

## STUDI SIMULASI NUMERIK WAKTU TEMPUH TSUNAMI PANTAI SELATAN JAWA TIMUR

Alvin Alexander Kurniawan<sup>1</sup>, Jason Iskandar<sup>2</sup>, Gunawan Budi Wijaya<sup>3</sup> dan Pamuda Pudjisuryadi<sup>4</sup>

**ABSTRAK :** Indonesia adalah negara yang rawan dengan aktivitas seismik karena dilewati oleh sirkum cincin api pasifik. Gempa yang terjadi pada dasar laut dapat mengakibatkan tsunami. Oleh sebab itu, banyak peneliti berusaha melakukan simulasi tsunami dengan berbagai macam potensi gempa. Sehingga, tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa potensi tsunami di wilayah pantai selatan Jawa Timur, dengan potensi gempa berkekuatan 8.8 skala Richter yang dikatakan oleh Dr. Widjo Kongko. Metode numerik yang digunakan pada penelitian ini adalah *characteristic-based split method* dengan menggunakan persamaan *shallow water equation*. Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada sebagian besar pantai selatan Jawa Timur yang terdiri dari 6 kabupaten, yaitu; Tulungagung, Blitar, Malang, Lumajang, Jember, dan Banyuwangi menghasilkan estimasi waktu sampai gelombang tsunami berkisar 16-28 menit (dengan catatan permukaan dasar laut dianggap tanpa friksi). Banyuwangi merupakan wilayah pertama yang terkena gelombang tsunami dengan estimasi waktu sampai sebesar 16 menit, sedangkan Lumajang menjadi wilayah terakhir dengan estimasi waktu sampai 28 menit.

**KATA KUNCI:** gempa, tsunami, *characteristic-based split method*, *shallow water equation*

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia adalah negara yang rawan dengan aktivitas seismik karena dilewati oleh sirkum cincin api pasifik. Gempa yang terjadi pada dasar laut merupakan salah satu hal yang dapat mengakibatkan terjadinya tsunami. Salah satu contohnya adalah tsunami yang terjadi di wilayah Sumatera pada tahun 2004, gempa bumi *megathrust* sebesar 9 skala Richter yang terjadi pada dasar laut menginisiasikan tsunami yang mematikan hingga mengakibatkan 227.898 orang meninggal dunia (U.S. Geological Survey, 2012). Oleh sebab itu, banyak peneliti berusaha melakukan simulasi tsunami dengan berbagai macam potensi gempa. Daerah yang menjadi ranah penelitian pada studi ini adalah wilayah pesisir pantai selatan pulau Jawa (Provinsi Jawa Timur). Wilayah tersebut merupakan daerah rawan gempa karena terdapat pertemuan antara lempeng Eurasia dan Indo-Australia. Menurut pakar tsunami dari Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), Dr. Widjo Kongko, daerah sepanjang selatan Jawa hingga ke Sumba di sisi timur dan di selatan Selat Sunda berpotensi diguncang gempa bermagnitudo 8.5-8.8 skala Richter (TheJakartaPost, 2019).

---

<sup>1</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416029@john.petra.ac.id

<sup>2</sup> Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, m21416238@john.petra.ac.id

<sup>3</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, gunawanbw@petra.ac.id

<sup>4</sup> Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, pamuda@petra.ac.id

