

PEMODELAN TSUNAMI DI KECAMATAN PACITAN DAN KECAMATAN NGADIROJO KABUPATEN PACITAN JAWA TIMUR

Ferdian Yoga Aditama¹, Amien Widodo¹, Juan Pandu Gya Nur Rochman¹, Sugeng Pribadi²

¹Teknik Geofisika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

²Deputi Informasi Peringatan Tsunami, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG), Jakarta

*e-mail : ferdian.aditama@gmail.com

Abstrak. Selama kurun waktu tahun 1600 hingga 2007 telah terjadi kurang lebih 109 tsunami di Indonesia dengan 90% diakibatkan gempa tektonik. Pacitan berada pada daerah tunjaman (*subduction*) yang sangat rawan terhadap gempabumi dan tsunami. Kondisi morfologi pesisir Pacitan berpotensi besar terhadap bahaya tsunami. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan tsunami yang dibangkitkan oleh gempa hipotetik *megathrust* segmen Jawa Timur berkekuatan Mw 8.7. Metode yang digunakan *Cornell-Multi Grid Coupled* dengan *software* COMCOT 1.7. Sistem *nested grid* menggunakan 4-layer terdiri dari 1-layer GEBCO, 2-layer batimetri, dan 1-layer integrasi untuk menghasilkan pemodelan tsunami dengan resolusi yang tinggi. Hasil penelitian menunjukkan skenario gempa hipotetik *megathrust* segmen Jawa Timur menyebabkan *vertical displacement* pada permukaan laut sebesar -4.59 m hingga 7.02 m. Propagasi tsunami ke arah utara menuju pesisir Pacitan memiliki amplitudo maksimum 33.16 m dengan waktu tempuh 23 – 29 menit kemudian menyebar ke segala arah. Jangkauan inundasi terjauh terjadi di Kecamatan Pacitan sejauh 4.19 km ke arah utara Pantai Ranuharjo, sedangkan *run-up* maksimum 21.82 m terjadi di Pantai Soge Kecamatan Ngadirojo. Berdasarkan peta bahaya tsunami, Kecamatan Pacitan memiliki luasan area terdampak inundasi paling luas 21.63 km², sedangkan luasan area inundasi terkecil di Kecamatan Tulakan 0.33 km².

Kata Kunci: COMCOT, Inundasi, *Run-up* Tsunami, *Megathrust*, Pacitan

Abstract. During the period 1600 to 2007 there have been approximately 109 tsunamis in Indonesia with 90% caused by tectonic earthquakes. Pacitan located in a subduction area which high vulnerability to earthquakes and tsunamis. The coastal morphology of Pacitan has great potential for tsunami hazard. This research is focused on conducting modeling of the tsunami generated by the hypothetical *megathrust* earthquake in the East Java segment with a magnitude of Mw 8.7. The method that used is *Cornell-Multi Grid Coupled* with *COMCOT 1.7 software*. The *nested grid* system used a 4-layer consisting of 1-layer GEBCO, 2-layer bathymetry, and 1-layer integration to produce tsunami modeling with high resolution. The results showed that the *megathrust* hypothetical earthquake scenario for the East Java segment caused a *vertical displacement* at sea level of -4.59 m to 7.02 m. The tsunami propagation northwards towards the Pacitan coast had a maximum amplitude of 33.16 m with a travel time of 23 – 29 minutes and then spreads in all directions. The farthest inundation range occurred in Pacitan Subdistrict as far as 4.19 km to the north of Ranuharjo Beach, while the maximum *run-up* of 21.82 m occurred in Soge Beach, Ngadirojo Subdistrict. Based on the tsunami hazard map, Pacitan Subdistrict had the largest inundated area of 21.63 km², while the smallest inundation area is in Tulakan Subdistrict 0.33 km².

Keywords: COMCOT, Tsunami Inundation, *Run-up*, *Megathrust*, Pacitan

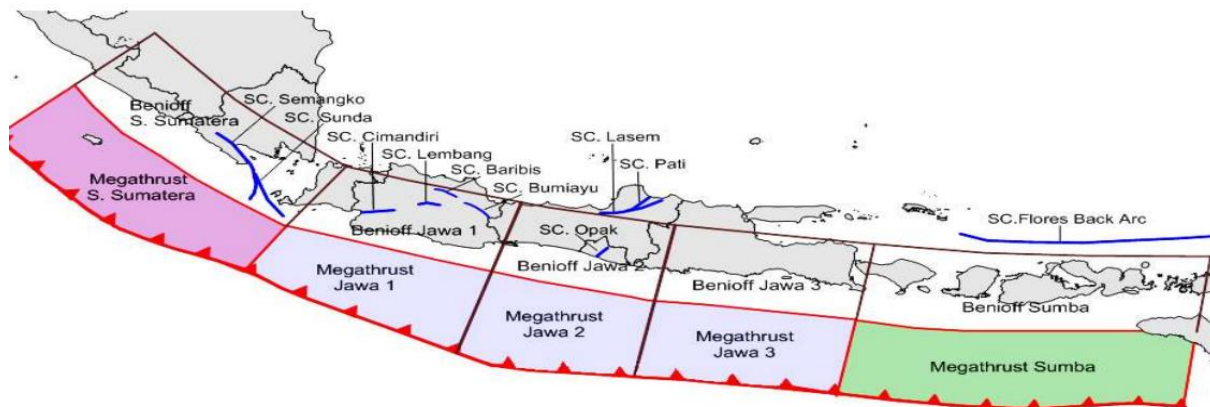
PENDAHULUAN

Selama kurun waktu tahun 1600 hingga 2007 telah terjadi kurang lebih 109 tsunami di Indonesia dengan 90% diakibatkan gempa tektonik. Gempa bumi tektonik di sepanjang daerah subduksi merupakan lokasi episentrum gempa yang menjadi penyebab dari terjadinya bencana tsunami (Widianto dan Damen, 2014). Pacitan berada pada daerah tunjaman (*subduction*) yang sangat rawan

