

Rekonstruksi dan Pemodelan Penjalaran Tsunami menggunakan Sistem Toast dengan Metode Pemodelan Easywave (Studi Kasus Tsunami Banyuwangi 3 Juni 1994)

Angeline Febrianty¹, Aura Zahra Ramadhanty¹, Arif Nurokhim¹, Amien Widodo¹

¹Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 17 October 2023

Accepted 17 May 2024

Available online 31 August 2024

Kata Kunci:

Banyuwangi,
Easywave,
Run-up,
Tsunami

Keywords:

Banyuwangi,
Easywave,
Run-up,
Tsunami

ABSTRAK

Banyuwangi adalah salah satu kabupaten di Provinsi Jawa Timur dengan area terluas. Daerah ini berlokasi di ujung timur Pulau Jawa dengan wilayah pesisir di bagian selatan yang sangat rawan terhadap bencana tsunami karena terdapat zona pertemuan antara lempeng tektonik Indian-Australia dan Eurasia. Dalam penelitian ini, rekonstruksi tsunami yang terjadi di Banyuwangi pada 3 Juni 1994 dilakukan dengan metode Easywave dan sistem TOAST. Hasil rekonstruksi menunjukkan bahwa nilai run up bergantung pada magnitud dan kedalaman gempa. Pulau Nusa Barung memiliki status awas dengan ketinggian run up 4,951 m, sedangkan wilayah di Jember, Jawa Timur, memiliki ketinggian run up 4,785 m.

ABSTRACT

Banyuwangi is one of the districts in East Java Province that has the largest area. It is located at the eastern tip of Java Island with a coastal area in the southern region that is very vulnerable to tsunami disasters because of the meeting zone between the Indian-Australian and Eurasian tectonic plates.

In this research, reconstruction of the tsunami that occurred in Banyuwangi on June 3 1994 was carried out using the Easywave method and the TOAST system. The reconstruction results show that the run-up value depends on the magnitude and depth of the earthquake. Nusa Barung Island has alert status with a run-up height of 4,951 m, while the area in Jember, East Java, has a run-up height of 4,785 m.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.



¹ Corresponding author.

E-mail addresses: angelinefebrianty.205017@mhs.its.ac.id

1. Pendahuluan

Gempa bumi adalah salah satu fenomena alam yang dapat terjadi karena peristiwa alam ataupun kegiatan manusia yang menyebabkan tanah menjadi bergetar akibat adanya gelombang energi yang menjalar dari pusat gempa (Pujiyanto, 2007). Rheid (1906) menjelaskan teori kekenyalan elastis (elastic rebound theory), yaitu ketika permukaan bidang sesar mengalami pergesekan batuan dan kemudian mengalami deformasi, maka ketika deformasi tersebut telah melampaui batas regangannya, batuan tersebut akan patah (rupture) dan kembali ke bentuk semula (rebound). Dapat dikatakan bahwa gempa bumi adalah hasil pelepasan energi dari suatu patahan di kerak bumi yang terjadi secara tiba-tiba. Gempa bumi ini adalah hentakan besar sekaligus yang disebabkan oleh penimbunan *strain* atau energi elastik dalam waktu yang lama karena pergerakan lempeng tektonik. Gempa kecil ini terus bergetar. Karena sifat getaran terus menerus, getaran tersebut tidak disebut gempa bumi (Nandi, 2006). Sebaliknya, gempa bumi memiliki waktu awal dan akhir yang jelas. Menurut Sudibyakto (2000), terdapat beberapa parameter gempa bumi diantaranya yaitu origin time, hiposenter, episenter, magnitudo dan intensitas.

Dalam bahasa Jepang, kata "Tsu" berarti "pelabuhan" dan "Nami" memiliki arti "gelombang" sehingga tsunami sering disebut sebagai gelombang pelabuhan pertama yang dilihat nelayan Jepang. Tidak seperti nelayan yang berada di tengah laut, nelayan dapat merasakan gelombang tsunami sebelum mencapai permukaan. Oleh karena itu, mereka menyimpulkan bahwa, daripada berada di tengah lautan yang dalam, tsunami hanya muncul di daerah sekitar pelabuhan (Sugito, 2008). Tsunami adalah pasang atau gelombang laut besar di pelabuhan. Tsunami dapat didefinisikan sebagai gelombang laut yang memiliki periode panjang akibat gangguan impulsif di medium laut. Hal ini dapat berupa gempa bumi tektonik di laut, erupsi vulkanik di laut, longsor (landslide) di laut, atau jatuhnya meteor di laut (Diposaptono dan Budiman, 2005). Kecepatan tsunami dipengaruhi oleh kedalaman perairan; gelombang menjadi lebih cepat atau lebih lambat sesuai dengan penurunan atau kenaikan kedalaman perairan. Dalam prosesnya, arah pergerakan gelombang berubah dan energi gelombang bias tersebar atau terfokus. Tsunami dapat bergerak dengan kecepatan 500 km/j hingga 1000 km/j di perairan, tetapi dapat melambat hingga beberapa puluh km/j di perairan dangkal. Oleh karena itu, ketinggian tsunami bervariasi tergantung pada kedalaman perairan. Dengan ketinggian satu meter di perairan bias, tsunami dapat mencapai ketinggian puluhan meter di garis pantai (Puspito, 2010).