## 2. TSUNAMI

Tsunami pada umumnya terjadi akibat dari aktivitas seismik, erupsi vulkanik dan longsor. Ketiga aktivitas tersebut menyebabkan dasar laut berdeformasi dan menyebabkan perubahan dasar laut secara vertikal yang menyebabkan naiknya muka air laut. Naik atau turunnya dasar laut secara vertikal pada dasarnya tidak selalu menimbulkan masalah yang besar, namun apabila deformasi ini terjadi secara mendadak, dan terjadi pada laut yang dalam, mengakibatkan timbulnya tsunami yang besar. Kecepatan tsunami pada lautan bebas dapat mencapai 900 km/jam dengan panjang gelombang hingga 720 km dan tinggi gelombang tidak lebih dari 30 cm. Sehingga tsunami termasuk dalam kategori *shallow-water flow* karena memiliki periode dan panjang gelombang yang panjang (Exploring Our Fluid Earth, n.d.). Hal berbeda terjadi ketika tsunami meninggalkan lautan bebas dan menuju ke daratan. Ketika tsunami mencapai daratan, maka kecepatan akan berkurang. Ketika kecepatan berkurang, maka akan berimbas pada naiknya ketinggian gelombang tsunami hingga beberapa meter. Hal itu disebabkan karena hukum kekekalan energi dimana energi akan selalu konstan.

## 3. PERSAMAAN GELOMBANG

Persamaan umum yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan gelombang adalah Persamaan Navier-Stokes. Persamaan Navier-Stokes merupakan penurunan dari hukum kekekalan massa dan momentum yang ditunjukkan dalam persamaan 1 dan 2.

$$\text{Persamaan Kontinuitas: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\text{Persamaan Momentum: } \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\rho u_i) u_j] - \frac{\partial}{\partial x_j} [\tau_{ji}] + \frac{\partial p}{\partial x_i} + Q_i = 0 \quad (2)$$

dimana  $i, j = 1, 2, 3$  dan  $\rho$  adalah massa jenis air,  $u_i$  adalah kecepatan pada arah  $x$ ,  $y$ , dan  $z$ ,  $p$  adalah tekanan, dan  $Q_i$  adalah source terms.

*Source terms* berisi mengenai parameter-parameter yang mempengaruhi perambatan gelombang seperti gaya coriolis  $f_i$ , gradien tekanan atmosfer  $\partial P_a / \partial x_i$ , tegangan geser permukaan  $\tau_{ij}^s$ , dan tegangan geser dasar laut  $\tau_{ij}^b$ . *Source terms* dapat ditulis pada persamaan 3.

$$\text{Source terms: } Q_i = -g(h - H) \frac{\partial H}{\partial x_i} - h f_i \quad (3)$$

Namun, karena tsunami memiliki ratio kedalaman laut berbanding dengan panjang gelombang kurang dari 0.05, maka tsunami tergolong dalam *shallow water flow* (Le Mehaute, 1976). Hal tersebut memungkinkan dilakukan penyederhanaan dalam perhitungan matematis sehingga terciptalah *shallow water equations* yang ditulis pada persamaan 4 dan 5.

$$\text{Persamaan Kontinuitas: } \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\text{Persamaan Momentum: } \frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j U_i) + \frac{\partial p}{\partial x_i} + Q_i = 0 \quad (5)$$

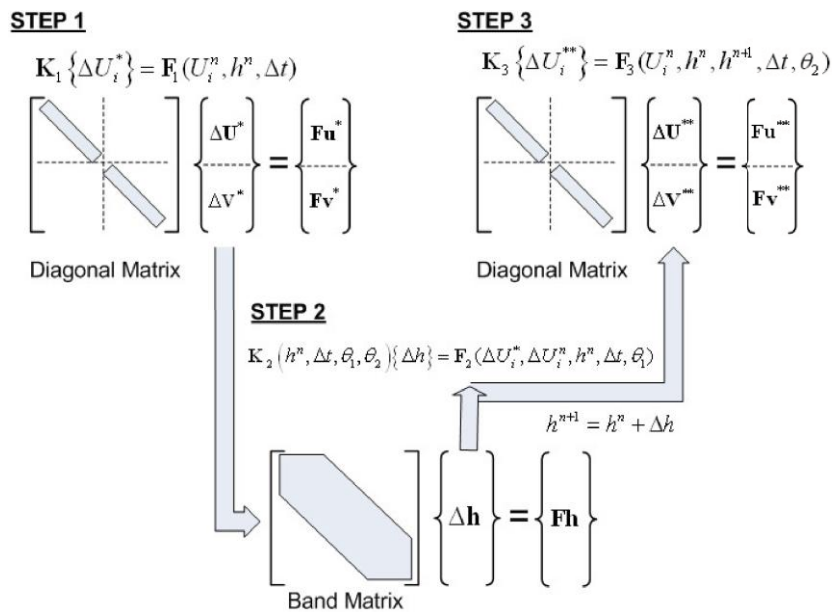
dimana  $i, j = 1, 2$  dan  $U_i$  = kecepatan rata-rata pada arah  $x$ ,  $y$  dan  $c = \sqrt{gh}$  adalah kecepatan gelombang,  $g$  adalah percepatan gravitasi,  $h$  adalah ketinggian air, dan  $p$  didefinisikan pada persamaan 6.

