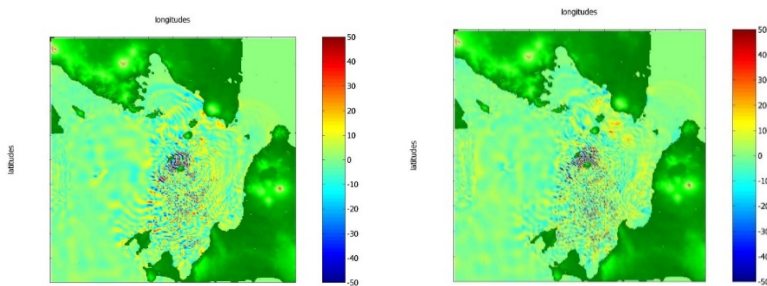
Gambar 3.
Perambatan Gelombang Tsunami $t = 50$ detik (kiri)
dan $t = 500$ detik (kanan)



Gambar 4
Perambatan Gelombang Tsunami
 $t = 1000$ detik (kiri) dan $t = 1500$ detik (kanan)



Gambar 5.
Perambatan Gelombang Tsunami
t = 2000 detik (kiri) dan t = 2500 detik (kanan)



Gambar 6.
Perambatan Gelombang Tsunami
t = 3000 detik (kiri) dan t = 3500 detik (kanan)

Gambar 3 s.d 6 menunjukkan simulasi perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya Gunung Anak Krakatau untuk setiap waktu t mulai dari 50 detik sampai dengan 5000 detik. Sumber gelombang yang dipergunakan untuk mensimulasikan letusan gunung berupa sumber gelombang titik dengan tipe Ricker wavelet. Gelombang yang dihasilkan lebih halus bila dibandingkan dengan gelombang sinus. Signal atau gelombang yang disimulasikan ini merupakan gelombang tunggal.

Koordinat awal munculnya gelombang diperkirakan dari koordinat $6^{\circ}06'00''$ LS dan $105^{\circ}24'00''$ BT, kemudian gelombang tsunami dengan ketinggian 200 meter merambat ke pantai di sekitar Lampung dan Banten. Selain itu, terdapat pulau-pulau kecil disekitar arah perambatan gelombang sehingga gelombang terhalang oleh pulau-pulau tersebut. Hal ini mengakibatkan gelombang tsunami yang merambat terdispersi.

Selanjutnya, dari Gambar 3 s.d 6, ampiltudo gelombang tsunami dan topografi dibedakan dengan menggunakan warna. Warna merah tua menyatakan maksimum amplitudo sedangkan warna biru tua menunjukkan minimum amplitudo. Warna hijau menunjukkan topografi/ketinggian permukaan tanah.

Jadi, waktu perambatan gelombang untuk mencapai pesisir pantai berdasarkan hasil simulasi yang telah disebutkan berkisar antara 2500-5000 detik. Namun, hal ini juga dipengaruhi oleh topografi yang dilalui gelombang dan tinggi awal gelombang yang ditimbulkan oleh letusan gunung api.

2. Tsunami Akibat Longsor Erupsi

Jika tsunami akibat longsoran erupsi Gunung Anak Krakatu, maka ketinggian gelombang maksimum di wilayah selatan pantai barat Jawa menjadi lebih tinggi daripada wilayah lain. Hal ini mungkin karena arah kehancuran pada sumbernya adalah ke arah barat daya dan arah perambatan tsunami secara bertahap berubah dari barat daya ke tenggara di selatan Gunung Anak Krakatau.