Banyuwangi adalah salah satu kabupaten di Provinsi Jawa Timur yang terletak di ujung timur Pulau Jawa. Kabupaten ini memiliki area terluas di Provinsi Jawa Timur dengan wilayah yang cukup bervariasi, seperti dataran tinggi dengan gunung yang menghasilkan produk perkebunan dan dataran rendah yang memiliki potensi dalam menghasilkan produk pertanian. Selain itu, terdapat juga wilayah di sekitar garis pantai yang membujur dari utara ke selatan menghasilkan biota laut. Kabupaten Banyuwangi secara geografis berada di 7°43'-8°46' Lintang Selatan dan 113°53'-114°38' Bujur Timur. Kabupaten Banyuwangi memiliki luas 5.782,5 km² yang terdiri dari 24 kecamatan dengan garis pantai sepanjang sekitar 175,8 km dan terdiri dari sepuluh pulau. Sebelah utara dan barat Kabupaten Banyuwangi terdapat Kabupaten Situbondo. Sementara pada sebelah selatan dan timur terdapat masing-masing Samudra Hindia dan Selat Bali. Tim Pusat Studi Gempa Nasional (2017) menyebutkan bahwa terdapat 13 zona subduksi di wilayah Indonesia. Salah satu zona subduksi tersebut berada di daerah selatan pulau Jawa yang merupakan kawasan zona pertemuan antara lempeng tektonik Indian-Australian dan Eurasia. Berdasarkan hal tersebut, pada zona pertemuan atau zona subduksi ini dapat terbentuk sesar aktif yang menjadi ancaman terjadinya gempa bumi (Martinawati, 2018). Menurut Alfaris (2020), gempa bumi dapat mengakibatkan terjadinya tsunami apabila gempa terjadi pada kedalaman kurang dari 100 km di atas permukaan laut dengan kekuatan lebih dari 6,5 skala Richter. Kondisi ini menyebabkan kawasan pesisir selatan Jawa rawan bencana tsunami (Sunarto & Marfai, 2012). Oleh karena itu, Kabupaten Banyuwangi merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Jawa Timur yang terletak di kawasan pesisir dengan potensi tsunami yang cukup besar.

Pada tanggal 3 Juni 1994 pernah terjadi gempa yang memiliki kekuatan 7,8 skala Richter dan menghasilkan tsunami dengan ketinggian hampir 14 meter yang menyapu bibir pantai Banyuwangi hingga menimbulkan banyak kerugian yang dialami warga dan pemerintah daerah. Kerugian tersebut menewaskan 250 orang, melukai 423 orang, merusak 1500 rumah, dan merusak 278 kapal (Triyono dkk., 2019). Gempa tersebut termasuk dalam gempa dangkal dengan kedalaman 18,4 km dengan pusat gempa yang berada di 10.477°LS dan 112.835°BT. Lokasi ini berada sejauh 249 km dari bagian selatan Malang-Banyuwangi (Setiyono, 2019). Menurut (Puspito, 1994), gempa tektonik di zona subduksi dan daerah seismik aktif lainnya menyebabkan sebagian besar tsunami di Indonesia (Marfai dkk 2008b; Marfai dan Khasanah 2009, Marfai 2011a). Oleh karena itu, penting untuk mengetahui kondisi fisik wilayah pesisir untuk meningkatkan pemahaman masyarakat dan kesadaran masyarakat di daerah yang rentan terhadap bencana (Marfai dkk 2008b).

Berdasarkan gempa Banyuwangi 3 Juni 1994 dilakukan pemodelan tsunami dengan sistem *TOAST*. *TOAST* atau *Tsunami Observation And Simulation Terminal* merupakan sebuah sistem yang digunakan untuk melakukan pemodelan tsunami menggunakan parameter-parameter gempa yang ada. Cara kerja prediksi pemodelan tsunami adalah menghitung skenario tsunami untuk memberikan hasil pemodelan tsunami sebagai prediksi dampak secara *on the fly* (tanpa *pre calculated scenario*) dan juga skenario yang telah dijalankan sebelumnya (*pre-calculated model*) (Septiani, 2015 dalam Martinawati, 2018). Metode Easywave digunakan dengan input berupa data pengukuran kedalaman gempa agar tsunami dapat disimulasikan. Pada metode ini digunakan persamaan *linear shallow water* dengan metode numerik *finite difference* (Martinawati, 2018). Dari hasil pengolahan dan simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil berupa nilai run-up, bear tsunami, lokasi, ketinggian gelombang dan waktu perkiraan tiba gelombang tsunami di lokasi terkait. Ketinggian gelombang tsunami hingga mencapai daratan terjauh dikenal sebagai nilai run up. Nilai ini dinyatakan dalam kaki atau meter dan dihitung dari tingkat laut rata-rata (MSL) (Satake et al., 2012). Besar run-up sangat sulit ditentukan secara analitis karena ada banyak variabel yang berpengaruh (Triatmodjo, 2008). Tinggi run-up tsunami dihitung dari ujung gelombang tsunami terjauh yang sampai ke daratan. Jarak vertikal antara ujung tsunami dan pantai dengan titik nol muka laut atau titik sedang laut disebut sebagai tinggi run-up tsunami. Terdapat beberapa hal yang menentukan tinggi run-up tsunami, di antaranya adalah magnitudo gempa, bentuk pantai, dan morfologi dasar laut (Iyan, 2009).

Tujuan penelitian ini adalah menentukan hasil pemodelan tsunami dengan sistem *TOAST* menggunakan parameter gempa Banyuwangi yang terjadi pada tahun 1994 dan menentukan hasil *run up* pemodelan tsunami dengan sistem *TOAST* menggunakan parameter gempa Banyuwangi yang terjadi pada tahun 1994. Hasil pemodelan tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk mengurangi risiko yang ditimbulkan jika terjadi tsunami di daerah tersebut pada kemudian hari.