$$p = \frac{1}{2} g (h^2 - H^2) \quad (6)$$

dimana  $H$  adalah kedalaman laut

## 4. CHARACTERISTIC-BASED SPLIT METHOD

Perhitungan secara matematis dengan menggunakan *Shallow Water Equation* (SWE) sulit untuk diselesaikan, sehingga dalam beberapa tahun terakhir telah banyak dikembangkan model untuk mensimulasikan tsunami secara numerik salah satunya oleh Zienkewicz dan Codina. Beliau mengusulkan model FEM untuk menyelesaikan permasalahan *shallow water flow* yang diberi nama metode *Characteristic-Based Split* (CBS). Metode ini telah banyak digunakan oleh para ahli untuk memodelkan gelombang tsunami, salah satunya adalah Wijaya (2005). Metode CBS ini menyelesaikan *shallow water equations* dengan 3 langkah yang dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Solusi Algoritma CBS

## 5. PARAMETER GEMPA DAN TSUNAMI

Pada penelitian ini, gempa 8.8 skala Richter diinisiasikan terjadi di wilayah selatan pulau Jawa Timur, dengan episenter gempa terletak di koordinat  $10.42^\circ$  LS dan  $113.18^\circ$ BT. Letak episenter gempa dan batasan-batasan pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Panjang patahan dan *displacement* yang diakibatkan oleh gempa dengan magnitudo tertentu dapat dihitung secara empiris menggunakan persamaan 7 dan 8 yang dikemukakan Papazachos (2004).

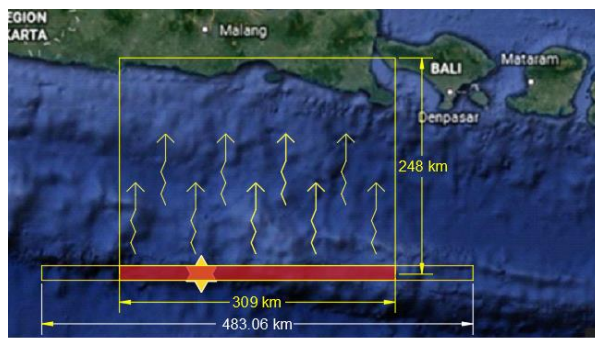
$$\log L = -2.42 + 0.58 \times M_w \quad (7)$$

$$\log AD = -1.43 + 0.88 \times \log L \quad (8)$$

Berdasarkan dua persamaan diatas, didapatkan *displacement* rata-rata yang terjadi akibat gempa 8.8 skala Richter adalah sebesar 8.55 m dan panjang patahan yang diinisiasikan oleh gempa tersebut adalah sepanjang 483.06 km. Karena pada penelitian ini hanya mencakupi Tulungagung dan Banyuwangi, maka panjang patahan yang diperhitungan hanya sepanjang 308.9 km. Selain penentuan panjang patahan dan *displacement*, periode gelombang ditetapkan selama 550 detik agar sesuai dengan karakteristik *Shallow Water Equation* yang dimana rasio kedalaman laut tidak lebih besar 20 kali lipat dari panjang gelombang. Pergerakan patahan tersebut diasumsi terjadi pada semua batasan pada ujung selatan. Pemaparan letak sumber tsunami pada penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 3**.



