

Estimasi *Run Up* dan Waktu Tiba Tsunami di Daerah Bali Berdasarkan Simulasi TOAST

Estimation of Run Up and Arrival Time of Tsunami in Bali Region Based on TOAST Simulation

A. A. Diah Satria Purnama¹, I. B. Alit Paramarta^{1*}, Muh. Soekarno Saputra Rahman²

¹ Program Studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran, Badung, Bali, Indonesia 80361

² Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III, Jl. Raya Tuban, Badung, Bali, Indonesia 80361

Email: diahsatriapurnama@student.unud.ac.id; *alitparamarta@unud.ac.id; soekarnotpi@gmail.com

Abstrak – Pulau Bali merupakan daerah yang diapit oleh dua zona pembangkit gempabumi yang berpotensi menimbulkan tsunami. Dalam penelitian ini dihasilkan estimasi ketinggian tsunami (*run up*) dan waktu tiba tsunami (*ETA*) dengan melakukan simulasi tsunami dari setiap perubahan magnitudo gempa bumi menggunakan software TOAST. Estimasi tersebut didapat dengan cara membuat skenario gempa bumi dari parameter-parameter gempa bumi yang pernah terjadi dan menimbulkan dampak tsunami di Pulau Bali sebagai acuan. Titik daerah pengamatan berada pada beberapa daerah pesisir pulau Bali. Nilai *run up* maksimum yaitu antara 21,16 m hingga 55,6 m dengan waktu tiba tsunami antara 120 menit hingga kurang dari 15 menit setelah terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 9,6 SR. Daerah sekitar Pantai Kuta Badung merupakan daerah dengan potensi *run up* yang tinggi.

Kata kunci: Tsunami, *run up*, *ETA*, TOAST, magnitudo.

Abstract – Bali Island is an area that is flanked by two zones of earthquake potential to cause a tsunami. In this study produced the estimated tsunami heights (*run up*) and the tsunami arrival times (*ETA*) by simulating a tsunami with some magnitude variety of the earthquake using software called TOAST. The estimation is obtained by making a scenario of earthquake from parameters of earthquakes that have occurred and raised tsunami on the Bali Island as a reference. The observation area is in some coastal areas of Bali Island. The maximum value of *run up* is between 21.16 m to 55.6 m with tsunami arrival time is between 120 minutes to less than 15 minutes after an earthquake with 9.6 SR of magnitude. The area around Kuta Beach Badung is an area with high potential for *run up*.

Key words: Tsunami, *run up*, *ETA*, TOAST, magnitudo.

1. Pendahuluan

Pulau Bali termasuk daerah dalam zona rawan tsunami di Indonesia [1]. Ditinjau dari segi tektonik, Pulau Bali memiliki dua zona pembangkit gempa bumi yang berpotensi menimbulkan tsunami. Zona pertama, yaitu zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia yang terletak di selatan Pulau Bali. Zona subduksi ini sering menimbulkan gempa bumi dengan kedalaman dangkal. Zona kedua adalah *back arc thrust Bali*, yaitu sesar naik belakang busur Bali yang merupakan perpanjangan dari *Flores back arc thrust* yang terletak di utara Pulau Bali. Aktivitas seismisitas yang terletak di sekitar palung samudera merupakan gempabumi hasil subduksi lempeng [2]. Dalam sejarah, Pulau Bali pernah beberapa kali terimbas tsunami. Tsunami yang paling parah tercatat pada tahun 1815 di Buleleng dengan 1200 korban meninggal [3].

Dalam upaya mitigasi bencana alam sebagai peringatan dini tsunami perlu dibuat estimasi ketinggian tsunami (*run up*) dan waktu tiba (*Estimated Time Arrival (ETA)*) dari setiap perubahan kekuatan gempa bumi (magnitudo). Dalam artikel ini dipaparkan hasil simulasi dengan menggunakan software TOAST (*Tsunami Observation and Simulation Terminal*).