terhadap gempabumi dan tsunami. Kondisi morfologi pesisir Pacitan berpotensi besar terhadap bahaya tsunami. Berdasarkan hasil pemodelan bahaya tsunami pada skenario gempabumi hipotetik Mw 8.5, terdapat 16 desa kelurahan yang berpotensi terdampak langsung di Kabupaten Pacitan (Wibowo dkk., 2017). Berdasarkan hasil relokasi kejadian gempa oleh BMKG menunjukkan terdapat celah seismik (*seismic gaps*) di sepanjang

batas lempeng aktif yang tidak mengalami gempa besar selama lebih dari 30 tahun (Widiyantoro dkk., 2020). Zona tersebut memiliki kemungkinan terjadi penguncian (*locked*) terhadap pergeseran lempeng (*slip deficit*) sehingga menyebabkan terjadi pengumpulan energi dan memiliki potensi

mengakibatkan gempa *megathrust* bersifat tsunamigenik. Ketika area *deficit* Jawa Tengah dan Jawa Timur patah akan menyebabkan gempa berkekuatan 8.8 magnitudo (Widiyantoro dkk., 2020).



Gambar 1. Pembagian zona gempa subduksi (Erlangga, 2020)

Upaya mitigasi terhadap bahaya tsunami sangat penting melalui pembuatan peta genangan di sepanjang garis pantai yang rentan terhadap bencana tsunami. Pembuatan peta berdasarkan sejarah peristiwa tsunami dan skenario hipotesis (Ayunda dkk., 2020). Dalam membuat peta genangan tsunami menggunakan model numerik yang menghitung perambatan tsunami dari sumber gempa ke daerah pesisir, hasil yang diperoleh adalah nilai *run-up* dan inundasi atau genangan tsunami. Pemodelan numerik tsunami menggunakan persamaan perairan dangkal karena sangat efisien dalam mensimulasikan tsunami melalui penggunaan skema numerik (Wang, 2009).

Maka dari itu, penelitian ini difokuskan untuk melakukan pemodelan numerik tsunami dengan memahami karakter gempa pembangkit tsunami (tsunamigenik) (Khoiridah dkk., 2022), pada pemodelan tsunami ini dibangkitkan oleh gempa *megathrust* selatan jawa. Penelitian menggunakan metode *Cornell-Multi Grid Coupled* yang menerapkan persamaan gelombang panjang di perairan dangkal menggunakan *software* COMCOT (Wang, 2009) untuk merekonstruksi angka menjadi analisis statistik. Pemodelan memperhatikan faktor morfologi pesisir terhadap gelombang tsunami dan simulasi luasan area inundasi. Hasil inundasi dan

run-up digunakan untuk membuat peta bahaya tsunami di pesisir pantai Pacitan Jawa Timur.

METODOLOGI

Pemodelan tsunami melalui pendekatan numerik menggunakan teori perairan dangkal. Persamaan ini memberi korelasi antara momentum masa dengan air batimetri di dasar samudera terhadap ketinggian gelombang air dari *mean sea level*. Ketika tsunami merambat di atas *continental* dan mendekati pantai, maka persamaan air yang berlaku adalah persamaan *linear* untuk perairan dalam serta persamaan *nonlinear* untuk perairan dangkal. Persamaan *linear* gelombang panjang untuk koordinat *spherical* yang digunakan adalah:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \tag{1}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - fQ = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fQ = 0 \tag{3}$$

Dimana nilai koefisien gaya Coriolis ini dipengaruhi oleh nilai dari kecepatan rotasi bumi dikali dengan *sin latitude*.

$$f = \Omega \sin \varphi \tag{4}$$

Persamaan *nonlinear* digunakan di perairan dangkal sehingga dapat menggambarkan gerakan aliran fluida di zona pantai sebagai berikut.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \tag{5}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_x = 0 \quad (6)$$

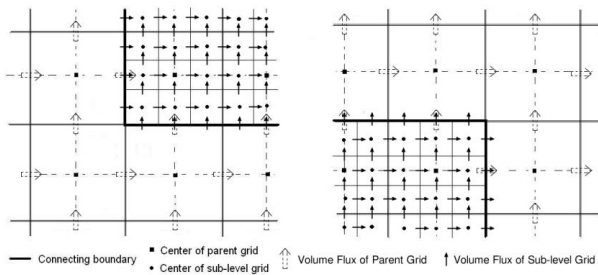
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fQ + F_y = 0 \quad (7)$$

Nilai F mewakili gesekan bawah permukaan dalam arah X dan Y yang dituliskan dalam persamaan di bawah ini.

$$F_x = \frac{gn^2}{7} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (8)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{7} Q(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (9)$$

Pemodelan ini menggunakan *Nested Grid Configuration*, dimana diperlukan pengaturan *grid* titik hitungan yang dapat dilakukan secara fleksibel bahkan bertingkat dari *grid* besar hingga kecil guna meningkatkan keseimbangan antara akurasi dengan efisiensi. Pengaturan *grid* kasar berada pada domain *layer* yang besar (*parent grid*), sedangkan *grid* yang lebih halus digunakan untuk domain *layer* yang lebih kecil (*sub-level grid*) (Wang, 2009).