2. Metode

Data Penelitian

Pada penelitian ini digunakan data yang didapatkan dari Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) dan web Global CMT yang terdiri dari data parameter gempa meliputi data longitude, latitude, waktu kejadian gempa, besar magnitudo dan kedalaman.

```

Event name: 060294C

Region name: SOUTH OF JAVA
Date (y/m/d): 1994/6/2

Information on data used in inversion

Wave  nsta  nrec  cutoff
Body   0      0      0
Mantle 56    151   135
Surface 0      0      0

Timing and location information

      hr  min  sec    lat    lon  depth  mb  Ms
PDE   18  17  36.80  -10.47  112.98  39.0  5.5  7.2
CMT   18  18  15.80  -11.03  113.04  15.0
Error                0.10    0.01    0.01    0.0
Assumed half duration: 11.5

Mechanism information

Exponent for moment tensor: 27  units: dyne-cm
      Mrr  Mtt  Mpp  Mrt  Mrp  Mtp
CMT   1.381 -1.185 -0.196  5.126 -0.783  0.142
Error  0.006  0.005  0.006  0.062  0.062  0.004

Mw = 7.8  Scalar Moment = 5.34e+27
Fault plane: strike=278  dip=7  slip=89
Fault plane: strike=99  dip=83  slip=90
Eigenvector: eigenvalue: 5.43  plunge: 52  azimuth: 9
Eigenvector: eigenvalue: -0.18  plunge: 0  azimuth: 279
Eigenvector: eigenvalue: -5.26  plunge: 38  azimuth: 189
    
```

Gambar 1. Data parameter gempa Banyuwangi dari Global CMT Catalog

Pengolahan dan Simulasi Data

Pengolahan dan simulasi data berupa parameter gempa dilakukan menggunakan sistem *TOAST*. Langkah pengolahan dan simulasi adalah sebagai berikut.

- 1) Pertama, pada sistem *TOAST* masukkan input berupa data parameter gempa meliputi nilai longitude, latitude, waktu kejadian (UTC), besar magnitudo dan kedalaman, lalu klik OK.
- 2) Selanjutnya, pilih menu Simulation lalu klik Start Simulation untuk memulai simulasi dan pemodelan tsunami.
- 3) Akan muncul skenario simulasi tsunami yaitu dengan menggunakan metode EasyWave di bagian pojok kanan atas dan tunggu hingga proses skenario selesai sampai 100 %.
- 4) Data hasil simulasi tsunami dapat disimpan dengan cara klik kanan pada tab skenario (EasyWave) lalu pilih Save As di bagian Document dan beri nama dokumen, klik OK.
- 5) Untuk melihat proposal gempa yaitu daftar daerah yang terdampak tsunami dapat dilihat di bagian tab NTWC.
- 6) Untuk melihat nilai run up, T1 Value dan T1 Time dari masing - masing daerah terdampak, pilih tab Arrivals lalu akan ditampilkan seluruh data yang ada.

3. Hasil dan pembahasan

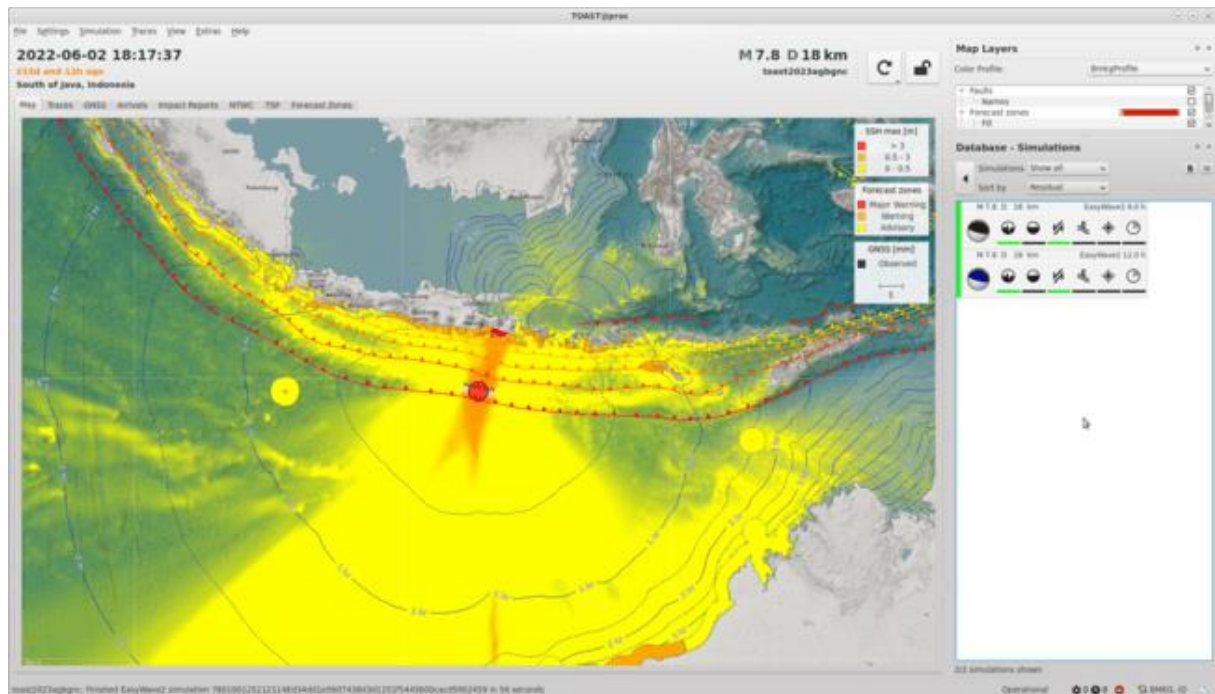
Untuk mendapatkan hasil pemodelan dan besar nilai run up digunakan parameter gempa Banyuwangi pada tahun 1994 yang didapatkan dari database BMKG, yaitu sebagai berikut.