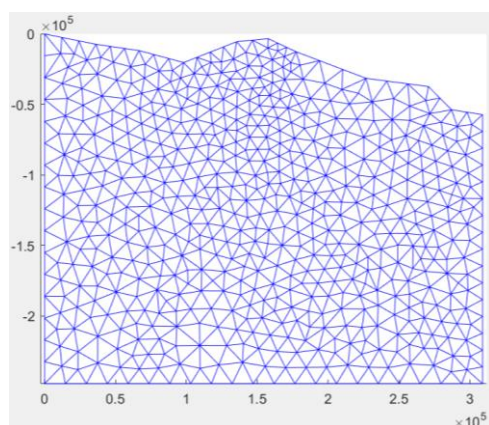
Gambar 2. Batas Penelitian dan Episenter Gempa



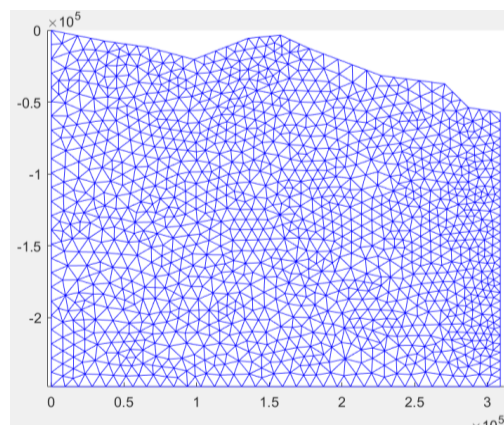
Gambar 3. Letak Patahan dan Arah Perambatan Gelombang

## 6. HASIL PENGOLAHAN DATA BATIMETRI

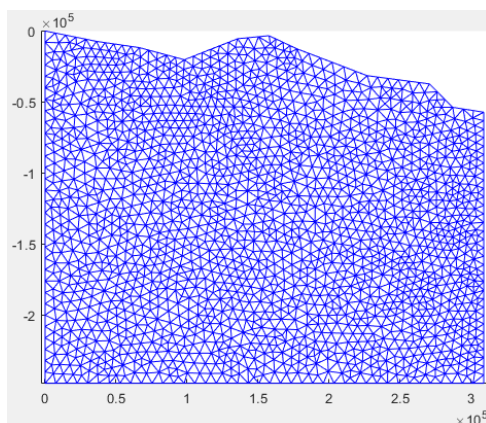
Simulasi dilakukan pada berbagai macam mesh dengan kerapatan yang berbeda, mulai dari mesh yang kasar hingga mesh yang halus. Tujuan dilakukannya hal ini adalah untuk melakukan tes konvergensi sehingga dapat mengetahui apakah mesh yang kita gunakan sudah cukup halus sehingga menghasilkan data yang akurat. Program *meshing.exe* yang digunakan akan mengeluarkan *output* berupa konektivitas antar noda pada elemen-elemen segitiga yang tercipta. Namun, hasil tersebut hanya menunjukkan koordinat x dan y. Untuk memperbarui data ketinggian, maka dilakukan pengolahan data batimetri yang didapatkan dari GEBCO (*General Bathymetric Chart of Oceans*). Hal tersebut dilakukan dengan bantuan program *batymatlab.m*. Hasil *meshing.exe* dapat dilihat pada **Gambar 4** dan hasil *batymatlab.m* dapat dilihat pada **Gambar 5**.