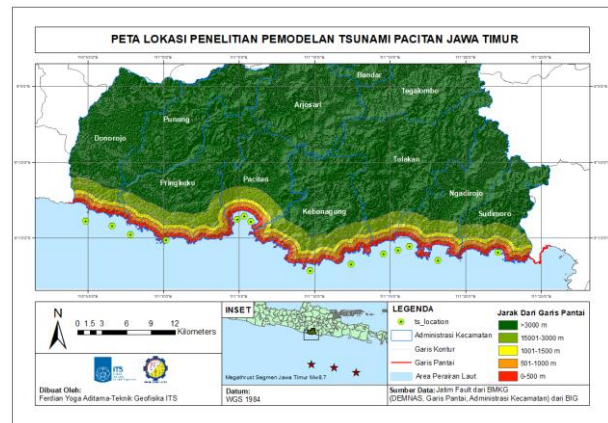
Gambar 2. *Nesteed Grid Setup in COMCOT* (Wang, 2009)

Tabel 1. Parameter skenario terburuk gempa hipotetik pembangkit tsunami (Kongko dan Schlurmann, 2010; Pusat Studi Gempa Nasional, 2017)

Magnitudo	Episenter		Length (m)	Width (m)	Depth (m)	Strike (° NE)	Dip (°)	Rake (°)	Dislocation (m)
	Longitude	Latitude							
Mw 8.7	111.19260	-9.99970	141000	91000	20000	275	10	90	19.0
	112.48320	-10.1723	141000	91000	17000	280	7	90	19.0
	113.76190	-10.4503	141000	91000	18000	285	9	90	19.0

Beberapa data yang digunakan dalam pemodelan tsunami meliputi data batimetri dapat diperoleh dari website Indonesia Geospasial Portal, data batnas yang digunakan adalah BATNAS (Batimetri Nasional) Jawa Timur (resolusi 6-arcsecond, datum EGM2008 dan MSL, sistem koordinat Geografis, format Geotiff 32bit float). Data GEBCO (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) digunakan sebagai *layer* 1 dalam pemodelan tsunami. Data DEMNAS (*Digital Elevation Model Nasional*) dari website Indonesia Geospasial Portal dengan *grid* yang dipakai sesuai area pemodelan (resolusi 0.27-arcsecond, datum EGM2008, sistem koordinat Geografis, format

Penelitian pemodelan inundasi dan *run-up* tsunami akibat gempa *megathrust* di pesisir pantai Pacitan Jawa Timur.

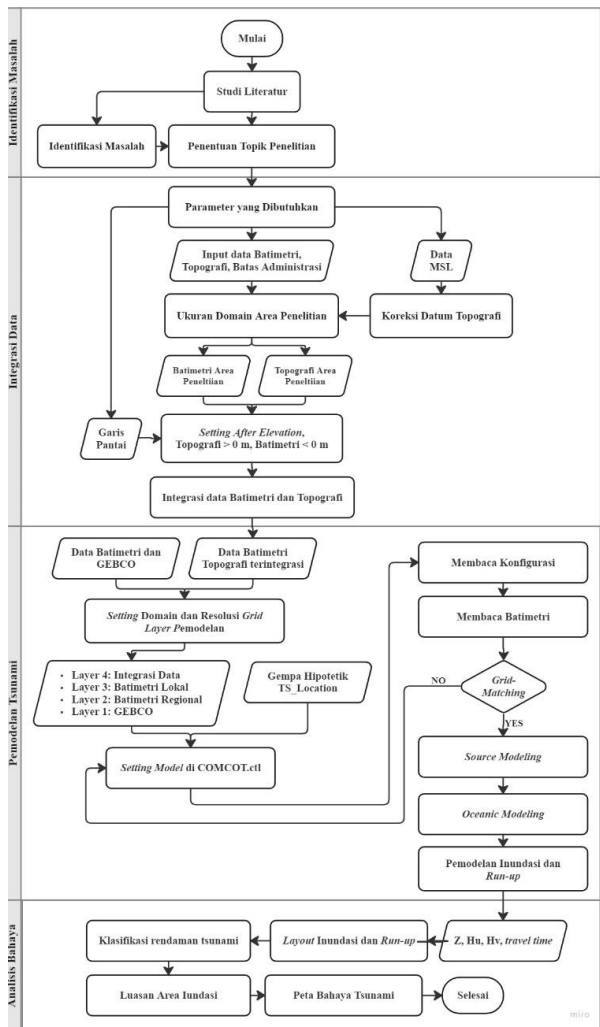


Gambar 3. *Peta lokasi penelitian pemodelan tsunami Pacitan Jawa Timur*

Peta lokasi penelitian pemodelan tsunami ditinjau dari jarak garis pantai menggunakan metode *multiple ring buffer* dengan interval 500 m hingga lebih dari 3 km sebagai berikut. Simulasi skenario terburuk gempa pembangkit tsunami yang digunakan adalah gempa hipotetik *megathrust* kekuatan Mw 8.7 diperoleh dari BMKG bersumber dari Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN).

Geotiff 32bit float). Peta administrasi skala 50K dari website Indonesia Geospasial Portal. *Shapefile* garis pantai tahun 2021 diperoleh dari BMKG. Peta MSL dengan format .tiff sebagai koreksi data demnas diperoleh dari BMKG. Kegempaan dan *focal mechanism* gempa bumi (episenter dan hiposenter) diperoleh dari katalog gempa bumi hipotetik Pusat Studi Gempa Nasional (PUSGEN) tahun 2017.

Berikut merupakan diagram alir dari pengerjaan penelitian pemodelan inundasi dan *run-up* tsunami dibagi menjadi tiga, yaitu pada tahap integrasi data, pemodelan tsunami, dan pembuatan peta bahaya tsunami sebagai berikut.