Tabel 1.
Parameter gempa Banyuwangi 3 Juni 1994

Parameter	Nilai
Longitude	112.835 E
Latitude	10.477 S
Waktu	UTC : 18.17.34 WIB : 01.17.34 (dini hari)
Besar Magnitude	7.8 Mw
Kedalaman	018 km

Hasil Perhitungan dan Pemodelan TOAST

Setelah dilakukan pengolahan dengan data parameter gempa yang telah didapatkan, didapatkan hasil yang ditampilkan dalam Gambar 2 dan Tabel 2.



Gambar 2. Hasil pemodelan tsunami dengan *TOAST*

Tabel 2.
Hasil perhitungan TOAST

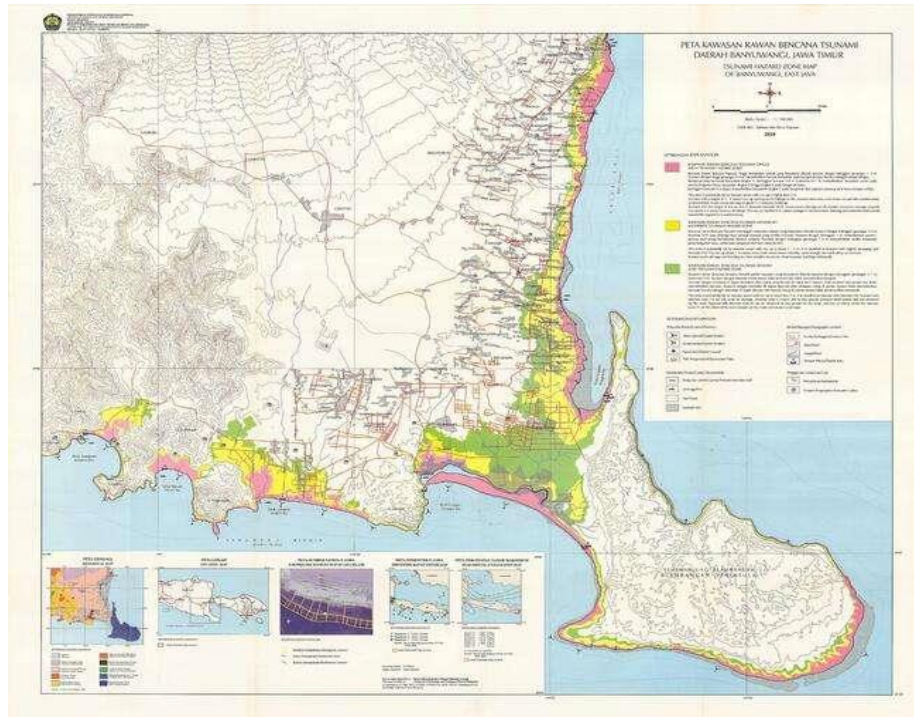
Country	Province	Location	Status	Run Up (m)	TI Time (ETA)
Indonesia	Jawa Timur	Jember Pulau Nusa Barung	Awas	4.951	06.41.52
Indonesia	Jawa Timur	Jember	Awas	4.785	06.44.37
Indonesia	Jawa Timur	Malang	Siaga	2.864	06.42.37
Indonesia	Jawa Timur	Banyuwangi bagian Selatan	Siaga	2.343	06.42.22
Indonesia	Jawa Timur	Tulungagung	Siaga	1.829	06.48.07
Indonesia	Jawa Timur	Lumajang	Siaga	1.672	06.53.37
Indonesia	Jawa Timur	Blitar	Siaga	1.664	06.46.52
Indonesia	Jawa Tengah	Wonogiri	Siaga	1.239	06.56.52
Indonesia	Jawa Tengah	Trenggalek	Siaga	1.152	06.50.52
Indonesia	DIY	Gunung Kidul	Siaga	1.014	06.59.22
Indonesia	Bali	Gianyar	Siaga	1.007	06.59.37
Indonesia	Jawa Timur	Pacitan	Siaga	0.862	06.56.52
Indonesia	NTB	Lombok Barat bagian Selatan	Siaga	0.845	06.48.37
Indonesia	Bali	Denpasar, Pantai Sanur	Siaga	0.763	06.58.07
Indonesia	Bali	Klungkung, Pulau Nusa Penida	Siaga	0.744	06.48.52
Indonesia	Bali	Tabanan	Siaga	0.743	07.03.37
Indonesia	Bali	Badung, Pantai Kuta	Siaga	0.738	06.45.37
Indonesia	NTB	Lombok Tengah	Siaga	0.716	06.52.37
Indonesia	Bali	Klungkung	Siaga	0.695	06.57.22
Indonesia	DIY	Bantul	Siaga	0.686	07.04.52
Indonesia	NTB	Kota Mataram	Siaga	0.674	07.05.52
Indonesia	Bali	Jembrana	Siaga	0.609	06.54.07
Indonesia	Bali	Karangasem bagian Selatan	Siaga	0.597	06.59.37
Indonesia	Jawa Tengah	Kebumen	Siaga	0.580	07.16.52
Indonesia	NTB	Lombok Timur bagian Selatan	Siaga	0.575	06.55.52
Indonesia	NTB	Sumbawa bagian Barat	Siaga	0.565	06.52.52
Indonesia	Jawa Barat	Sukabumi Ujung - Genteng	Siaga	0.551	07.22.22
Indonesia	NTB	Dompu bagian Selatan	Siaga	0.538	07.11.07
Indonesia	DIY	Kulon Progo	Siaga	0.533	07.07.07
Indonesia	Banten	Pandeglang bagian Selatan	Siaga	0.532	07.30.22
Indonesia	Jawa Barat	Cianjur Sindang Barang	Siaga	0.532	07.17.37
Indonesia	Jawa Tengah	Purworejo	Siaga	0.523	07.12.37
Indonesia	NTB	Sumbawa bagian Selatan	Siaga	0.519	06.57.07
Indonesia	NTT	Sumba bagian Barat	Siaga	0.517	07.12.07
Indonesia	Jawa Barat	Tasikmalaya	Waspada	0.491	07.16.07
Indonesia	Jawa Barat	Garut	Waspada	0.432	07.14.37
Indonesia	Banten	Pandeglang Pulau Panaitan	Waspada	0.418	07.34.52
Indonesia	Jawa Barat	Sukabumi, Pelabuhan Ratu	Waspada	0.416	07.27.22
Indonesia	Jawa Barat	Ciamis	Waspada	0.410	07.16.07
Indonesia	NTB	Kota Bima bagian Selatan	Waspada	0.409	07.14.07
Indonesia	NTT	Sumba bagian Timur	Waspada	0.388	07.15.37