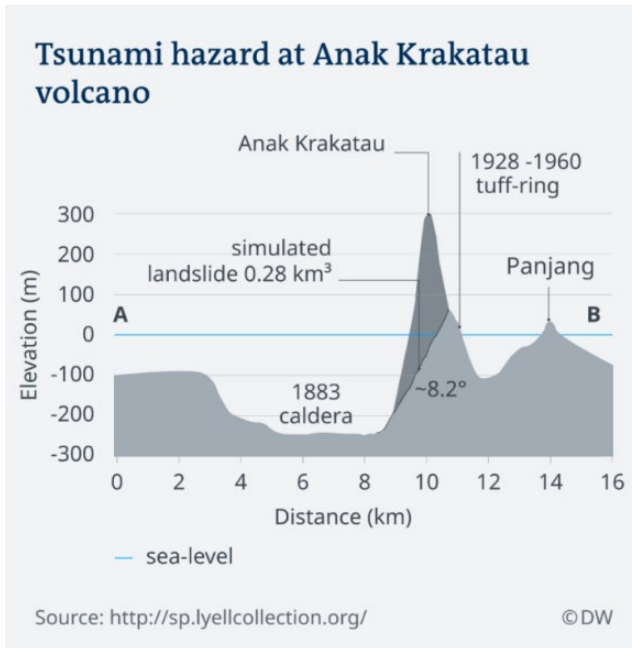


Sumber: Amos (2018)

Gambar 7.
Longsor Erupsi Gunung Anak Krakatau

Gelombang tsunami yang disebabkan oleh longsor dari Gunung Anak Krakatau seperti yang terjadi pada tanggal 22 Desember 2018 pernah dilakukan pengkajian sebelumnya oleh Dr. Thomas Giachetti, salah satu Asisten Profesor di Universitas Oregon, pada tahun 2012. Dalam penelitiannya, Giachetti membuat simulasi runtuhnya dinding kawah Gunung Anak Krakatau. Runtuhan ini berpotensi menimbulkan gelombang tsunami. Selain itu, longsor yang terjadi pada lereng bagian barat daya Gunung Anak Krakatau tidak boleh diabaikan. Longsoran tersebut berpotensi jatuh ke arah barat daya menuju kaldera yang terbentuk akibat letusan Gunung Krakatau tahun 1883. Longsoran ini mampu memicu gelombang yang dapat menyebar ke Selat Sunda dan kemungkinan berdampak pada kawasan pesisir pulau Jawa dan pulau Sumatera.

Lereng barat Gunung Anak Krakatau yang jatuh ke laut berdiri ditepi kaldera besar erupsi dahsyat Gunung Krakatau tahun 1883. Hal ini menyebabkan runtuhnya lereng tersebut. Seperti yang diilustrasikan pada gambar berikut.



Sumber: Giachetti (2012)

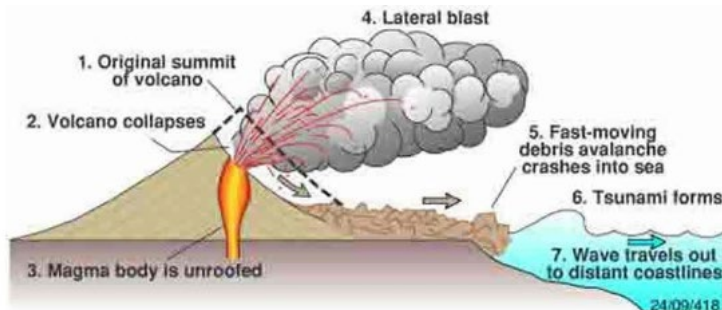
Gambar 8.
Lokasi Runtuhan bagian Gunung Anak Krakatau

Selain itu, lereng barat yang terbentuk menjadi lebih curam dengan cepat daripada lereng timur karena dipengaruhi oleh arus laut yang cukup kuat. Selama masa observasi, terlihat bahwa Gunung Anak Krakatau bertambah tinggi semakin cepat ke arah barat daya.

Pada Gunung Anak Krakatau, kaldera yang runtuh dan banyaknya bagian gunung berapi yang berkurang memunculkan tanah longsor bawah laut yang kemudian memicu gelombang tsunami. Hal serupa juga terjadi pada kaldera Santorini, Yunani. Bagian gunung yang jatuh ke bawah air laut menyebabkan gelombang seperti yang terjadi di Stromboli, Italia

Widjokongko (2019), ahli tsunami dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), mengakui bahwa lereng Gunung Anak Krakatau yang memiliki luas hampir 64 hektar mengalami longsor yang mengarah ke laut.

Longsor yang mengarah ke laut berpotensi menimbulkan gelombang tsunami di Selat Sunda seperti yang diilustrasikan pada Gambar 9 berikut.



Sumber: RC Emergency Reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018

Gambar 9.
Ilustrasi Gelombang yang Tercipta dari Erupsi Hasil Letusan Gunung Berapi

Proses simulasi perambatan gelombang tsunami, digunakan data waktu kedatangan gelombang tsunami di beberapa stasiun pengukur pasang surut seperti yang disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2
Waktu Kedatangan Gelombang
Berdasarkan Pengukur Pasang Surut Dibeberapa Titik

Pengukur Pasang Surut	Waktu kedatangan	Jeda waktu	Tinggi maksimal
Perkiraan waktu kejadian	22/12/2018 13:58	0	-
Marina Jambu	22/12/2018 14:27	29	0.91
Ciwandan	22/12/2018 14:33	35	0.35
Kota Agung	22/12/2018 14:35	37	0.36
Panjang	22/12/2018 14:53	55	0.28
Bengkunat	22/12/2018 16:20	142	0.20
Binuangan	Tidak terdeteksi	-	-

Sumber: Giachetti (2012)

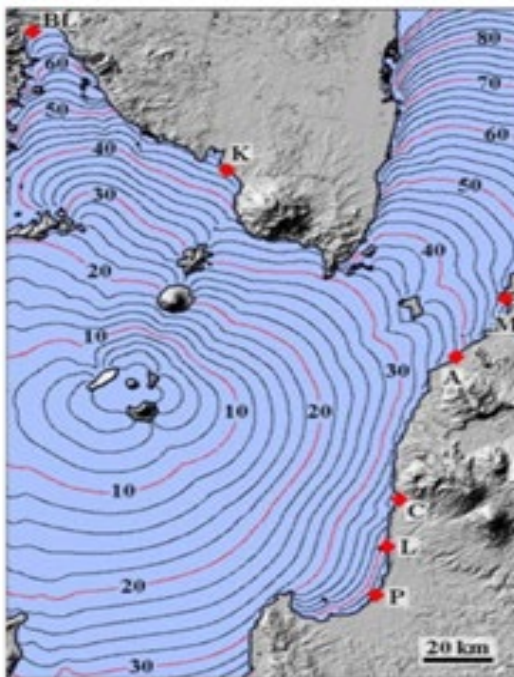
Giachetti melakukan simulasi waktu kedatangan dan tempat kedatangan berdasarkan alat pengukur pasang surut di beberapa tempat, salah satunya di Stasiun Marina Jambu.



Sumber: Giachetti (2012)

Gambar 10.
Elevasi Pasang Surut di Stasiun Marina Jambu

Hasil simulasi untuk waktu dan lokasi kedatangan gelombang tsunami dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Sumber: Giachetti (2012)

Gambar 11.
Simulasi Hasil Waktu Kedatangan Gelombang Tsunami

Sumber gelombang tsunami diasumsikan dari letak Gunung Anak Krakatau kemudian gelombang merambat secara menyebar ke sekitar wilayah Gunung Anak Krakatau. Kecepatan perambatan gelombang tsunami disimulasikan seperti yang terlihat pada Gambar 11. Perkiraan waktu kedatangan juga diberikan pada Gambar 11. Gelombang merambat lebih cepat ke arah barat daya pulau Jawa dan melambat ke arah utara. Hal ini kemungkinan disebabkan adanya pulau-pulau kecil yang mendispersikan gelombang datang sehingga waktu kedatangan gelombang menjadi relatif lebih lambat. Lebih detail, lokasi kedatangan, waktu perambatan dan tinggi

maksimum gelombang tsunami pada beberapa daerah di Provinsi Banten dan Lampung diberikan pada Tabel 3 dan Gambar 12.

Tabel 3
Waktu Perambatan dan Tinggi Maksimum Gelombang Tsunami

Lokasi	Waktu perambatan (menit)	Tinggi maksimum (meter)
Bandar Lampung	68	0,3
Kalianda	44	2,7
Merak	47	1,5
Anyer	38	1,4
Carita	37	2,9
Labuan	40	3,4
Panimbang	43	1,5
Sumur	36	1,2

Sumber: Giachetti (2012)



Sumber: JRC Emergency Reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018

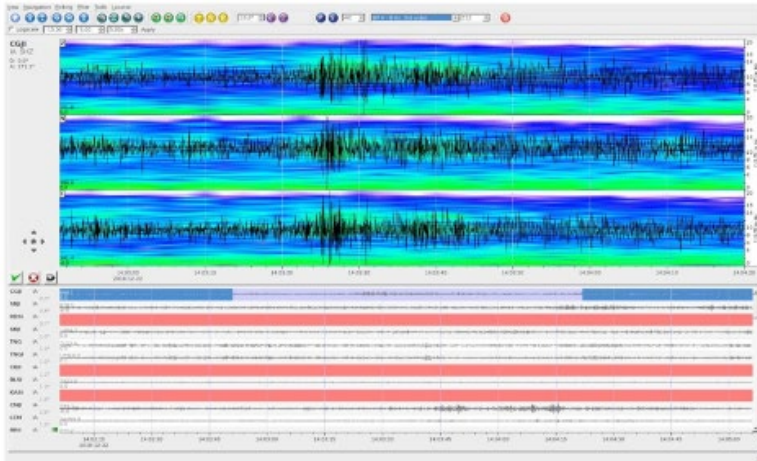
Gambar 12.
Perkiraan Lokasi Kedatangan Gelombang Tsunami

Walaupun jarak Pantai di Sumur lebih jauh daripada Pantai di Kalianda, namun waktu perambatan gelombang tsunami lebih cepat di daerah perairan Sumur. Hal ini terjadi karena untuk mencapai Kalianda, gelombang tsunami terhalang oleh pulau-pulau kecil disekitarnya. Disini perubahan kontur permukaan bumi berperan dalam penentuan kecepatan dan waktu kedatangan gelombang.

Hal lain yang perlu diperhatikan adalah pengukuran tinggi gelombang di suatu lokasi tidak sama dengan di lokasi lain, seperti yang terjadi pada tsunami di Palu dimana permukaan laut maksimum yang diukur sekitar sekitar 2,6 meter dan di pantai lain menunjukkan 5-6 meter atau lebih.

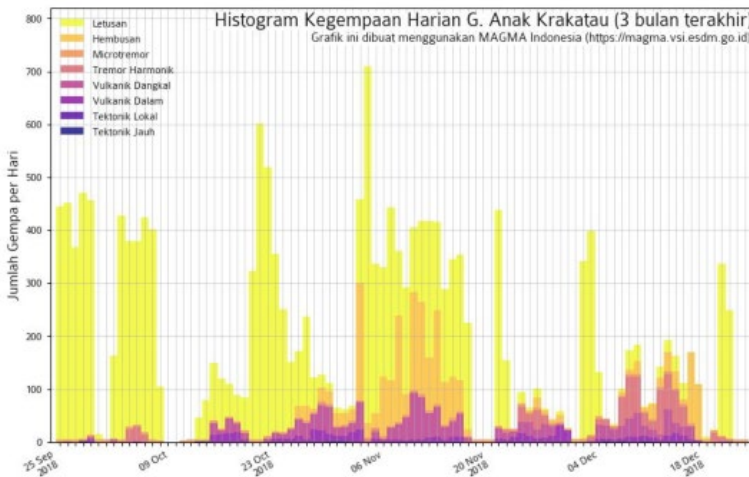
Antisipasi Bencana

Dalam menghadapi peristiwa tsunami yang terjadi secara tiba-tiba, antisipasi terhadap bencana pun terus diupayakan oleh pemerintah maupun penduduk setempat. BMKG dan PVMBG terus melakukan sosialisasi tentang kebencanaan melalui media sosial maupun media lainnya, terutama berkaitan dengan peringatan dini tsunami. Selain itu, pemerintah juga telah memasang alat pendeteksi tsunami. Namun Tiar Prasetya, Ketua Bidang Mitigasi Gempa Bumi dan Tsunami, mengungkapkan bahwa sejak 2007, alat pendeteksi tsunami (*buoy*) untuk perairan Selat Sunda milik BPPT tersebut sudah hilang sehingga pihak PVMBG tidak bisa memantau tsunami yang terjadi tahun 2018 silam. (liputan6.com: 24 Desember 2018). Oleh karena itu, pihak BMKG hanya mempergunakan seismograf untuk mendeteksi adanya potensi tsunami akibat aktivitas Gunung Anak Krakatau seperti ditunjukkan pada gambar berikut.



Sumber: RC Emergency Reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018

Gambar 13. Seismograf Gunung Anak Krakatau pada 22 Desember 2018 pukul 09.03



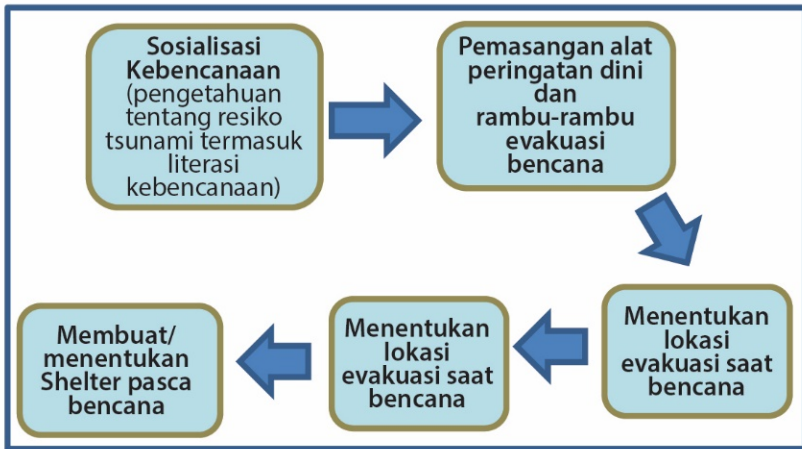
Sumber: RC Emergency Reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018

Gambar 14. Kegempaan Harian Gunung Anak Krakatau Tiga Bulan Terakhir Sebelum Tsunami (25 September – 18 Desember 2018)

Tidak adanya alat pengukur pasang surut yang mengukur gelombang di pulau-pulau sekitar Gunung Anak Krakatau, menyebabkan peringatan dini mengenai tsunami tidak ada. BMKG hanya mendeteksi sinyal seismik dari aktivitas Gunung Anak Krakatau sehingga yang dilakukan adalah memberikan peringatan dini akan adanya gelombang tinggi (bukan tsunami). Pihaknya hanya dapat memantau gempa yang berpotensi tsunami dan melakukan peringatan dini kepada masyarakat. Agar kejadian tersebut tidak terulang kembali, pada bulan April 2019, BPPT memasang alat pendeteksi di Selat Sunda untuk mengantisipasi terjadinya tsunami (Defianti, 2019).

Selain itu, dapat pula diterapkan sistem peringatan dini tsunami seperti yang dilakukan Pemerintah Kulonprogo. Alat tersebut adalah *tsunami early warning system (TEWS)* dan telah dipasang sebanyak 8 buah di pesisir Kulonprogo sejak tahun 2014. Pemasangan alat peringatan tsunami saja belum cukup jika tidak ada kerjasama dari masyarakat. Oleh karena itu, penanaman pengetahuan tentang sistem peringatan dini di kabupaten tersebut dilakukan dengan pendekatan terpusat pada pemberdayaan masyarakat. Tujuannya adalah agar masyarakat, khususnya di daerah yang terancam bahaya, selalau waspada, bertindak cepat dan tepat guna meminimalisir terjadinya kerusakan dan korban jiwa. (Nurhabibi, Dharmastuti, & Arida, 2016).

Dalam mengantisipasi bencana tsunami, masyarakat juga harus melakukan literasi kebencanaan agar siap siaga dalam menghadapi bencana yang datang secara tiba-tiba. Hal-hal yang dapat dilakukan untuk mengantisipasi bencana digambarkan pada Gambar berikut.



Gambar 15.
Diagram Alur Antisipasi Bencana

Evakuasi saat bencana pun perlu diperhatikan dari segi fasilitas seperti rambu-rambu arah evakuasi, tempat evakuasi saat bencana dan pasca bencana. Rambu-rambu arah evakuasi dibuat agar dalam kondisi panik, penduduk tidak kebingungan untuk bergerak ke arah tempat yang aman. Salah satu daerah yang telah menerapkan hal ini adalah jalan raya di sekitar pantai Merak hingga Bojonegara telah dipasang arah evakuasi jika terjadi tsunami. Selain itu, tempat/lokasi evakuasi juga menjadi salah satu hal yang perlu diperhatikan. Salah satu tempat evakuasi bencana tsunami di Labuan telah dibangun oleh pemerintah setempat, namun tidak adanya kejelasan informasi dan kelanjutan pembangunan sehingga pada saat bencana tsunami terjadi, masyarakat tidak tahu bahwa lokasi tersebut adalah tempat evakuasi tsunami.

Lokasi evakuasi juga harus memperhitungkan kecepatan perambatan gelombang, waktu kedatangan, kontur permukaan bumi di wilayah jangkauan tsunami, dan akses ke lokasi evakuasi pada saat bencana maupun pasca bencana. Menentukan lokasi evakuasi dan akses ke lokasi tersebut dapat dilakukan dengan menentukan beberapa tempat yang kemungkinan dapat dijadikan tempat evakuasi kemudian mencari jarak terpendek yang dihitung dari pantai hingga lokasi evakuasi.

Dengan demikian, upaya untuk mengantisipasi bencana tsunami harus dilakukan oleh semua pihak yang terkait, baik dari pemerintah pusat, daerah, BMKG, PVBMG, dan masyarakat setempat, sehingga apa yang diupayakan pemerintah bisa dirawat dengan baik oleh masyarakat, dan apa yang menjadi aspirasi masyarakat bisa diwujudkan oleh pemerintah.

PENUTUP

Pemodelan perambatan gelombang tsunami dapat dilakukan menggunakan persamaan gelombang non linear dengan pendekatan formula beda hingga. Hasilnya menunjukkan bahwa perambatan gelombang menyebar dan terdispersi karena pengaruh topografi dengan waktu antara 58-84 menit untuk mencapai pesisir pantai dari posisi awal koordinat $6^{\circ}06'00''$ LS dan $105^{\circ}24'00''$ BT. Model perambatan gelombang tsunami karena longoran erupsi Gunung Anak Krakatau berdasarkan alat pengukur pasang surut memberikan hasil bahwa jeda waktu kedatangan dari pusat timbulnya gelombang ke masing-masing stasiun pengukur pasang surut sekitar 29-142 menit dengan tinggi gelombang maksimum berkisar antara 0,36-0,91 meter. Dengan diperolehnya prediksi waktu tempuh gelombang tsunami sampai ke pantai, sebagai antisipasi bencana sangat penting memperhatikan pemasangan/pemeliharaan alat pendeteksi tsunami dan pemasangan rambu-rambu arah evakuasi bencana.

DAFTAR PUSTAKA

- Amos, J. (2018). *Tsunami akibat longsor Anak Krakatau: Bagaimana gunung api dapat jadi pemicu?*. Diakses pada 6 Mei 2019, dari <https://www.bbc.com/indonesia/majalah-46669653>
- Defianti, I. (2019). *Headline: Gelegar Gunung Anak Krakatau dan tsunami yang masih mengintai*. Diakses pada 6 Mei 2019, dari <https://www.liputan6.com/news/read/3857350/headline-gelegar-gunung-anak-krakatau-dan-tsunami-yang-masih-mengintai>
- European Commission (2018). Indonesia-volcano eruption and tsunami. *JRC emergency reporting - Activation #029 - 24 Dec 2018*.
- Horrillo J. J., Kowalik, Z., & Kornkven, E. (2004). *The third international workshop on long-wave runup models. Report*.
- Horrillo, J., Kowalik, Z., & Shigihara, Y. (2006). Wave dispersion study in the Indian Ocean-tsunami of December 26, 2004. *Marine Geodesy.*, (29): 149-166.
- Hantoro, W. S., Latief, H., Susilohadi, & Airlangga, A.Y. (2007). Volcanic tsunami of Krakatau: chronology model and its mitigation in Sunda Strait. *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Hazards: Prevention, Mitigation and Engineering Response*, 331 – 354.
- Kreyszig, E. (1993). *Advanced engineering mathematics*. Singapore: John Wiley & Sons. Inc.
- Kowalik, Z., Proshutinsky, T., & Proshutinsky, A. (2006). Tide-tsunami interactions. *Science of Tsunami Hazards*, 24(4): 242-256.
- Mahi, A. K. & Zakaria, A. (2008). *Rencana strategis dan rencana aksi mitigasi bencana Kota Bandar Lampung*. Laporan Proyek DKP Profinsi Lampung, 156 p.

- Marchuk, A. J. & Anisimov, A. (2001). A method for numerical modeling run-up on the coast of an arbitrary profile. *ITS 2001 Proceedings*, (7): 7-27.
- Nurhabibi, P., Dharmastuti, A., & Arida, V. (2016). Kapabilitas pemerintah daerah dalam membangun kesiapsiagaan sebagai upaya pengurangan risiko bencana tsunami (Studi kasus pada wilayah pesisir Kulomprogo). *Jurnal Dialog Penanggulangan Bencana*, 7(1):71-81.
- Reynold, A. C. (1978). Boundary conditions for the numerical solution of wave propagation problems. *Geophysics*, 43(6): 1099-1110.
- Sandick, R.A. (1890). *In the Realm of the Volcano: The eruption of Krakatau and the aftermath*. Zuthpen. Diakses pada 6 Mei 2019, dari <https://id.wikipedia.org/wiki/Krakatau>
- Shigihara, Y., Fujima, K., Homma, M., & Saito, K. (2005). *Numerical methods of linier dispersive wave equation for the practical problems*, *Asian and Pacific Coasts*, Sept.4-8, Jeju, South Korea, pp.14.
- Tantri, E. (2014). Letusan Krakatau 1883: pengaruhnya terhadap gerakan sosial Banten 1888. *Jurnal Masyarakat dan Budaya*, 16 (1).
- Watts, P., Grill, S.T., Kirby, J. T., Fryer G. J., & Tappin, D. R. (2003). Landslide tsunami case studies using a boussinesq model and a fully nonlinier tsunami generation model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (3): 391-402.
- Watts, P., Ioualalen, M., Grill, S., Shi, F., Kirby, J. T. (2005). Numerical simulation of December 26, 2004 Indian ocean tsunami using higher order boussinesq model, Ocean waves measurement and analysis. *Fifth International Symposium WAVES 2005*. 3rd July, 2005. Madrid. Spain. Pp. 221.

Wikipedia Contributor (2008). *Krakatau*. Diakses pada 6 Mei 2019, dari <https://id.wikipedia.org/wiki/Krakatau>

Zakaria, A. (2009). *Numerical modelling of wave propagation using higher order finite-difference formulas* (Thesis). Curtin University of Technology, Perth, W. A. Pp. 247.