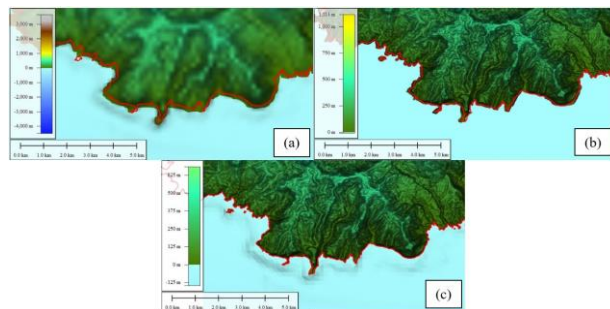
Gambar 4. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Integrasi Data Topografi dan Batimetri

Pemodelan tsunami pada dasarnya menggunakan data topografi (darat) dan batimetri (laut) yang rinci guna menghasilkan hasil pemodelan peta bahaya tsunami yang bagus (Ayunda dkk., 2020). Data batimetri menunjukkan nilai kedalaman perairan, skala datanya sangat besar namun kurang rinci. Sedangkan data topografi menunjukkan nilai elevasi daratan, skala lebih kecil dan lebih rinci. Adanya perbedaan kualitas data topografi dan batimetri, sehingga pada pemodelan kali ini dilakukan integrasi untuk menggabungkan data topografi dan batimetri. Gambar 5 menunjukkan hasil integrasi data, dimana elevasi data sudah sesuai, elevasi positif berada di daratan dan elevasi negatif berada di laut. Penggabungan data batimetri dan topografi memiliki nilai resolusi 0.36 arc-second

atau 11 meter. Hasil integrasi data batimetri dan topografi selanjutnya digunakan untuk proses pembuatan *grid*.



Gambar 5. Perbandingan data (a) Batimetri, (b) Topografi sebelum integrasi dengan (c) Data topografi batimetri terintegrasi

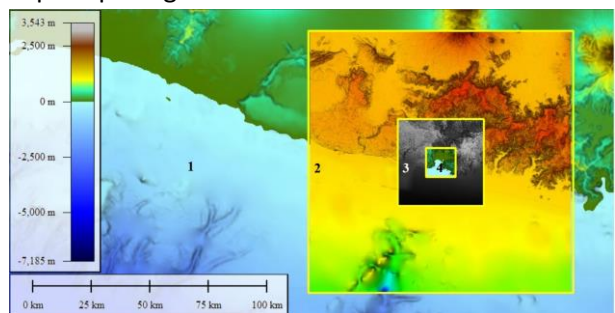
Pembuatan Grid

Pemodelan tsunami metode *Cornell Multi-Grid Coupled* menggunakan konsep persamaan model hidrodinamika yang menerapkan *nested grid* (*grid* bersarang) sebagai media simulasi pemodelan. Prinsip *grid* bersarang ini secara berurutan dimulai dari domain terbeser hingga domain terkecil (Wang, 2009).

Tabel 2. *Setting* resolusi tiap *grid layer*

Layer	Derajat	Menit	Arc Sec	Meter	Keterangan Data
1	0.0027	0.162	9.72	300.6	GEBCO
2	0.0009	0.054	3.24	100.2	BATNAS
3	0.0003	0.018	1.08	33.4	BATNAS
4	0.0001	0.006	0.36	11.1	Integrasi Data

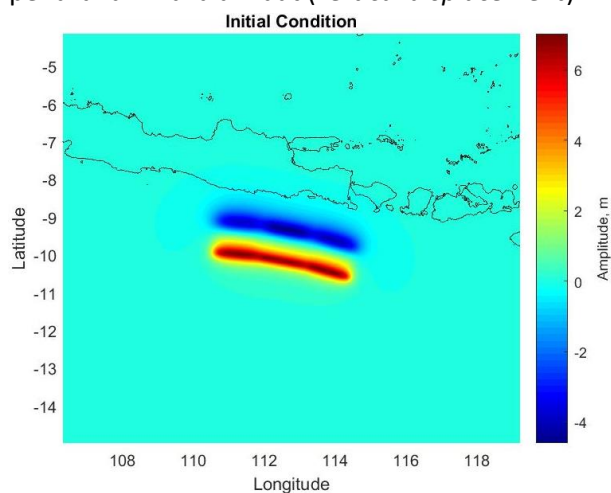
Selain pengaturan resolusi *grid*, pada pemodelan COMCOT juga diperlukan pengaturan domain *layer* seperti pada gambar 6 di bawah ini.



Gambar 6. Pembagian *layer* pemodelan di Kecamatan Pacitan, Kabupaten Pacitan (1) GEBCO, (2) Batnas skala regional, (3) Batnas skala lokal, (4) Integrasi batimetri topografi

Initial Condition (Source Modeling)

Pemodelan menggunakan simulasi gempa *megathrust* yang terdiri dari tiga titik sumber gempa. Jarak dari pusat gempa menuju pesisir Pacitan paling dekat 195.65 km (*subplot 1*) dan paling jauh 381.49 km (*subplot 3*). Pada saat kondisi awal tsunami, terjadi proses pengangkatan serta penurunan muka air laut (*vertical displacement*).



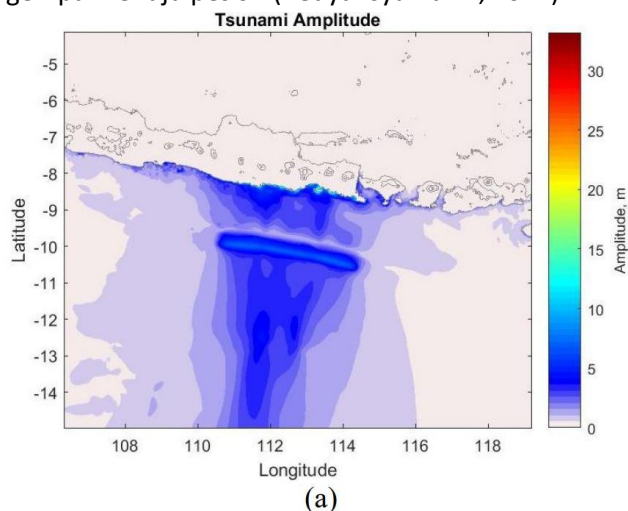
Gambar 7. Kondisi awal permukaan laut sesaat setelah terjadi gempa terjadi perubahan permukaan laut -4.599 m hingga 7.019 m

Nilai maksimum menunjukkan proses terjadinya pergerakan vertikal pada kerak samudera yang naik. Sedangkan nilai minimum kerak samudera mengalami penurunan. Sehingga apabila lempeng samudera mengalami proses *uplift* secara cepat setelah terjadi gempa *megathrust* akan menyebabkan massa air dari dasar hingga permukaan laut juga mengalami naik turun dalam skala besar (Julius dkk., 2018).

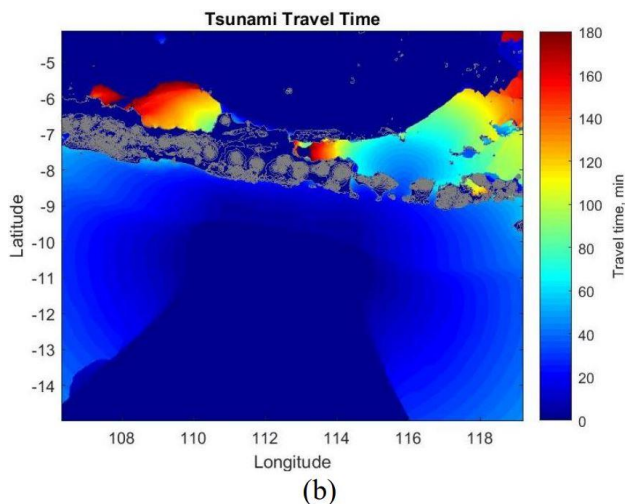
Sumber gempa yang dangkal dengan kekuatan besar akan memberikan energi yang sangat besar untuk menggerakkan massa air di atasnya yang berdampak pada beda *vertical displacement* yang semakin besar (Pribadi dkk., 2013). Ketiga titik sumber gempa arah *strike* mengarah ke pesisir selatan Jawa. *Strike* yang arahnya menuju morfologi batimetri lebih dangkal akan menghasilkan gelombang tsunami yang semakin tinggi, begitu sebaliknya *strike* yang arahnya menuju morfologi batimetri lebih dalam akan menghasilkan gelombang tsunami kecil.

Propagasi Tsunami (Oceanic Modeling)

Gelombang tsunami gerakannya ke semua penjuru akibat adanya gerak impulsif yang terjadi di bawah permukaan laut (Alam dkk., 2020). Hasil pemodelan tsunami pada gambar 8 menunjukkan propagasi tsunami (*oceanic modeling*) arahnya menjalar dari sumber gempa menuju segala arah akibat proses dislokasi lempeng bumi. Hal ini menghasilkan energi potensial dan kinetik yang menyebar ke segala arah memengaruhi perpindahan massa air yang ada di atasnya. *Output* dari pengolahan COMCOT akan menghasilkan data "*zmax_layerxx*" yang menunjukkan persebaran ketinggian tsunami sebagai *flowdepth* atau daerah jangkauan tsunami. Kemudian juga terdapat *output* data "*ttt_layerxx*" yang menunjukkan penjalaran waktu tempuh (*travel time*) tsunami dari sumber gempa menuju pesisir (Redyansyah dkk., 2017).



(a)



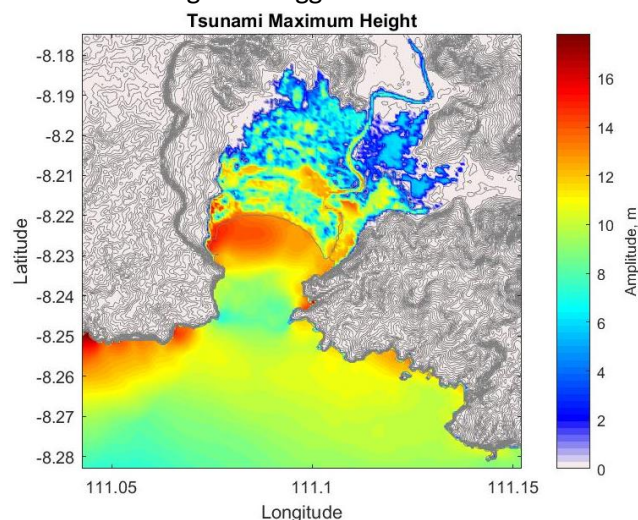
Gambar 8. Penjalaran tsunami meliputi (a) Amplitudo gelombang tsunami dan (b) Waktu Tempuh tsunami

Gambar 8 menunjukkan massa air laut di selatan pulau Jawa bergerak ke segala arah hingga menimbulkan gelombang tsunami setinggi 33.16 m setelah perekaman selama 10,800 detik atau 3 jam. Skenario gempa *megathrust* memiliki arah *strike* $275^{\circ} - 285^{\circ}$ NE mengarah ke utara menuju kawasan pesisir selatan Jawa. Sehingga hasil pemodelan menunjukkan gelombang tsunami terpecah menjadi dua mengarah ke utara menuju pesisir selatan Jawa dan mengarah ke Samudera Hindia (Commission, 2019). Gelombang tsunami yang mengarah ke perairan yang lebih dangkal akan menghasilkan peningkatan ketinggian gelombang karena saat tsunami menjalar akan terjadi penumpukan massa air seiring dengan batimetri yang semakin dangkal.

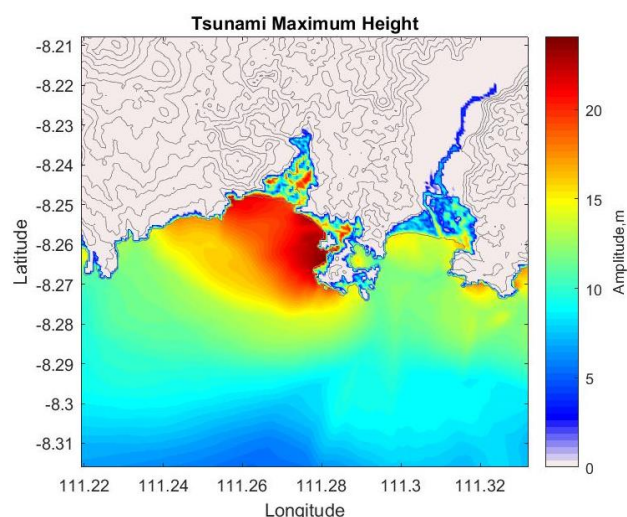
Inundasi dan Run-up Tsunami

Hasil pemodelan tsunami skala lokal menggunakan *layer 4* (domain kecamatan) untuk melihat kondisi inundasi dan *run-up* di sepanjang pesisir selatan Kabupaten Pacitan. Nilai *run-up* dan inundasi pada *layer 4* diperoleh dari persamaan perairan dangkal *nonlinear*. *Output* pemodelan COMCOT diperoleh "*hmax_layerxx*" sebagai nilai perubahan permukaan air laut. Dari hasil pemodelan tsunami *layer 4* dapat diketahui nilai inundasi dan *run-up* di setiap kecamatan. Jangkauan inundasi dihitung dari jarak terjauh secara horizontal tsunami yang memasuki daratan ditinjau dari garis pantai. Sedangkan *run-up* dihitung dari

jarak vertikal antara garis pantai yang memiliki elevasi nol dengan ketinggian tsunami di daratan.



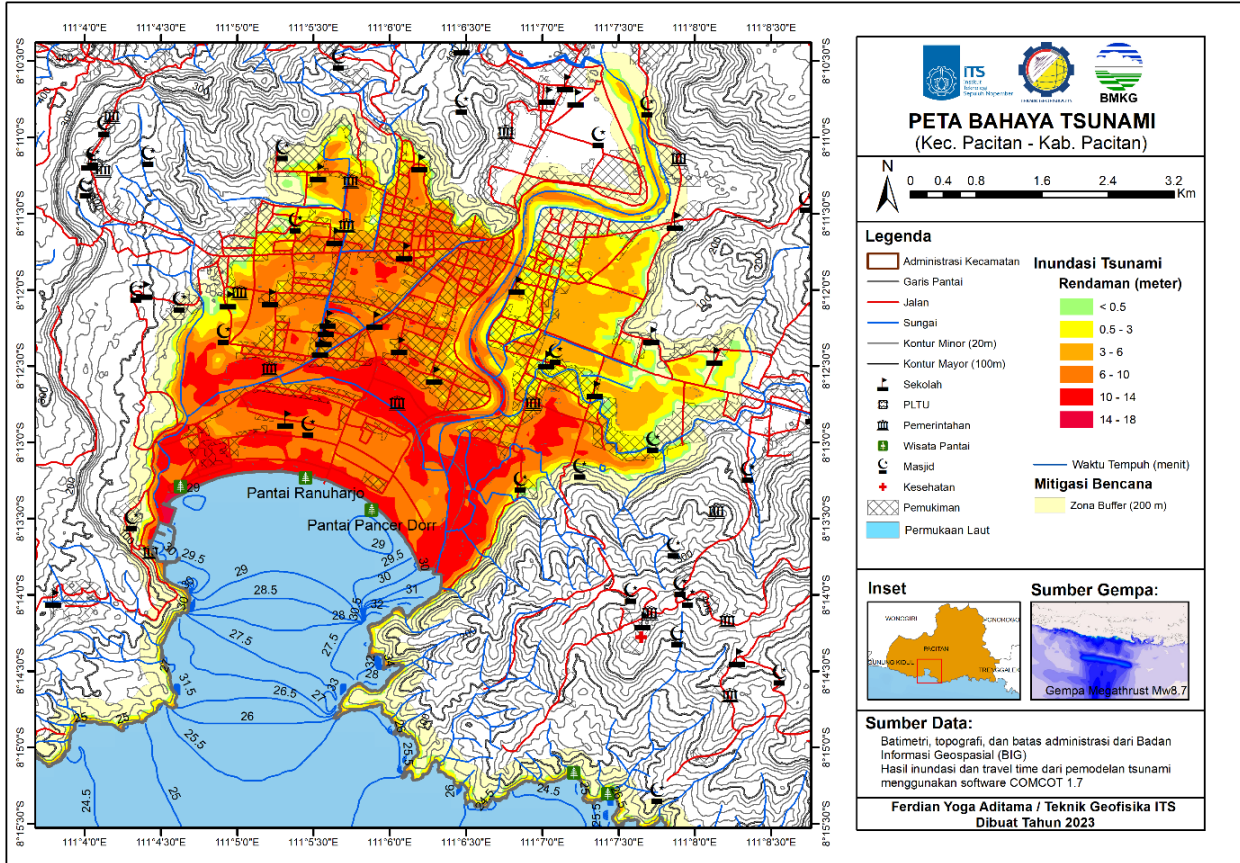
Gambar 9. Model ketinggian tsunami Kecamatan Pacitan Kecamatan Pacitan ketinggiannya mencapai 17.81 m dengan waktu dengan waktu tiba 29-30 menit. Kecamatan Pacitan memiliki inundasi terjauh 4.19 km mengarah ke utara dari Pantai Ranuharjo, sedangkan *run-up* sebesar 15.19 m di Pantai Telengria.



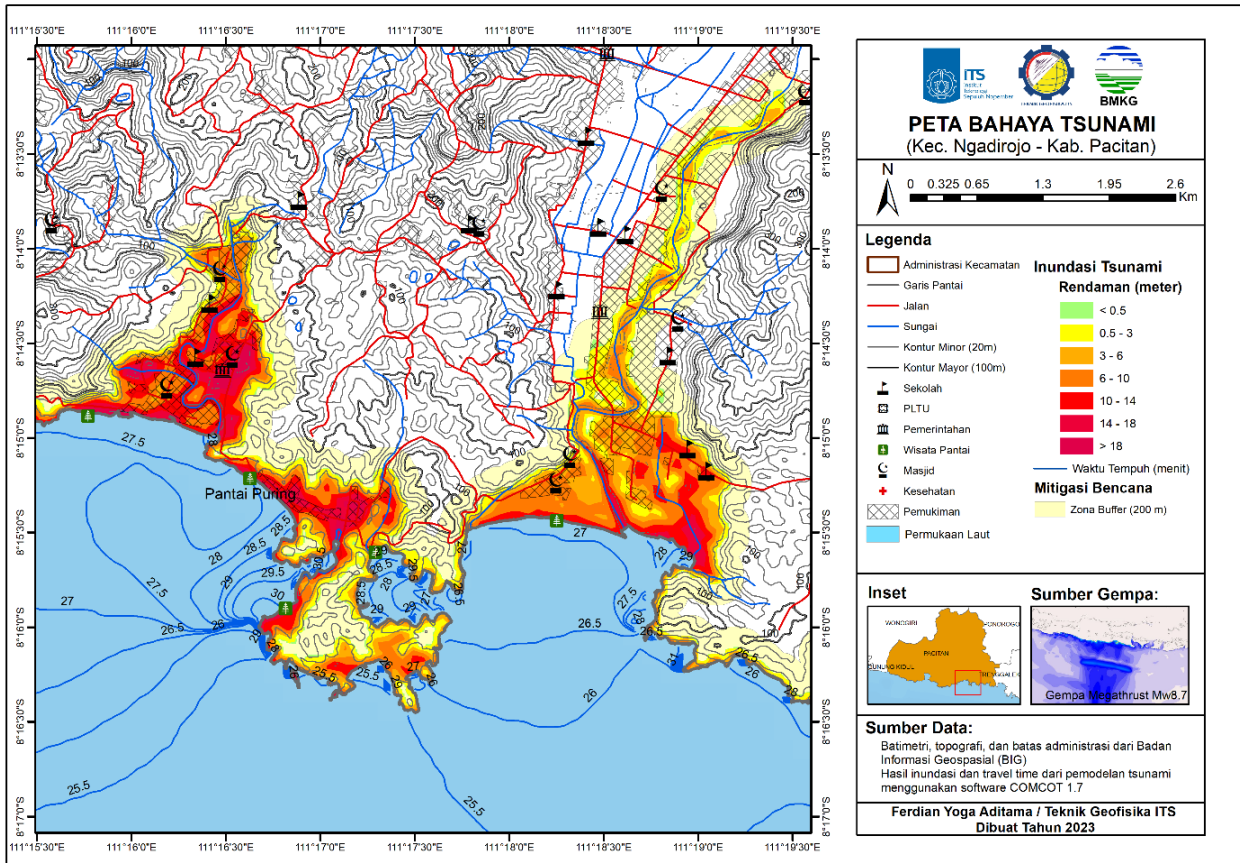
Gambar 10. Model ketinggian tsunami Kecamatan Ngadirojo

Kecamatan Ngadirojo ketinggiannya mencapai 22.71 m dengan waktu tiba 26-28 menit. Kecamatan Ngadirojo memiliki inundasi terjauh 3.98 km mengarah ke utara Pantai Taman Ngadirojo, sedangkan *run-up* sebesar 21.82 m terjadi di Pantai Soge.

Peta Bahaya Tsunami



Gambar 11. Peta bahaya tsunami Kecamatan Pacitan Kabupaten Pacitan



Gambar 12. Peta bahaya tsunami Kecamatan Ngadirojo Kabupaten Pacitan

Hasil pemodelan tsunami selanjutnya dibuat peta bahaya tsunami sebagai bentuk upaya mitigasi bencana. Pada peta bahaya dilakukan klasifikasi kelas rendaman inundasi untuk mengetahui area terdampak dari peta genangan tsunami (Latief, 2013; Wang, 2009).

Berdasarkan perhitungan luasan area terdampak inundasi, total luasan jangkauan tsunami di Kecamatan Pacitan 21.63 km², dimana luas area rendaman 6-10 m sebesar 6.9751 km² merupakan rendaman tsunami terluas di Kecamatan Pacitan.

Zona rendaman tsunami di Kecamatan Ngadirojo berada di area pemukiman. Berdasarkan perhitungan luasan area terdampak inundasi, total luasan jangkauan tsunami di Kecamatan Ngadirojo 7.41 km², dimana luas area rendaman 6-10 m sebesar 1.92 km² merupakan rendaman tsunami terluas di Kecamatan Ngadirojo. Sebagai upaya mitigasi bencana, zona *buffer* berjarak 200 m terluar dari rendaman kurang dari 0.5 m.

PENUTUP

Simpulan dan Saran

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan pemodelan tsunami Pacitan, maka dapat diambil kesimpulan skenario gempa hipotetik *megathrust* segmen Jawa Timur Mw 8.7 menyebabkan terjadinya *vertical displacement* -4.599 m hingga 7.019 m. Propagasi tsunami ke arah utara menuju pesisir Pacitan memiliki amplitudo maksimum 33.16 m dengan waktu tempuh 23 – 29 menit. Jangkauan inundasi terjauh terjadi di Kecamatan Pacitan sejauh 4.19 km ke arah utara Pantai Ranuharjo, sedangkan *run-up* maksimum 21.82 m terjadi di Pantai Soge Kecamatan Ngadirojo. Berdasarkan peta bahaya tsunami, Kecamatan Pacitan memiliki luasan area terdampak inundasi 21.63 km², sedangkan kecamatan Ngadirojo memiliki luasan area terdampak inundasi 7.41 km².

Adapun saran untuk mengembangkan penelitian selanjutnya dilakukan penambahan jumlah *layer grid* pada pemodelan COMCOT untuk menghasilkan penjalaran inundasi dan *run-up* lebih detail dengan resolusi tinggi, pengolahan menggunakan *device* berkapasitas besar untuk

meningkatkan efisiensi proses *running* COMCOT. Diperlukan survei topografi untuk mengisi atau melengkapi data DEMNAS yang kosong.

Ucapan Terima Kasih

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Deputi Informasi Peringatan Tsunami Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika khususnya yang telah memberikan data dan pelatihan pemodelan tsunami COMCOT. Semoga jurnal ilmiah ini dapat menjadi referensi penanganan mitigasi bencana tsunami di daerah penelitian dan bermanfaat bagi masyarakat sekitar.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, K. A., Widodo, A., & Rochman, J. P. G. N. (2020). Rancang Bangun Prototype Instrumen Pendeteksi Dini Tsunami Akibat Gempabumi dengan Memanfaatkan Prinsip Refleksi Gelombang. *Jurnal Geosaintek*, 6(1), 11.
- Ayunda, G., Ismanto, A., Hariyadi, H., Sugianto, D. N., & Helmi, M. (2020). Analisis Penjalaran Run-Up Gelombang Tsunami Menggunakan Pemodelan Numerik 2D di Pesisir Kota Bengkulu. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(3), 253–260.
- Commission, I. O. (2019). *Tsunami glossary. Fourth edition.* (4th ed.). Intergovernmental Oceanographic Commission of the UNESCO.
- Erlangga, W. (2020). Karakteristik Dan Parameter Subduksi Sumber Gempa Pulau Jawa. *Teknisia*, XXV(2), 30–40.
- Julius, A. M., Pribadi, S., & Muzli, M. (2018). Correlation Equation of Fault Size, Moment Magnitude, and Height of Tsunami Case Study: Historical Tsunami Database in Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 132(1).
- Khoiridah, S., Setyonegoro, W., & Anwar, H. (2022). Pemodelan Gempa Bumi Pembangkit Tsunami Di Wilayah Papua (Studi Kasus: Gempa Bumi Biak, 17 Februari 1996). *Jurnal Geosaintek*, 8(3), 290.
- Kongko, W., & Schlurmann, T. (2010). The Java Tsunami Model: Using Highly-Resolved Data To Model the Past Event and To Estimate the Future Hazard. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), 25.
- Latief, H. (2013). Pedoman Teknik Pembuatan Peta Bahaya Rendaman Tsunami. In *Bandung: Pusat*

Penelitian Mitigasi Bencana Institut Teknologi Bandung. Badan Nasional Penanggulangan Bencana Ir.

- Pribadi, S., Afnimar, Puspito, N.T., Ibrahim, G. (2013). Characteristics of Earthquake Indonesia Based on Source Parameter. *J. Math. Fund. Sci*, 45(2), 189–207.
- Pusat Studi Gempa Nasional. (2017). Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017 (Map of Indonesia Earthquake Sources and Hazards in 2017). In *Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan Pemukiman, Badan Penelitian dan Pengembangan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat*.
- Redyansyah, R., Satriadi, A., Saputro, S. (2017). Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami dan Analisa Daerah Jangkauan di Teluk Sumbreg, Trenggalek. *Oceanografi*, 6(1), 295–304.
- Wang, X. (2009). USER MANUAL FOR COMCOT VERSION 1.7 (FIRST DRAFT) by. In *Control* (Vol. 7).
- Wibowo, T. W., Mardiatno, D., & Sunarto, S. (2017). Pemetaan Risiko Tsunami terhadap Bangunan secara Kuantitatif. *Majalah Geografi Indonesia*, 31(2), 68.
- Widianto, A., & Damen, M. (2014). Determination of Coastal Belt in the Disaster Prone Area: A case study in the Coastal area of Bantul Regency, Yogyakarta, Indonesia. *Indonesian Journal of Geography*, 46(2), 125.
- Widiyantoro, S., Gunawan, E., Muhari, A., Rawlinson, N., Mori, J., Hanifa, N. R., Susilo, S., Supendi, P., Shiddiqi, H. A., Nugraha, A. D., & Putra, H. E. (2020). Implications for megathrust earthquakes and tsunamis from seismic gaps south of Java Indonesia. *Scientific Reports*, 10(1), 1–11.