Indonesia	NTT	Ende bagian Selatan	Waspada	0.386	07.54.07
Indonesia	NTT	Manggarai Barat bagian Selatan	Waspada	0.377	07.32.52
Indonesia	NTT	Kepulauan Manggarai Barat	Waspada	0.362	07.24.52
Indonesia	Jawa Timur	Banyuwangi bagian Timur	Waspada	0.351	06.48.22
Indonesia	Lampung	Lampung Selatan Kepulauan Legundi	Waspada	0.318	07.54.52
Indonesia	Lampung	Lampung Barat Pesisir Utara	Waspada	0.306	08.03.07
Indonesia	Banten	Lebak	Waspada	0.297	07.28.22
Indonesia	NTB	Lombok Timur bagian Timur	Waspada	0.295	07.06.37
Indonesia	Lampung	Lampung Barat Pesisir Selatan	Waspada	0.291	07.58.22
Indonesia	NTT	Ngada bagian Selatan	Waspada	0.287	07.54.07
Indonesia	NTB	Bima Pulau Gili	Waspada	0.275	07.25.22
Indonesia	Jawa Tengah	Cilacap	Waspada	0.264	07.24.22
Indonesia	NTT	Manggarai bagian Selatan	Waspada	0.260	07.43.07
Indonesia	Lampung	Lampung Barat Pesisir Tengah	Waspada	0.255	08.01.07
Indonesia	Bengkulu	Bengkulu Utara Pulau Enggano	Waspada	0.253	08.41.22
Indonesia	Lampung	Tanggamus Pulau Tabuan	Waspada	0.253	07.53.22
Indonesia	Bengkulu	Kaur	Waspada	0.251	08.06.37

Kabupaten Banyuwangi terletak pada 7°43'-8°46' Lintang Selatan dan 113°53'-114°38' Bujur Timur dengan luas 5.782,5 km² dan terdiri dari 24 kecamatan. Topografinya bervariasi dari 0 hingga 2500 mdpl. Mayoritas wilayah pegunungan Kabupaten Banyuwangi terletak di bagian selatan, utara, dan barat. Daerah dataran terdiri dari bagian selatan hingga utara. Data menunjukkan bahwa 31,70% lahan di Kabupaten Banyuwangi adalah hutan, dan bagian yang tersisa digunakan untuk pemukiman, sawah, ladang, dan tambak.

Kronologi kejadian tsunami diawali dengan terjadinya gempa berkekuatan 7,8 Mw di Samudera Hindia. Berdasarkan hasil pemodelan, selang waktu antara gempa dengan tsunami berkisar 24 menit dimana pusat gempa tepatnya terjadi di Samudera Hindia, lepas pantai bagian selatan Jawa Timur pada pukul 01.17.34 WIB dan setelah dilakukan pemodelan, gelombang tsunami pertama datang pada pukul 01.41 dini hari pada tanggal 3 Juni 1994 dimana masyarakat masih tertidur sehingga banyak korban jiwa berjatuhan. Dari data USGS dan BMKG, tercatat terdapat 250 jiwa meninggal, 423 jiwa luka-luka, 27 jiwa hilang dengan kerusakan meliputi rumah rusak dan hancur sebanyak kurang lebih 1.500, serta 278 perahu rusak dan tenggelam.

Setelah dilakukan pengolahan dengan menggunakan data parameter gempa Banyuwangi yang terjadi pada 3 Juni 1994 dengan besar magnitudo 7,8 Mw dan kedalaman 18 km yang diinput ke sistem *TOAST*, didapatkan hasil bahwa gempa tersebut mengakibatkan tsunami dengan nilai run up terbesar mencapai 4,951 m. Setelah dilakukan pengolahan dan pemodelan dengan *software TOAST* didapat 2 wilayah berstatus awas, 32 wilayah berstatus siaga dan 24 wilayah berstatus waspada. Wilayah berstatus awas pertama adalah wilayah Jember Pulau Nusa Barung dengan ketinggian run up mencapai hingga 4,951 m dan wilayah berstatus awas kedua berada di Jember, Jawa Timur dengan ketinggian run up mencapai 4,785 m.