(A) 621 Noda, 1159 Elemen

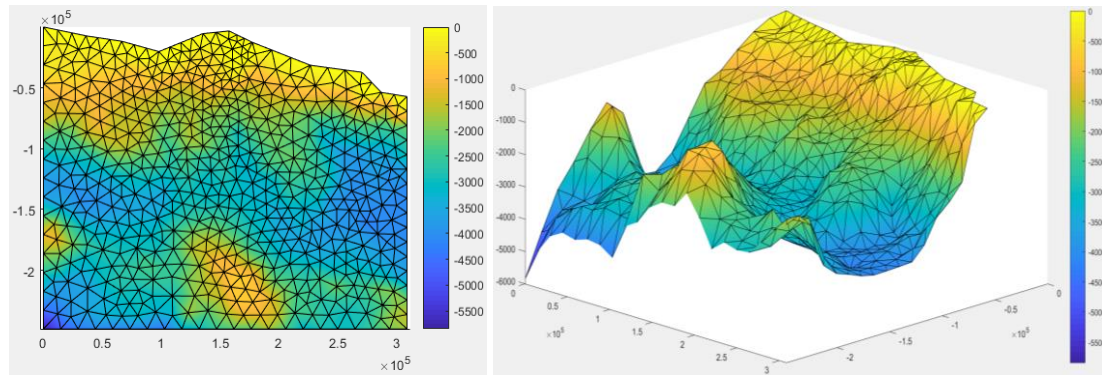


(B) 1353 Noda, 2575 Elemen

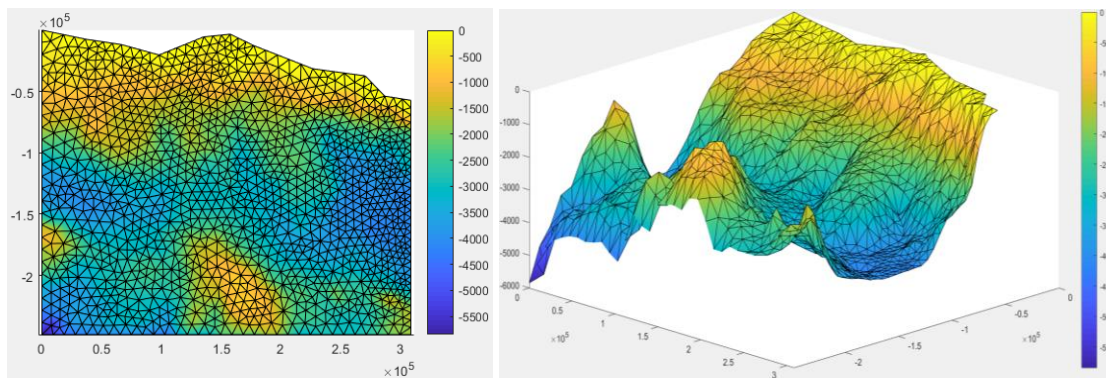


(C) 1907 Noda, 3662 Elemen

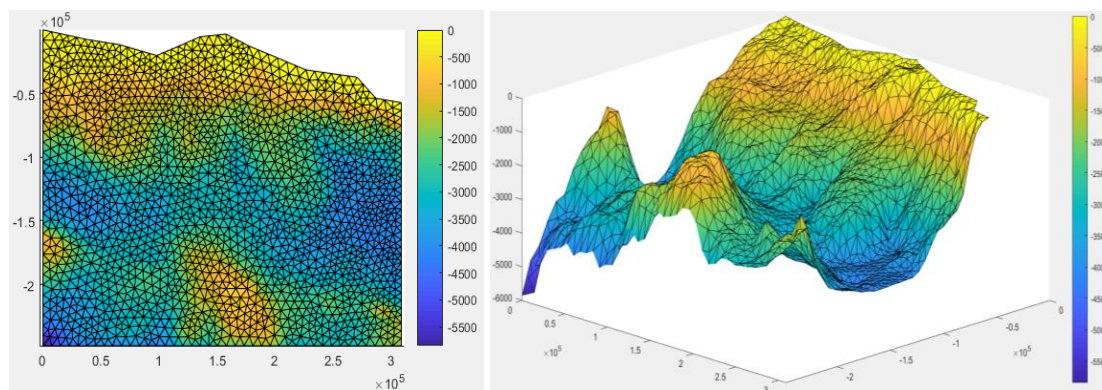
Gambar 4. Hasil Mesh Sebelum Pembaharuan Kedalaman Laut (*meshing.exe*)