Pemodelan tsunami ini menggunakan *software* TOAST yang merupakan sebuah pemodelan Tsunami dengan tool bernama *Easy Wave*. Hasil TOAST dapat diverifikasi oleh sensor oseanografi seperti *tide gauge* atau *buoy*. TOAST sangat fleksibel karena menggunakan pendekatan *real time* atau *online* simulasi. Sistem TOAST cukup mendukung InaTEWS karena sudah terintegrasi dengan sistem seismik SeiscompP3 secara *real time*. Terdapat 3 status peringatan pada TOAST ini yaitu SIAGA (*run up* < 0,5 m), WASPADA ($0,5 \text{ m} \leq \text{run up} < 3 \text{ m}$), dan AWAS ($3 \text{ m} \leq \text{run up}$) [4].

2. Landasan Teori

2.1 Tsunami

Gelombang tsunami ditimbulkan oleh gaya impulsif yang bersifat transien dan tidak kontinyu [5]. Dari berbagai gangguan penyebab terjadinya tsunami, gempa bumi tektonik merupakan yang paling utama. Karakteristik gempa bumi sangat menentukan besar kecilnya gelombang tsunami yang terjadi tetapi tidak semua gempa bumi dapat membangkitkan tsunami. Gempa bumi yang dapat membangkitkan tsunami memiliki ciri-ciri yaitu kekuatan gempa bumi (magnitudo) $\geq 7,0$ SR, terjadi pada kedalaman dangkal ≤ 100 km, pusat gempa bumi (hiposenter) berada di dasar laut, jenis patahan gempa bumi adalah *normal fault* (patahan turun) atau *thrust fault* (patahan naik) dengan kata lain menimbulkan deformasi secara vertikal [6].

Run-up didefinisikan sebagai batas tertinggi yang dicapai air laut saat masuk ke darat [7]. Batas ini diukur secara vertikal di atas permukaan air laut. *Estimated time arrival* merupakan waktu tiba tsunami, dimana ETA ini menjadi acuan waktu saat *run up* terjadi.

2.2 Penjalaran gelombang tsunami

Gelombang tsunami memiliki sifat-sifat penjalaran yaitu bersifat transien dan impulsif, artinya tsunami semakin melemah dengan bertambahnya waktu dan hanya berumur sesaat. Pergerakan partikel air melibatkan seluruh volume dari dasar laut hingga ke permukaan. Ciri lainnya dari tsunami adalah panjang gelombangnya yang besar, hingga mencapai puluhan kilometer dengan kecepatan rambatnya di laut dalam (*deep sea*) berkisar 400 – 1000 km/jam [5]. Kecepatan penjalaran tsunami sangat tergantung dari kedalaman laut. Tinggi gelombang tsunami di daerah pantai selain dipicu oleh magnitudo gempa, lokasi gempa, dan besarnya deformasi vertikal dasar laut, juga disebabkan oleh bentuk batimetri, topografi, dan geomorfologi pantai. Tinggi tsunami akan mencapai nilai maksimum pada pantai dengan morfologi landai dan berkeluk seperti teluk atau muara sungai [5].

Suatu gelombang disebut gelombang perairan dangkal (*shallow water wave*) apabila nilai perbandingan antara kedalaman laut dan panjang gelombang lebih kecil dari seperduapuluh ($1/20$). Dikarenakan nilai perbandingan antara kedalaman laut dan panjang gelombang tsunami lebih kecil dari $1/20$, maka tsunami sering dianggap sebagai gelombang perairan dangkal [8]. Suatu deretan gelombang menjalar ke pantai yang menyempit dan dangkal akan mengalami proses yang sangat kompleks, tsunami seperti halnya gelombang perairan dangkal akan mengalami proses-proses kompleks tersebut yaitu *refraksi*, *difraksi*, *refleksi*, dan *pendangkalan* (*shoaling*) [5, 6].