Gambar 3. Peta kawasan rawan bencana tsunami (Sumber : PVMBG)

Dari hasil pengolahan, diketahui bahwa nilai run up tergantung pada nilai magnitudo dan kedalaman kejadian gempa. Rekonstruksi ini dilakukan untuk mengetahui sebaran dan ketinggian gelombang tsunami yang terjadi. Kedalaman episenter menjadi faktor utama yang berpengaruh terhadap perubahan muka air laut saat terjadi tsunami. episenter yang dangkal akan berakibat pada perubahan muka air laut yang lebih besar, begitu pula sebaliknya. Selain itu ketinggian suatu wilayah juga mempengaruhi luasan wilayah yang terdampak tsunami. Berdasarkan Badan Pusat Statistik Banyuwangi, Kabupaten Banyuwangi merupakan wilayah dataran tinggi dengan topografi bervariasi mulai dari 0 sampai 2500 m di atas permukaan laut. Semakin rendah posisi suatu area, semakin besar kemungkinan bahwa area tersebut akan terkena dampak tsunami, dan sebaliknya. Kemiringan lereng juga mempengaruhi jarak gelombang tsunami ke daratan. Dapat dilihat sesuai dengan hasil pengolahan dan pemodelan dengan menggunakan *TOAST*, wilayah terdampak yang berstatus awas dengan nilai run up terbesar adalah wilayah Kabupaten Jember dimana wilayah ini sebagian besar berada pada wilayah datar dengan kemiringan lahan 0-2% seluas 36,60% dari luas seluruh wilayah Kabupaten Jember sehingga dapat dikatakan wilayah selatan dari kabupaten ini yaitu Pulau Nusa Barung memiliki ancaman terhadap tsunami yang lebih tinggi ditambah dengan posisinya yang dekat dengan sumber gempa yaitu Samudera Hindia.

Sementara itu, perbandingan hasil survey oleh Maramai dan Tinti, dalam publikasinya yang berjudul "The 3 June 1994 Java Tsunami : A Post-Event Survey of the Coastal Effects," *Natural Hazards*, Vol. 15, pp.31-49, 1997 dikatakan bahwa gempa yang terjadi menghasilkan tsunami dengan ketinggian cukup variatif mulai dari 3 sampai 9 meter yang menyapu bibir pantai Banyuwangi, mulai dari ketinggian 2 - 2,5 meter di wilayah Lampon, 5 meter di wilayah Pancer sampai ketinggian 7 meter di wilayah Rajekwesi.

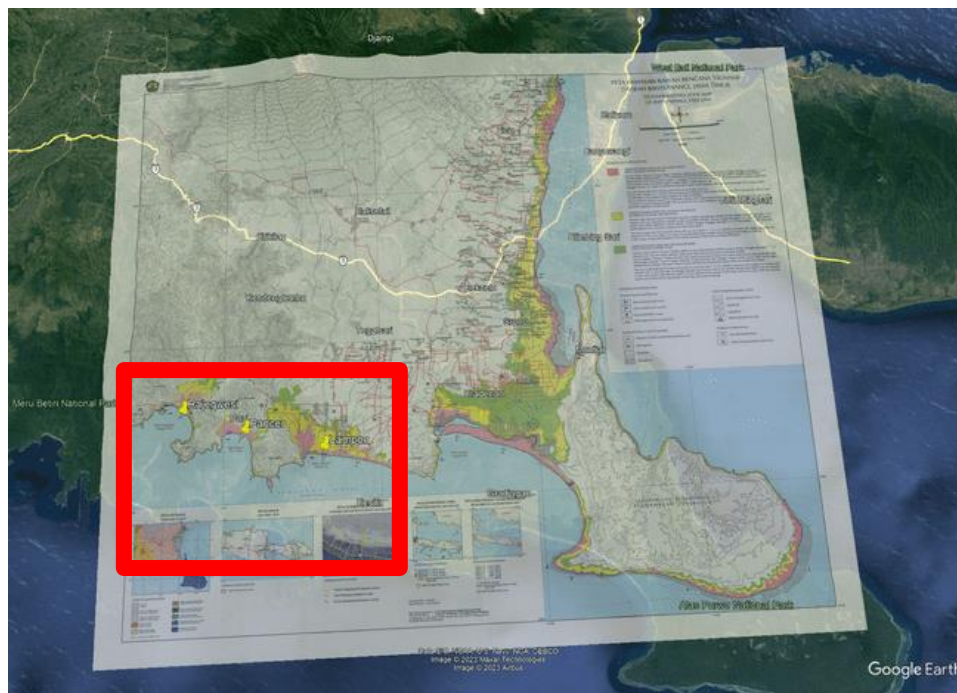
Selain itu, survei yang pernah dilakukan oleh C. Synolakis, F. Imamura, Y. Tsuji, H. Matsutomi, S. Tinti, B. Cook, Y. P. Chandra, and M. Usman dimana mereka membentuk sebuah tim survei tsunami internasional untuk melakukan survei kerusakan dari tanggal 19 Juni hingga 24 Juni yang meliputi wilayah pesisir kurang lebih 500 km dari Denpasar, Bali, dan ke selatan Malang di Jawa. Tujuannya adalah untuk mengukur jarak penetrasi bahaya tsunami sebagai bahan evaluasi untuk membandingkan nilai dengan prediksi numerik, dan untuk mengidentifikasi fitur dan kondisi topografi yang tidak biasa yang berkontribusi pada jumlah kematian dan kerugian yang relatif tinggi. Survei yang dilakukan terdiri dari pengukuran tinggi genangan runup dan pola aliran berdasarkan watermark atau catatan saksi mata dalam hal ini adalah masyarakat yang secara langsung mengalami kejadian. Di Jawa Timur, sebagian besar kerusakan dan korban terkonsentrasi di desa-desa yang berbatasan langsung dengan pantai. Wilayah Pancer dan Lampon terlebih dahulu dilewati oleh pasang surut. Terdapat beberapa sungai - sungai kecil yang mengalir di belakang desa-desa ini dimana dalam kondisi normal biasanya kapal nelayan dapat berlabuh di belakang desa, tetapi saat