(A) 621 Noda, 1159 Elemen



(B) 1353 Noda, 2575 Elemen



(C) 1907 Noda, 3662 Elemen

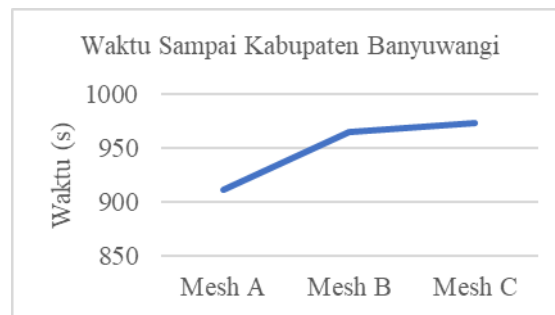
Gambar 5. Hasil Mesh Sesudah Pembaharuan Kedalaman Laut (*batymatlab.m*)

## 7. SIMULASI NUMERIK TSUNAMI

Simulasi dilakukan dengan menginisiasikan gelombang pada patahan yang sudah ditentukan sebelumnya dan dianalisa terhadap waktu tempuhnya. Simulasi dilakukan dengan mengambil kondisi terburuk, dimana permukaan dasar laut dianggap tanpa friksi sehingga gelombang tsunami akan lebih cepat sampai ke darat sehingga lebih aman. Untuk memberikan informasi untuk setiap kabupaten, maka hasil dari penelitian dipaparkan menjadi beberapa zona yang dapat dilihat pada **Gambar 6**. Tes konvergensi waktu tempuh dilakukan dengan menganalisa waktu tempuh yang dibutuhkan gelombang dari patahan hingga kabupaten Banyuwangi. Hasil simulasi waktu tempuh pada kabupaten Banyuwangi dapat dilihat pada **Gambar 7**.



Gambar 6. Pembagian Zona dalam Analisa

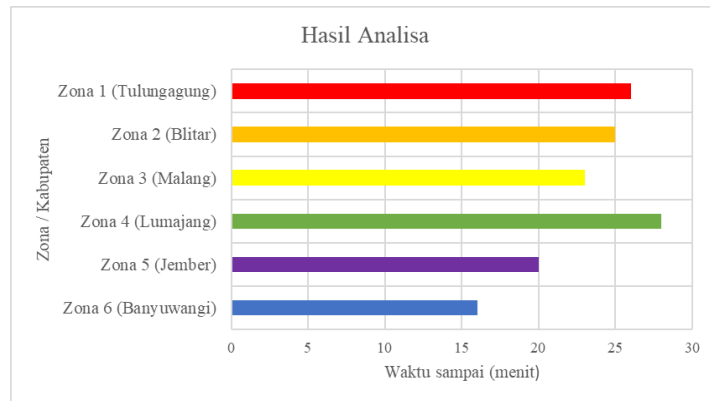


Gambar 7. Tes Konvergen Mesh A, B, dan C

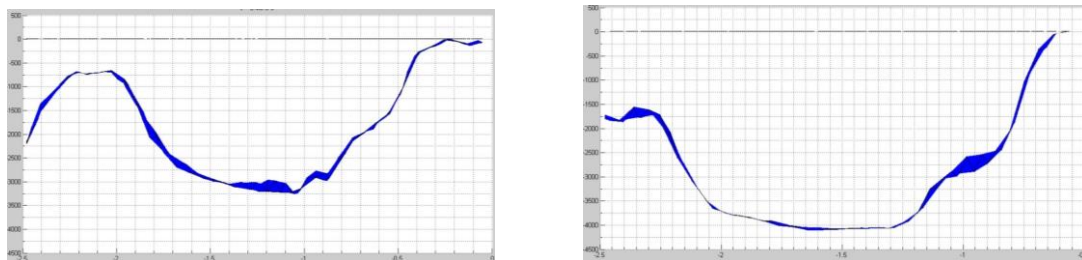
Hasil menunjukkan bahwa terdapat pola konvergen antara *mesh* A, B, dan C. Pada *mesh* A dan B terdapat perbedaan waktu hingga 53 detik, sedangkan pada *mesh* B dan C perbedaan waktu antar *mesh*nya hanya 8 detik. Hal ini menunjukkan bahwa semakin halus *mesh*, maka hasil yang didapatkan akan semakin konvergen (asimtotis) sehingga tidak perlu dilakukan penghalusan *mesh* lagi karena perbedaan antar *mesh* hanya dalam satuan detik. Sehingga untuk penelitian pada daerah-daerah lainnya, digunakan hasil simulasi dari *mesh* C.