2.3 Luas deformasi patahan

Sebagian besar tsunami yang pernah terjadi lebih dipengaruhi oleh patahan naik atau turun [9]. Sebuah sesar merupakan batas yang menghubungkan dua blok tektonik yang berdekatan. Bidang sesar (*fault plane*) adalah sebuah bidang yang merupakan bidang tektonik antara dua blok tektonik. Sudut kemiringan sesar (*dip angle*) adalah sudut yang dibentuk antara bidang sesar dengan bidang horizontal. Vektor kemiringan (*dip vector*) adalah vektor yang searah dengan kemiringan bidang sesar, sedangkan *strike* vektor (*vector strike*) adalah vektor yang sejajar dengan arah *strike* sesar. Luas deformasi patahan (cm^2) dapat dihitung dengan menggunakan rumusan *Scaling Law* sebagai berikut [10]:

$$\text{Log } L = 0,5 M_w - 1,9 \quad (1)$$

$$W = \frac{L}{2} \quad (2)$$

$$\text{Log } U = 0,5 M_w - 1,4 \quad (3)$$

$$\text{Log } A = 1,5 M_w + 6,0 \quad (4)$$

Dimana L = panjang patahan (km), W = lebar patahan (km), U = panjang rata-rata defrormasi patahan (cm), M_w = magnitudo momen gempabumi, dan A = luas deformasi patahan (cm²).

3. Metode Penelitian

Daerah penelitian pada simulasi ini difokuskan pada daerah Provinsi Bali khususnya di daerah pesisir pantai dan sekitarnya dengan batasan koordinat geografis yaitu *latitude* 7,837 hingga -9,204, dan *longitude* 114,446 hingga 115,764. Daerah terdampak tersebut yaitu Jembrana, Tabanan, Badung (Kuta), Denpasar (Sanur), Gianyar, Klungkung, Nusa Penida, Karangasem Selatan, Karangasem Utara, Buleleng Timur, dan Buleleng Barat.

Data yang digunakan tersaji pada Tabel 1, data ini merupakan data parameter gempabumi yang pernah berdampak tsunami pada Daerah Bali yaitu tahun 1985, 1989, dan 1992. Data parameter gempabumi ini meliputi waktu kejadian, kekuatan gempa, lokasi gempabumi, mekanisme fokus, ukuran lempeng, dan kedalaman gempabumi [7].

Tabel 1. Parameter gempabumi yang pernah berdampak tsunami di Bali.

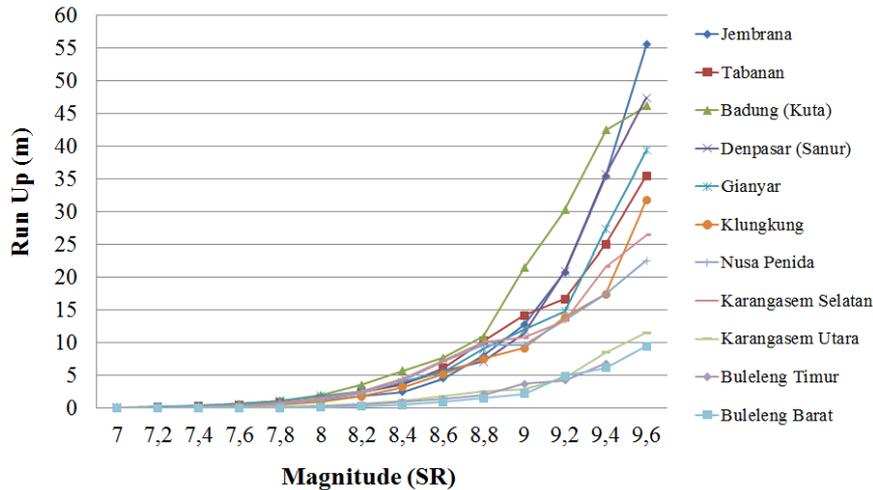
No	Waktu Kejadian						Magnitudo (SR)	Lokasi		Mekanisme Fokus			Kedalaman Gempa (km)
	Tahun	Bulan	Tanggal	Jam	Menit	Detik		<i>Latitude</i>	<i>Longitude</i>	<i>Strike</i>	<i>Dip</i>	<i>Rake</i>	
1	1985	4	13	1	6	1	5,9	-9,245	114,185	167	35	36	71,1
2	1989	7	31	17	7	39	6,6	-8,100	121,400	83	45	139	30,4
3	1992	12	12	5	29	26	7,7	-8,480	121,896	80	40	95	20,4

Parameter gempabumi yang telah diperoleh diskenariokan dengan memvariasikan magnitudo dari 7 – 9,6 SR. Selanjutnya skenario-skenario tersebut dimasukkan ke perangkat lunak TOAST untuk dibuat simulasi tsunami. Simulasi tsunami dengan menggunakan TOAST mensimulasikan terjadinya tsunami di laut di atas sumber gempabumi, mekanisme penjalarannya hingga sampai di titik-titik terdampak di daerah penelitian. Hasil simulasi tersebut berupa nilai ketinggian permukaan air (*run up*) dan waktu tiba (*ETA*). Secara umum langkah-langkah pengolahan data, yakni: input parameter dari event (*create event*) yaitu lokasi gempa, magnitudo, kedalaman gempa, *dip*, *rake*, dan *strike align*; input panjang dan lebar dari patahan gempabumi yang sebelumnya dihitung menggunakan rumus *Scalling Law*; kemudian TOAST akan mensimulasi dari kejadian event yang telah di *create*; hasil simulasi TOAST berupa *run up* dan *ETA*, dan analisa data.

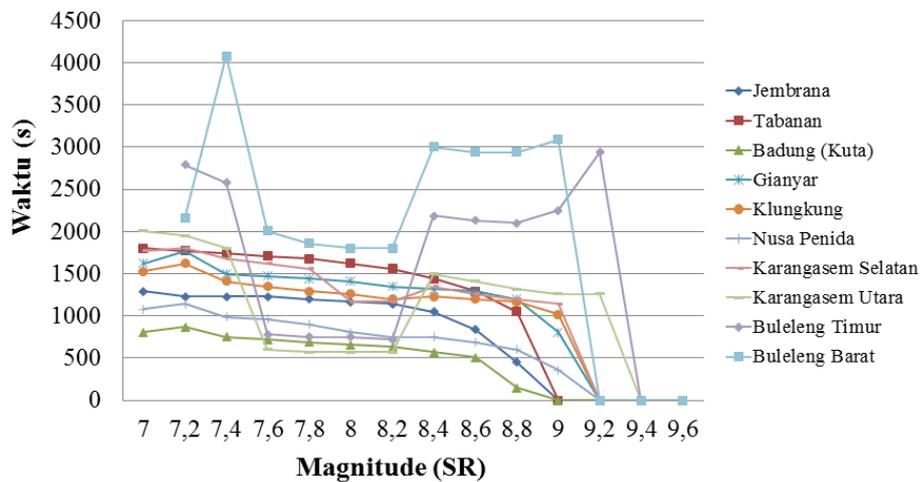
4. Hasil dan Pembahasan

Simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST yang dibuat dalam bentuk grafik pada Gambar 1 dan Gambar 2. Pada gempabumi tanggal 13 April 1985 dengan divariasikannya magnitudo diperoleh bahwa umumnya kabupaten Badung (daerah sekitar Pantai Kuta) merupakan daerah dengan potensi *run up* yang tinggi, yaitu 46,19 meter jika terjadi gempa dengan magnitudo 9,6 SR dimana kemungkinan waktu tiba (*ETA*) pada setiap simulasi pada kabupaten Badung (daerah sekitar Pantai Kuta) kurang dari 15 menit. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar magnitudo yang terjadi pada gempa pembangkit tsunami maka *run up* yang dihasilkan semakin tinggi dengan waktu tiba yang semakin cepat.

Dari grafik pada Gambar 1 dan 2 menunjukkan bahwa pada umumnya *run up* tsunami akan semakin tinggi dan *ETA* tsunami akan semakin cepat pada lokasi terdampak yang paling dekat dengan lokasi terjadinya gempa dimana dapat dibuktikan berdasarkan data yang diperoleh di Kabupaten Badung yaitu daerah sekitar Pantai Kuta. Namun terdapat anomali *run up* pada simulasi tsunami dengan magnitudo 9,6 SR dimana *run up* tertinggi tercatat di kabupaten Jembrana yaitu dengan *run up* 55,6 m. Hal ini terjadi dikarenakan posisi Jembrana berada pada cekungan Selat Bali. Pada cekungan tersebut dengan pantai yang menyempit dan dangkal, gelombang tsunami mengalami proses yang sangat kompleks meliputi *shoaling*, refleksi dan refraksi, sehingga diposisi tersebut ketinggian tsunami yang terjadi lebih besar. Proses yang kompleks tersebut dapat terjadi karena tsunami termasuk gelombang perairan dangkal, sehingga energinya tidak mudah hilang walaupun menabrak pantai di Jembrana.



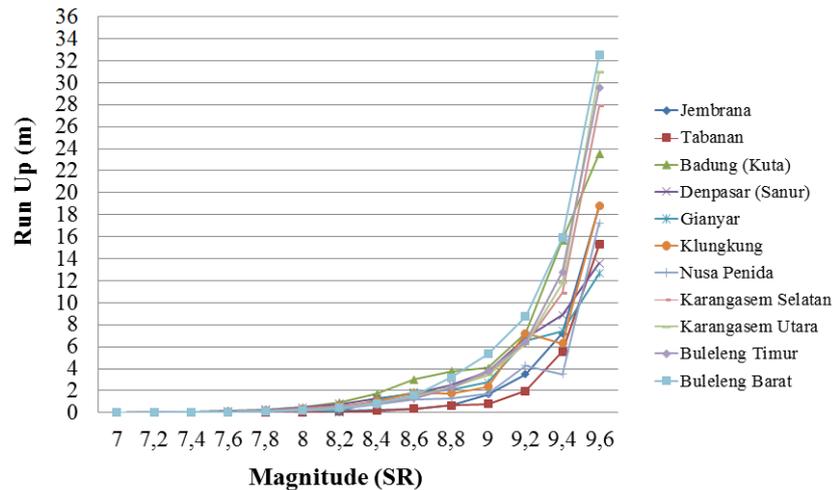
Gambar 1. Grafik perkiraan *Run Up* berdasarkan gempa bumi 13 April 1985 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.



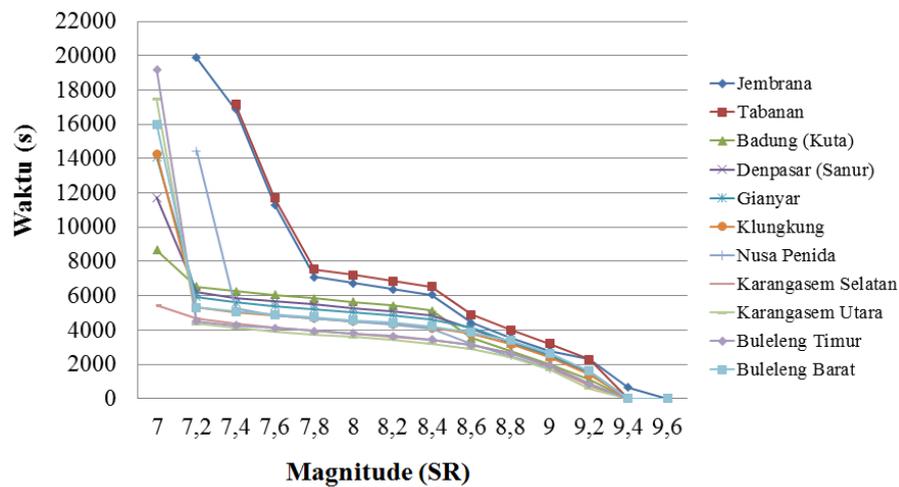
Gambar 2. Grafik perkiraan ETA berdasarkan gempa bumi 13 April 1985 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.

Simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST yang dibuat dalam bentuk grafik pada Gambar 3 dan 4. Pada gempa bumi tanggal 31 Juli 1989 dengan divariasikannya magnitudo diperoleh bahwa pada umumnya Kabupaten Buleleng bagian barat merupakan daerah dengan potensi *run up* yang tinggi, yaitu 32,52 m jika terjadi gempa bumi dengan magnitudo 9,6 SR dimana waktu tiba pada setiap simulasi di daerah tersebut rata-rata 1 jam 12 menit. Waktu tiba tercepat yaitu di Kabupaten Karangasem bagian Utara dengan waktu tiba rata-rata 1 jam.

Dari grafik pada Gambar 4 menunjukkan bahwa gelombang tsunami yang disebabkan oleh gempa bumi di sebelah utara (gempa bumi 31 Juli 1989) merambat lebih lambat dibandingkan dengan gelombang tsunami yang disebabkan oleh gempa bumi di sebelah selatan (gempa bumi 13 April 1985). Hal ini disebabkan karena batimetri di sebelah utara lebih dangkal sehingga terdapat gaya gesek yang lebih besar. Gaya gesek tersebut juga mempengaruhi *run up* yang terjadi.



Gambar 3. Grafik perkiraan *run up* berdasarkan gempa bumi 31 Juli 1989 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.

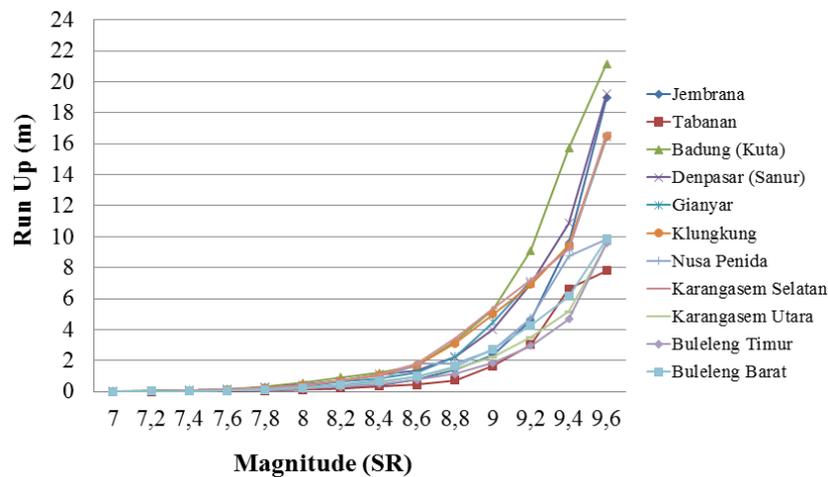


Gambar 4. Grafik perkiraan ETA berdasarkan gempa bumi 31 Juli 1989 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.

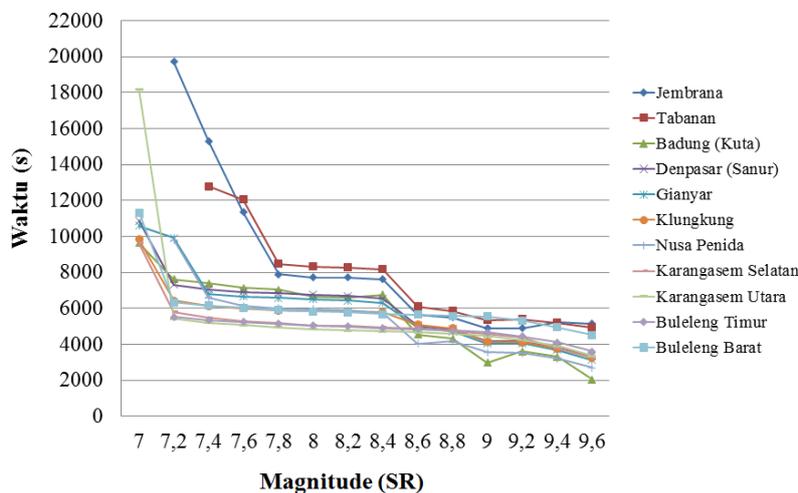
Simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST yang dibuat dalam bentuk grafik pada Gambar 5 dan 6. Pada gempa bumi tanggal 12 Desember 1992 dengan divariasikannya magnitudo diperoleh bahwa kabupaten Badung yaitu pada daerah sekitar Pantai Kuta merupakan daerah dengan potensi *run up* yang tinggi yaitu 21,16 m jika terjadi gempa bumi dengan magnitudo 9,6 SR, dan kemungkinan waktu tiba pada setiap simulasi di daerah tersebut rata-rata 2 jam.

Pada Gambar 5, daerah terdampak yang memiliki rata-rata *run up* tertinggi yaitu Kabupaten Badung pada daerah sekitar Pantai Kuta dimana lokasi tersebut berada di selatan Pulau Bali, sedangkan lokasi tsunami berada di sekitar daerah timur laut Indonesia. Hal ini besar kemungkinan terjadi dikarenakan topografi bawah laut dan propagasi gelombang, maka daripada itu perlu adanya penelitian lebih lanjut. Pada Gambar 6, memperlihatkan bahwa semakin besar magnitudo gempa bumi maka waktu tiba tsunami akan semakin cepat.

Suatu teluk biasanya memiliki frekuensi alami pergerakan air internal terhadap batimetri yang terdapat dalam teluk tersebut [5]. Ketika terjadi gangguan eksternal yaitu frekuensi gelombang tsunami sama dengan frekuensi alami yang bekerja pada kolom air di teluk tersebut, maka air yang berada dalam teluk akan teramplifikasi oleh fenomena resonansi. Oleh karena itu apabila periode gelombang tsunami sama dengan periode alami teluk tersebut maka tsunami akan meresonansi gerakan yang ada di teluk. Akibatnya tinggi gelombang dalam teluk akan membesar. Hal inilah yang akan menyebabkan tsunami di kabupaten Badung pada daerah sekitar Pantai Kuta mengalami *run up* yang lebih tinggi seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik perkiraan *Run Up* berdasarkan gempa bumi 12 Desember 1992 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.



Gambar 6. Grafik perkiraan ETA berdasarkan gempa bumi 12 Desember 1992 yang didapat setelah simulasi tsunami menggunakan perangkat lunak TOAST.

5. Kesimpulan

Tsunami yang terjadi di Pulau Bali berdasarkan simulasi menggunakan perangkat lunak TOAST menunjukkan bahwa nilai *run up* maksimum antara 21,6 m hingga 55,6 m dengan waktu tiba tsunami antara 120 menit hingga kurang dari 15 menit setelah terjadinya gempa bumi dengan magnitudo 9,6 SR. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa Kabupaten Badung, pada daerah sekitar Pantai Kuta merupakan daerah dengan potensi *run up* yang tinggi.

Ucapan Terimakasih

Penulis berterimakasih kepada pihak Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III Denpasar yang telah memberikan izin dalam penggunaan *software* dan alat-alat penunjang pada pengerjaan penelitian ini.

Pustaka

- [1] Strunz G., et al., Tsunami Risk Assessment in Indonesia, *Natural Hazard and Earth System Science*, vol. 11, 2011, pp. 68-69.
- [2] McCaffrey R. dan Nabelek J., Earthquakes, Gravity and The Origin of the Bali Basin: An Example of A Nascent Continental Fold and Thrust Belt, *Journal of Geophysical Research*, vol. 92, 1987, pp. 441-460.

- [3] Halauwet Y, Tinjauan Tektonik dan Potensi Bahaya Tsunami di Daerah Bali, BMKG, Jakarta, 2012.
- [4] Pribadi S., Pemodelan Tsunami Untuk Peringatan Dini BMG, *Buletin Meteorologi Dan Geofisika*, vol. 4, 2008, pp. 26-27.
- [5] Subandono D. Budiman, Tsunami, edisi I, Buku Ilmiah Populer, Jakarta, 2005. pp. 6-7, 90-92.
- [6] Soekarno S.R. Muhammad, Tsunami Blok Daerah Bengkulu, *Skripsi*, Program sarjana Terapan Geofisika, Akademi Meteorologi dan Geofisika, Jakarta, 2015.
- [7] Trisnawati, Analisis Inundasi Tsunami di Bali Selatan Berdasarkan *TUNAMI N-2*, *Skripsi*, Program sarjana Terapan Geofisika, Akademi Meteorologi dan Geofisika, Jakarta, 2015.
- [8] Horikawa K., Coastal Engineering, An Introduction to Ocean Engineering, University of Tokyo, Tokyo, 1978, pp. 364-365.
- [9] Setyonegoro W., Source Analysis of Earthquake on Deformation Processing of Earth Crust Causing Tsunami Potential on a Java Island, *Jurnal Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika*, BMKG, vol. 7 no. 4, 2011, pp. 241-248.
- [10] JMA (Japan Meteorological Agency), Draft of Manual on Operation Systems for Tsunami Warning Service, Available from : <https://www.jma.go.jp>, diakses 26 Agustus 2016.
- [11] Gunawan I, *et al.*, Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416 – 2009, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 2010.