tsunami terjadi semuanya hanyut dan hancur diterjang gelombang tsunami. Menurut survei yang telah dilakukan, tsunami yang terjadi akibat gempa ini memiliki run up hingga mencapai ketinggian 5,7 - 9,4 m. Selain itu menurut laporan dari Gary Foley dari Biro Meteorologi di Perth, melihat catatan pengukuran pasang surut di Dampier, King Bay tercatat gelombang tsunami dimana gelombang diperkirakan memiliki sekitar 3 - 4 m membawa ikan, udang karang, dan bebatuan sampai jarak 200-300 m ke daratan. Penduduk setempat juga melaporkan bahwa mereka mendengar suara berisik seperti deru kereta api yang ternyata adalah gelombang tsunami (Imamura et al, 2006).

Tabel 3.
Perbandingan tinggi gelombang berdasarkan survey sebelumnya

No.	Daerah	Ketinggian Gelombang (Maramai dan Tinti, 1997) (m)	Ketinggian Gelombang (Imamura, 1995) (m)
1	Lampon	2-2.5	1.8
2	Pancer	5	5.7-9.4
3	Rajegwesi	7	4.2-14

Jika hasil survey dari kedua penelitian sebelumnya di-*overlay* ke peta kawasan rawan bencana tsunami Kabupaten Banyuwangi pada Gambar 4, dapat diketahui bahwa wilayah Rajegwesi, Pancer dan Lampon (ditandai dengan kotak warna merah) berada dalam kawasan yang ditandai dengan warna pink. Hal ini menunjukkan bahwa kawasan tersebut termasuk dalam *high tsunami hazard zone* atau daerah potensi rawan bencana tsunami tinggi dengan ketinggian gelombang tsunami mulai dari 4 meter hingga mencapai 8 meter dan ketinggian genangan lebih dari 3 meter. Ombak yang dihasilkan dapat menyapu dan menyebabkan banyak kerusakan pada bangunan batu, bangunan kayu, juga vegetasi yang ada. Hasil *overlay* ke peta kawasan rawan bencana tsunami Kabupaten Banyuwangi ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Plot Wilayah dengan Peta *High Tsunami Hazard*

Berdasarkan hasil di atas, ditemukan adanya perbedaan antara hasil pemodelan *TOAST* dengan hasil pengukuran lapangan yang telah dilakukan sebelumnya seperti pada tabel 2 dan tabel 3, pada hasil pemodelan *TOAST*, wilayah Jember menjadi wilayah dengan nilai run up tertinggi sedangkan berdasarkan survei yang dilakukan oleh Maramai dan Tinti, 1997 dan Imamura, 1995 didapatkan hasil run up tertinggi berada di wilayah pesisir Kabupaten Banyuwangi seperti pada peta Hasil Plot Wilayah dengan Peta *High Tsunami Hazard* (Gambar 4). Ini karena Banyuwangi berada di dekat pusat gempa. Perbedaan ini dianggap sebagai hasil dari dua faktor: akurasi kedalaman perairan yang diperhitungkan dan perbedaan titik pengukuran. Oleh karena itu, penggunaan model dianggap tepat dan dapat digunakan untuk simulasi berikutnya.

Saat ini Pemerintah dan BMKG terus melakukan inovasi dalam menghadapi kemungkinan terjadi tsunami di Indonesia. Sistem peringatan dini atau *Early Warning System* terus dikembangkan mengingat kemajuan teknologi yang juga semakin canggih saat ini. Selain itu upaya mitigasi bencana pun penting dilakukan dan merupakan tanggung jawab pemerintah, instansi terkait dan juga masyarakat dalam melindungi semua masyarakat, aset ekonomi dan juga lingkungan. Oleh karena itu melakukan rekonstruksi dan kajian terhadap resiko bencana tsunami sangat diperlukan agar kedepannya perencanaan dan pembangunan wilayah dapat dilakukan dengan baik terlebih untuk wilayah yang sebelumnya sudah pernah mengalami bencana tsunami agar ketika bencana terjadi, korban jiwa dan kerugian yang dialami dapat diminimalisir serta pembangunan yang dilakukan dapat sesuai dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.

4. Simpulan dan saran

Setelah dilakukan pemodelan dan analisis, didapat hasil bahwa tsunami Banyuwangi yang terjadi pada 3 Juni 1994 dapat direkonstruksi menggunakan parameter gempa, yaitu longitude 112.835 ° E, latitude 10.477° S, waktu 01.17.34 WIB, dan besar magnitudo 7.8 Mw, serta kedalaman 18 km. Berdasarkan hasil pemodelan *TOAST*, hasil run up tertinggi berada di wilayah Jember Pulau Nusa Barung dengan ketinggian run up mencapai hingga 4.951 m. Wilayah tersebut juga merupakan wilayah pertama yang terkena dampak tsunami pada pukul 1.41.52 WIB (dini hari) dengan selang waktu 24 menit setelah kejadian gempa. Dari hasil tersebut, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut di daerah rawan tsunami dan cara mitigasi yang tepat sehingga masyarakat lebih memahami dan mengetahui apa yang harus dilakukan apabila terjadi gempa berpotensi tsunami sehingga korban dan kerugian akibat bencana dapat diminimalisir.

Daftar Rujukan

- Alfaris, L., Baswantara, A., & Suhernalis, S. (2020). Analisa Numerik Tsunami Pangandaran Dan Implikasinya Terhadap Mitigasi Bencana. *MARLIN*, 1(1), 39-45.
- BMKG, 2010. *InaTEWS Indoensia Tsunami Early Warning System Konsep dan Implementasi*, Jakarta: BMKG.
- BMKG, 2012. *Pedoman Pelayanan Peringatan Dini Tsunami*. Jakarta Pusat: BMKG.
- BMKG. 2019. *Katalog Tsunami Indonesia Tahun 416-2018*. Jakarta: BMKG.
- BNPB. 2020. *Indeks Risiko Bencana Indonesia*. Jakarta: BNPB.
- Diposaptono dan Budiman. 2006. Pemetaan Tingkat Risiko Tsunami di Kabupaten Sikka, Nusa Tenggara Timur. *E-Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*, 1(1): 48-61.
- Diposaptono, S. & Budiman. 2005. *Tsunami*. Bogor: Penerbit Buku Ilmiah Populer.
- Imamura, F., Yalciner, A. C. & Ozyurt, G. 2006. *Tsunami Modelling Manual (Tsunami Model)*.
- Imamura, F., Yalciner., Ahmet Cevdet., Ozyurt., Gulizar. 2006. *Tsunami Modeling Manual DRRC (Disaster Control Research Center)*. Jepang: Tohoku University.
- Maramai dan Tinti. 1997. The 3 June 1994 Java Tsunami : A Post-Event Survey of the Coastal Effects. *Natural Hazards*, Vol. 15, pp.31-49.
- Mardiyanto, B., Rochaddi. B. & Helmi, M. 2013. Kajian Kerentanan Tsunami Menggunakan Metode Sistem Informasi Geografi di Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Journal of Marine Research*. 2 (1):103-111.
- Marfai M. A. 2011a. Impact of coastal inundation to ecology and agricultural land use, Case in Central Java Indonesia. *International Journal of Quaestiones 59 Geographicae*, 30(3): 19-32. DOI 10.2478/v10117-011-0024-y 30(3): 19- 32.
- Marfai MA dan Khasanah T. 2009. Kerawanan dan kemampuan adaptasi masyarakat pesisir terhadap bahaya banjir genangan dan tsunami. Laporan Penelitian. Hibah Penelitian Bencana dan Budaya. CRCS. Sekolah Pasca Sarjana UGM.
- Marfai MA, King L, Sartohadi J, Sudrajat S, Budiani SR, Yulianto F. 2008b. The impact of tidal flooding on a coastal community in Semarang, Indonesia. *Environmentalist*, 28: 237-248.
- Martinawati, Rizkia. 2018. *Pemodelan Tsunami Sumba 19 Agustus 1977 Menggunakan Software TOAST dengan Simulasi Easywave dan Tsunawi*. Skripsi. Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Brawijaya: Malang.
- Nandi. 2006. Gempa Bumi. http://file.upi.edu/Direktori/FPIPS/JUR._PEND._GEOGRAFI/197901012005011NANDI/geologi%20lingkungan/GEMPA_BUMI.pdf_suplemen_Geologi_Lingkungan.pdf [18 Mei 2017].
- Pujianto. (2007). *Bahan Kuliah Perencanaan Struktur Tahan Gempa*. Yogyakarta: Universitas Muhammadiyah Yogyakarta
- Puspito, N. T, Yudistira T, Septiana T & Robiana R. 2005. *Tsunami Simulation for TEWS in Java Island*.

- Proceedings of Asian Physics Symposium.
- Reid, H.F. (1906). The Mechanics of the Earthquake, The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Investigation Commission, Vol.2. Washington, D.C: Carnegie Institution of Washington.
- Satake, Kenji et al. 2012. Tsunami Source of the 2010 Mentawai, Indonesia Earthquake Inferred from Tsunami Field Survey and Waveform Modeling. USA : Springerlink.
- Setiyono, Urip, dkk. 2019. Katalog Gempa Bumi Signifikan dan Merusak 1821-2018. Jakarta: Pusat Gempa Bumi dan Tsunami BMKG.
- Sudibyakto. 2000. Kajian dan Mitigasi Bencana Gempa Bumi: Studi Kasus Gempa Bumi Bengkulu, 4 Juni 2000. Jurnal Majalah Geografi Indonesia, Vol.14 Nomor 2, September 2000. Halaman 105-120.
- Sugito, Nanin Trianawati. 2008. Tsunami. Bandung : Universitas Pendidikan Indonesia.
- Synolakis C., Imamura F., Tsuji Y., Matsutomi H., Tinti S., Cook B., Y. P. Chandra, and M. Usman. 1995. Damage, Conditions of East Java Tsunami of 1994 Analyzed.
- The United State Geological Survey (USGS) Earthquake Catalogue. Available www.earthquake.usgs.gov.
- Tim Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman. Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat.
- Triyono, Rahmat dkk. 2019. Katalog Gempabumi Signifikan dan Merusak 1821- 2018. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- Tsuji, Y. E. 1995. Field survey of the east Java earthquake and tsunami of June 3, 1994, *Pure Appl, Pure Appl, Geophys*, 144: 839-854.