## 8. HASIL DAN ANALISA

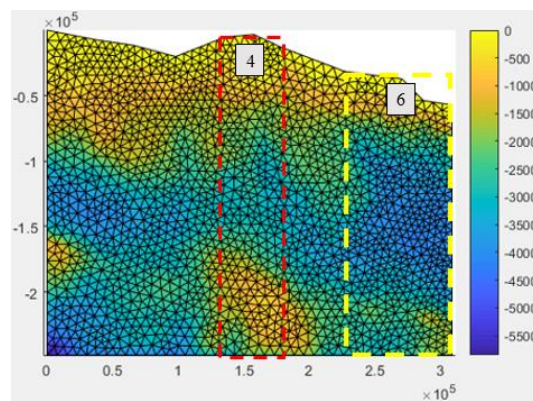
Hasil simulasi yang dilakukan pada *mesh* C menunjukkan bahwa Banyuwangi merupakan wilayah pertama yang terkena dampak tsunami yaitu sekitar 16 menit, sedangkan Lumajang merupakan wilayah terakhir yang terkena dampak tsunami yaitu sekitar 28 menit. Hasil lengkap setiap titik penelitian dapat dilihat pada **Gambar 8**. Terdapat beberapa alasan mengapa Banyuwangi menjadi wilayah pertama yang terkena dampak tsunami. Letak Banyuwangi yang lebih dekat dengan patahan dibanding wilayah-wilayah lainnya adalah salah satu alasan utamanya. Selain itu, Banyuwangi juga memiliki kedalaman laut yang dalam (**Gambar 9**) yang menyebabkan kecepatan gelombang yang terjadi lebih cepat. Hal sebaliknya dialami oleh Lumajang, karena letaknya yang jauh dari patahan dan memiliki kedalaman laut yang dangkal (**Gambar 9**) maka Lumajang menjadi wilayah terakhir yang terkena dampak tsunami. **Gambar 10** akan memberikan paparan mengenai kedalaman laut pada penelitian ini dengan lebih luas.



**Gambar 8. Hasil Analisa Setiap Zona / Kabupaten**

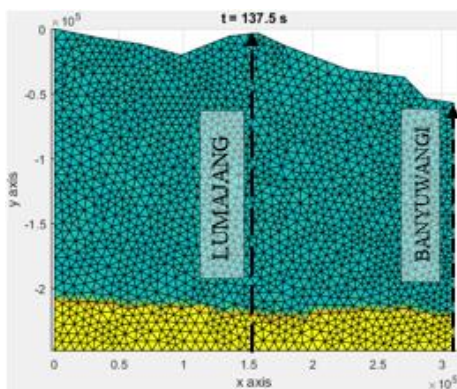


**Gambar 9. Potongan Zona 4 Lumajang (Kiri) dan Zona 6 Banyuwangi (Kanan)**

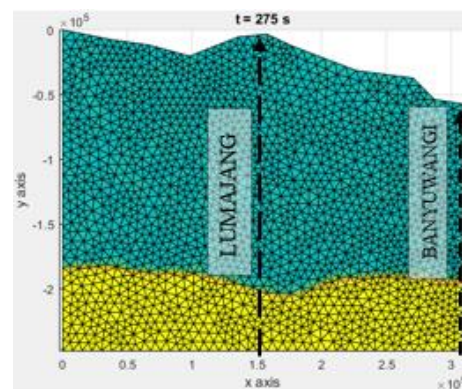


**Gambar 10. Zona 4 Lumajang (Merah) dan Zona 6 Banyuwangi (Kuning)**

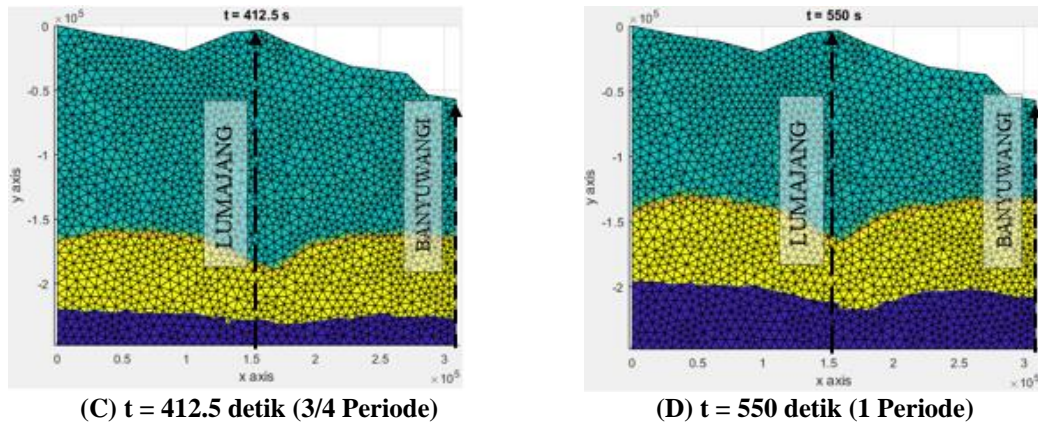
Seperti yang terlihat pada **Gambar 11**, perambatan gelombang akan melambat ketika melewati dasar laut dengan kedalaman laut yang dangkal. Sebaliknya, pada laut yang relatif lebih dalam, maka gelombang akan bertambah cepat.



**(A) t = 137.5 detik (1/4 Periode)**



**(B) t = 275 detik (1/2 Periode)**



(C)  $t = 412.5$  detik (3/4 Periode)

(D)  $t = 550$  detik (1 Periode)

Gambar 11. Perambatan Tsunami

## 9. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian yang dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan:

1. Simulasi yang dilakukan pada pantai selatan Jawa Timur yang terdiri dari 6 kota yaitu Tulungagung, Blitar, Malang, Lumajang, Jember, dan Banyuwangi menghasilkan estimasi waktu sampai gelombang tsunami berkisar 16-28 menit (dengan catatan permukaan dasar laut dianggap tanpa friksi).
2. Banyuwangi merupakan wilayah pertama yang terkena gelombang tsunami dengan estimasi waktu sampai sebesar 16 menit, sedangkan Lumajang menjadi wilayah terakhir dengan estimasi waktu sebesar 28 menit

## 10. DAFTAR REFERENSI

- Exploring Our Fluid Earth. (n.d.). *Tsunamis*. Retrieved August 16, 2019 from <https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/coastal-interactions/tsunamis>
- Le Méhauté, B. (1976). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer, New York.
- Papazachos, B.C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C.B., dan Karakaisis, G. F. (2004). *Global Relations between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes*, Bull. Geol. Soc. Greece, Vol. XXXVI. Proceedings of the 10 International Congress, Thessaloniki.
- TheJakartaPost (2019). *Govt Agencies Calm Public about Tsunami Threat along Java's Southern Coast*. Retrieved December, 16 2019 from <https://www.thejakartapost.com/amp/news/2019/07/21/govt-agencies-calm-public-about-tsunami-threat-along-javas-southern-coast.html>
- U.S. Geological Survey (2012). *Magnitude 9.1 – Off The West Coast of Northern Sumatra*, Denver. Retrieved December, 16 2019 from <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2004/us2004slav/us2004slav.php>
- Wijaya, G. B. (2005). *Two Dimensional Numerical Simulation of Tsunami Propagation*. Asian Institute of Technology (AIT). Bangkok: