

Observasi *Run-up* Tsunami pada Model Tsunami Berbasis *Single segment* dan *Multi-segment* (Studi Kasus: Peristiwa Tsunami Pangandaran 2006 di Kabupaten Cilacap)

Irfa Destrayanti¹, Benazir², Radiana Triatmadja²

¹ Magister Teknik Pengelolaan Bencana Alam, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gajah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

²Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, INDONESIA

*Corresponding author: benazir@ugm.ac.id

INTISARI

Penelitian ini membandingkan dua skenario pemodelan tsunami, yaitu model sederhana (*single segment*) dan *multi-segment* (16 segmen), berdasarkan validasi terhadap data observasi *run-up* tsunami di pesisir selatan Jawa akibat gempa 17 Juli 2006 khususnya untuk wilayah Kabupaten Cilacap. Pemodelan tsunami menggunakan perangkat lunak COMCOT v1.7 menggunakan empat *layer* untuk meningkatkan ketelitian dalam penjalaran gelombang di pesisir untuk mendapatkan ketinggian tsunami di titik pengukuran yang telah ditentukan. Hasil ketinggian tsunami kemudian divalidasi dilakukan menggunakan perhitungan parameter K (koefisien kesesuaian) dan κ (koefisien penyebaran) berdasarkan metode Aida dengan data observasi dari Lavigne et al. dan Tsuji (2021). Hasil validasi menunjukkan bahwa model *single-segmen* memiliki nilai K sebesar 0.7286 dan κ sebesar 0.3452, yang mengindikasikan bahwa hasil simulasi cenderung lebih rendah dibandingkan data lapangan meskipun model cukup stabil. Sementara itu, model *multi-segmen* menunjukkan nilai K sebesar 0.9514 dan κ sebesar 0.3033, menandakan rata-rata ketinggian pada model ini sangat mirip dengan rata-rata ketinggian hasil observasi. Dengan demikian, model *multi-segment* dinilai lebih representatif dalam menggambarkan sumber gempa yang realistis dan lebih sesuai digunakan untuk keperluan pemetaan bahaya dan perencanaan mitigasi tsunami.

Kata Kunci : pemodelan tsunami, rekonstruksi tsunami, validasi, ketinggian tsunami.

1 PENDAHULUAN

Tsunami merupakan bencana alam paling dahsyat yang dapat menyebabkan kerusakan besar dan korban jiwa dalam jumlah signifikan, terutama di wilayah yang berdekatan dengan zona *megathrust*. Meskipun frekuensinya relatif jarang dibandingkan dengan bencana lainnya, dampak yang ditimbulkan oleh tsunami jauh lebih besar. Dalam dua dekade terakhir, tercatat dua peristiwa tsunami besar yang menimbulkan korban jiwa sangat tinggi dan kerugian ekonomi yang luar biasa, yaitu tsunami Aceh pada tahun 2004 dan tsunami Tohoku, Jepang pada tahun 2011. Kedua peristiwa tersebut menyebabkan ratusan ribu korban jiwa serta kerugian ekonomi yang mencapai ratusan miliar dolar Amerika Serikat (Imamura & Anawat, 2012; Murty et al., 2007). Kedua peristiwa ini menjadi bukti nyata bahwa tsunami dapat menimbulkan bencana multinasional dengan konsekuensi jangka panjang, baik secara sosial, ekonomi, maupun ekologis.

Di Indonesia, salah satu peristiwa tsunami besar lainnya adalah tsunami Pangandaran yang terjadi pada 17 Juli 2006. Gempa bermagnitudo Mw 7,7 terjadi di Samudra Hindia, sekitar 245 km selatan Tasikmalaya pada pukul 15:19 WIB, dengan kedalaman 10 km. Gempa ini dikategorikan sebagai *tsunami earthquake* karena meskipun memiliki magnitudo besar, hanya menimbulkan guncangan lemah di darat namun menghasilkan tsunami yang signifikan yang tiba sekitar 1 jam kemudian (Satake et al., 2017). Di Pangandaran, gelombang pertama diperkirakan tiba pada pukul 16:20 WIB, sebagaimana dibuktikan oleh jam sekolah yang rusak dan berbagai kesaksian warga setempat. Sementara itu, di Cilacap, video dari area PLTU menunjukkan gelombang pertama tiba pada pukul 16:18 WIB, disusul oleh gelombang kedua dan ketiga beberapa menit kemudian. Tsunami tersebut menghantam pesisir selatan Jawa sejauh lebih dari 500 km, merusak wilayah seperti Pangandaran, Cipatujah, dan Nusakambangan. Rata-rata luas rendaman mencapai 236 meter, dengan tinggi *run-up* bervariasi dari 1 hingga 20 meter di beberapa lokasi dan di Pulau Nusakambangan, tercatat tinggi *run-up* mencapai 20 meter dengan kedalaman genangan 8 meter,. Sebanyak 378 orang meninggal dunia, 272 luka-luka, dan puluhan lainnya dinyatakan hilang (BMG, 2006 dalam Hanifa, 2014; BMKG, 2025).

Salah satu cara penting untuk merekonstruksi dan memperkirakan dinamika tsunami berdasarkan parameter sumber gempa, seperti lokasi, mekanisme sesar, besar slip, dan distribusi deformasi dasar laut yaitu dengan pemodelan numerik tsunami menggunakan COMCOT (Wang, 2009). Permasalahan utama dalam studi tsunami adalah adanya kesenjangan antara hasil simulasi numerik dan data lapangan yang diperoleh dari survei pasca tsunami. Terdapat beberapa hal yang dapat memengaruhi hasil tersebut seperti adanya perbedaan kondisi topografi dan penggunaan lahan, selain itu data batimetri yang digunakan sebagai data sekunder memainkan peran yang penting dalam menentukan karakteristik tsunami terutama yang berada di perairan dangkal (Murotani et al., 2015). Oleh karena itu, penting untuk melakukan validasi model dengan data observasi lapangan, seperti tinggi *run-up* atau genangan maksimum, guna memastikan akurasi dan keandalan model tersebut. Salah satu pendekatan yang umum digunakan dalam proses validasi ini adalah metode statistik Aida (1978) yang melibatkan perhitungan nilai K (koefisien kesesuaian) dan k (koefisien penyebaran logaritmik) antara hasil model dan data observasi.

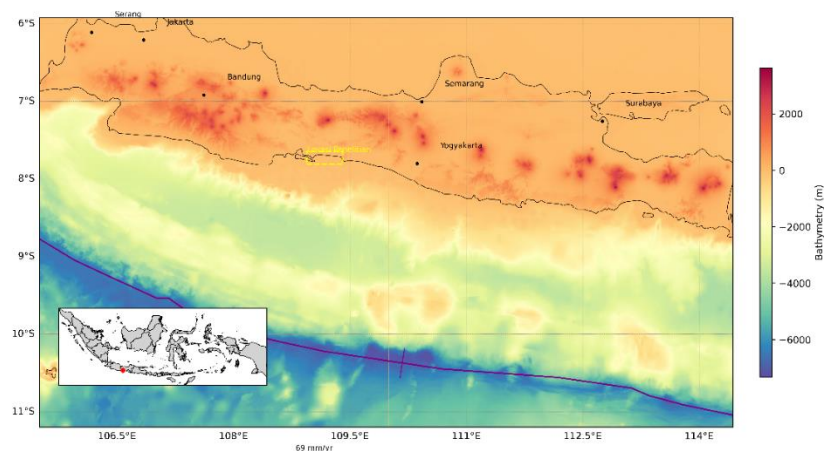
Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi kejadian tsunami Pangandaran 2006 menggunakan dua pendekatan model sumber gempa, yaitu model sederhana (*single segment*) dan *multi-segment*. Pendekatan *single segment* dipilih untuk merepresentasikan skenario sumber gempa yang sederhana dan sering digunakan dalam simulasi awal, sementara pendekatan *multi-segment* digunakan untuk menangkap kompleksitas geometri patahan yang lebih realistis dan dinamis sebagaimana diperkirakan terjadi pada peristiwa nyata. Validasi dilakukan menggunakan pendekatan Aida untuk mengetahui sejauh mana hasil simulasi dapat menggambarkan kondisi nyata. Dengan pendekatan ini, hasil studi diharapkan dapat memberikan gambaran empiris terhadap performa model, serta memperkuat pemahaman terhadap karakteristik tsunami yang terjadi di pesisir selatan Jawa.

2 METODE

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di Kabupaten Cilacap, Provinsi Jawa Tengah, yang merupakan salah satu wilayah dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap bencana tsunami di pesisir selatan Pulau Jawa. Wilayah ini dipilih karena memiliki kombinasi faktor risiko yang kompleks, seperti panjang garis pantai, kepadatan penduduk di wilayah pesisir, serta keberadaan fasilitas vital dan pemukiman yang dekat dengan zona bahaya tsunami.

Kabupaten Cilacap merupakan kabupaten terbesar di Provinsi Jawa Tengah yang terdiri dari 24 Kecamatan dan 284 desa/kelurahan dengan luas wilayah 212.450 hektar (BPS Kabupaten Cilacap, 2023). Jumlah penduduk di Kabupaten Cilacap tahun 2023 sekitar 2.007.829 jiwa, dengan kepadatan penduduk mencapai 893.000 jiwa per kilometer persegi, dengan kepadatan penduduk tertinggi berada di wilayah Kecamatan Cilacap Selatan 10.544 jiwa per kilometer persegi (BPS, 2024). Dari 284 desa yang ada, sebanyak 55 desa di wilayah pesisir selatan berpotensi terdampak tsunami. Desa-desa tersebut tersebar di 10 kecamatan, yaitu Nusawungu, Binangun, Adipala, Kesugihan, Cilacap Utara, Cilacap Selatan, Cilacap Tengah, Tritih Komara, Maos, dan Kampung Laut (Republika, 2019).



Gambar 2-1 Lokasi Penelitian

2.2 Data Geometrik Model Elevasi Digital

2.2.1 Data Topografi

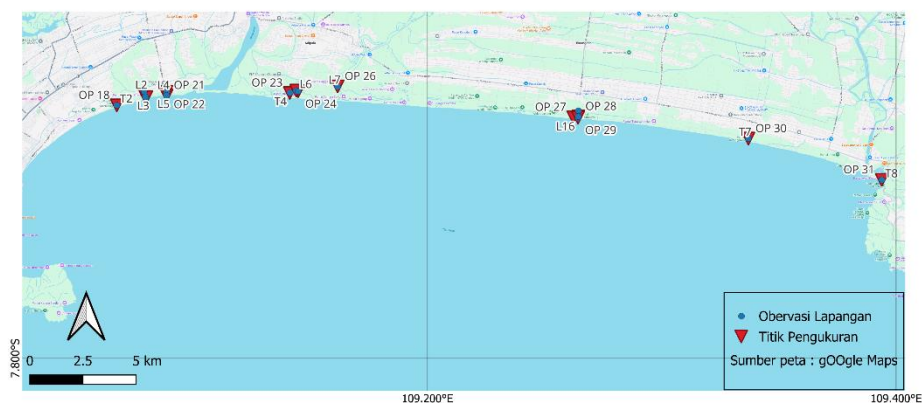
Data *Digital Elevation Model (DEM)* digunakan untuk merepresentasikan elevasi permukaan daratan terhadap permukaan laut. DEM disimpan dalam format raster, di mana setiap piksel mengandung informasi nilai elevasi pada lokasi tertentu. Sumber data DEM dapat diperoleh dari berbagai teknologi penginderaan jauh, seperti citra satelit optik, foto udara, maupun sensor aktif seperti LiDAR, yang masing-masing memiliki tingkat akurasi dan resolusi yang bervariasi. LiDAR (Light Detection and Ranging) merupakan salah satu metode akuisisi DEM dengan tingkat akurasi dan resolusi spasial yang tinggi, dan telah menjadi standar dalam pemetaan topografi presisi tinggi (Liu et al., 2008). Dalam penelitian ini, data topografi diperoleh dari hasil survei LiDAR yang dilakukan oleh BPPT pada tahun 2006, dengan resolusi spasial 5 meter. Data ini digunakan secara khusus pada domain pesisir (layer 4) untuk meningkatkan akurasi model run-up tsunami dan estimasi genangan.

2.2.2 Data Batimetri

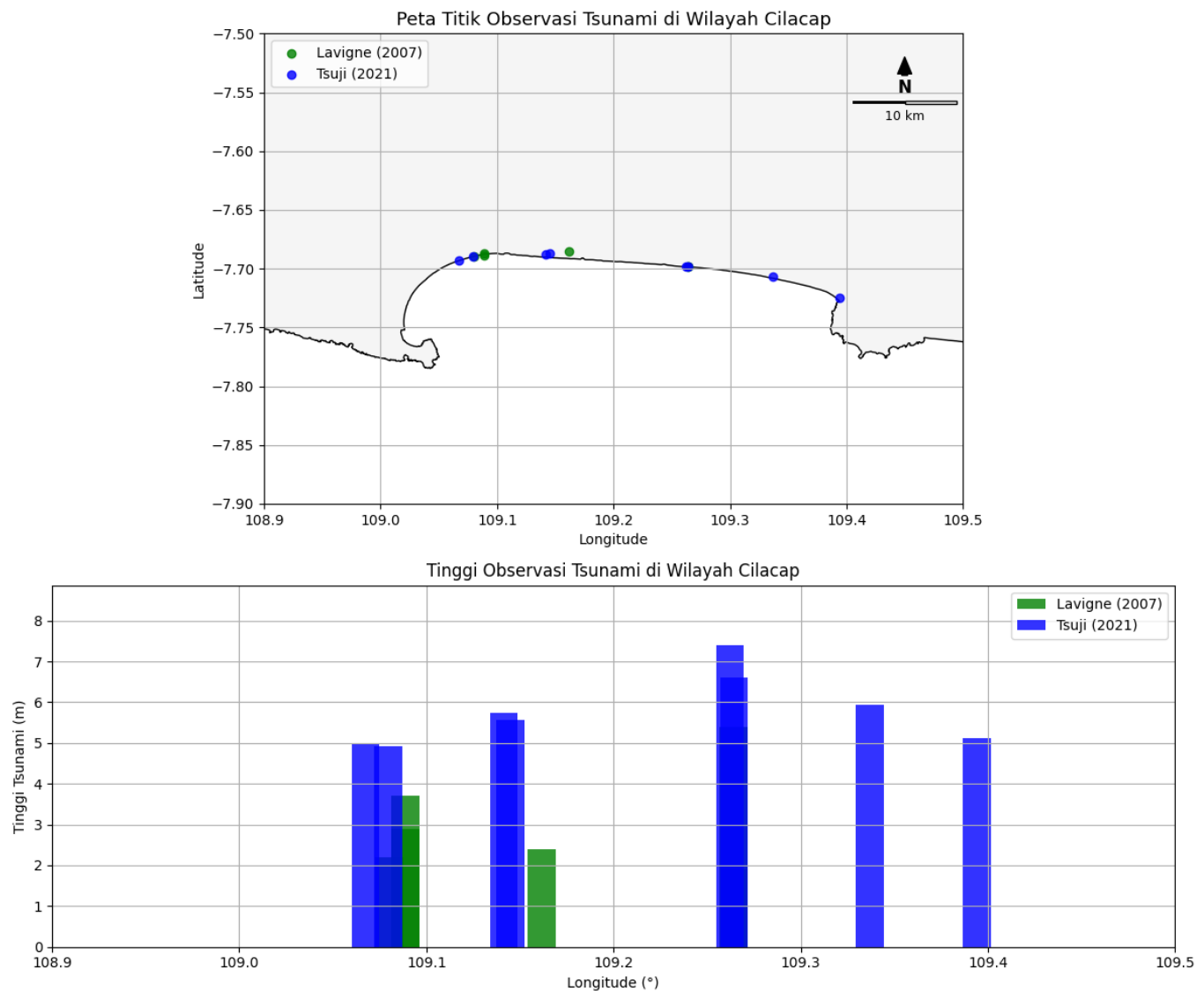
Data batimetri menggambarkan kedalaman dan morfologi dasar laut, yang esensial dalam pemodelan dinamika gelombang tsunami di perairan terbuka hingga mendekati pesisir. Penelitian ini menggunakan data Batimetri Nasional (BATNAS) yang disediakan oleh Badan Informasi Geospasial (BIG). BATNAS merupakan data spasial batimetri nasional dengan resolusi spasial sebesar 6 arcsecond (sekitar 180 meter), yang dapat diakses secara terbuka melalui laman <https://sibatnas.big.go.id>. Data BATNAS digunakan untuk seluruh domain luar (layer 1 hingga 3) dalam sistem nested grid. Meskipun resolusinya lebih rendah dibandingkan data LiDAR, data ini memadai untuk mensimulasikan propagasi gelombang tsunami di wilayah laut lepas hingga landas kontinen.

2.2.3 Titik Pengukuran

Pengamatan tinggi tsunami di daratan berdasarkan hasil pemodelan dilakukan di beberapa lokasi di Kabupaten Cilacap dengan 14 titik pengukuran, yang disimbolkan dengan segitiga merah pada Gambar 2-2. Pemilihan titik pengukuran dalam penelitian ini didasarkan pada lokasi-lokasi observasi lapangan telah dilakukan oleh Lavigne et al., (2007) dan Tsuji et al., (2021) pada peristiwa Tsunami Pangandaran 2006 yang digambarkan dengan titik biru pada Gambar 2-2. Fokus analisis dalam penelitian ini diarahkan secara khusus pada wilayah pesisir Kabupaten Cilacap. Gambar 2-3 menunjukkan hasil perbandingan ketinggian tsunami berdasarkan data dari Tsuji (2021) yang ditunjukkan dengan grafik berwarna biru secara konsisten menunjukkan ketinggian tsunami yang lebih tinggi dibandingkan dengan Lavigne (2007) yang ditunjukkan pada grafik berwarna hijau pada lokasi-lokasi yang berdekatan. Puncak ketinggian tsunami yang tercatat oleh Tsuji (2022) mencapai lebih dari 7 meter, khususnya di sekitar 109.28° Bujur, serta nilai-nilai signifikan lainnya berkisar antara 5 hingga 6 meter di beberapa titik sepanjang pantai. Sebagai perbandingan, ketinggian tsunami maksimum yang dilaporkan oleh Lavigne (2007) pada grafik ini adalah sekitar 5 meter.



Gambar 2-2. Titik Pengukuran



Gambar 2-3. Ketinggian *run-up* maksimum tsunami berdasarkan survei lapangan oleh Lavigne (2007) dan Tsuji (2021)

2.3 Pemodelan Tsunami

Pemodelan tsunami pada penelitian ini menggunakan model tsunami COMCOT (*Cornel Multigrid Coupled Tsunami*) dengan versi 1.7 yang dikembangkan oleh Wang (2009), pemodelan ini digunakan untuk memodelkan pembangkitan dan penjalaran gelombang tsunami, *run-up* tsunami, dan genangan tsunami. Pada wilayah pemodelan di perairan, COMCOT menggunakan persamaan air dangkal linear dalam koordinat *Spherical* untuk mengurangi kompleksitas dan meningkatkan efisiensi komputasi karena pendekatan yang lebih sederhana masih mampu merepresentasikan dinamika gelombang tsunami secara memadai. Namun, seiring dengan perambatan tsunami menuju wilayah landas kontinen dan pesisir, ketidaklinieran mulai menjadi signifikan akibat perubahan kedalaman dan interaksi dengan topografi dasar laut. Oleh karena itu, pada wilayah tersebut, penggunaan persamaan air dangkal non-linear menjadi lebih relevan untuk menggambarkan fenomena secara lebih akurat. Persamaan air dangkal nonlinier, yang mencakup pengaruh gesekan dasar, cukup memadai untuk menggambarkan gerakan aliran di zona pesisir (Wang, 2009).

Studi ini menerapkan pendekatan *nested grid* dengan empat tingkat domain spasial, yang secara bertahap meningkatkan resolusi dari cakupan regional menuju wilayah pesisir. Sumber data topografi dan batimetri yang digunakan meliputi BATNAS dan LiDAR, yang diproses untuk memenuhi kebutuhan input model COMCOT pada setiap layer. Setiap domain dirancang dengan konfigurasi spasial dan numerik yang berbeda, sebagaimana dirinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Domain *Layer*

Domain	Layer 1	Layer 2	Layer 3	Layer 4
Bujur (°BT)	105.497- 114.481	107.504 - 111.571	108.181 - 110.765	108.942- 109.408
Lintang (°LS)	5.871- 11.0126	6.117 - 9.067	7.250 - 8.332	7.644 - 7.802
Jumlah Grid	1079 x 618	1465 x 1063	2792 x 1169	1511 x 516
Ukuran Grid (m)	926.6666667	308.8888889	102.962963	34.32098765
Rasio Grid (arcmin)	0.5	3	3	3
Time Step (s)	1	1	1	1
Tipe SWE	Linier	Linier	Linier	Non-Linier
Sumber Data	Batnas	Batnas	Batnas	DSM (LiDAR)

Skenario gempabumi yang digunakan merupakan parameter dari kejadian tsunami Pangdaran 2006 berdasarkan penelitian (Kongko & Schlurmann, 2011), penelitian yang menggunakan banyak skenario sumber gempa untuk memvalidasi sumber kejadian tsunami dan untuk memberikan rekomendasi langkah selanjutnya untuk mengetahui potensi tsunami masa depan dapat terjadi. Dan pada penelitian ini digunakan 2 skenario dari penelitian tersebut yaitu skenario dengan single segmen seperti pada tabel 2 dan multi segmen dengan M7.8 seperti pada tabel 3 dibawah ini.

Tabel 2. Parameter gempabumi *single-segmen*

No	Segmen Subduksi	Mw	P (km)	L (km)	Epic		D (km)	Dis (m)	Strike (°)	Dip (°)	Rake/Slip (°)
					Long (°)	Lat (°)					
1	Jabar	7.8	200	80	-9.4	107.99	10	3.95	289	10	90

Tabel 3. Parameter gempabumi *multi-segmen*

No	Long (deg)	Lat (deg)	width (km)	Length (km)	Depth (km)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Slip (m)
1	107.431	-9.242	6	6	10				13.5
2	107.398	-9.239	13	13	10				11.5
3	107.396	-9.244	19	19	10				9.5
4	107.403	-9.262	24	24	10				7.5
5	107.406	-9.264	28.5	28.5	10				5.5
6	107.416	-9.267	33	33	10				3.5
7	107.845	-9.276	1.9	1.9	8				11.5
8	107.897	-9.409	1.9	1.9	8				9.5
9	108.394	-9.633	4.1	4.1	8	289	10	95	11.5
10	108.598	-9.757	12.2	12.2	8				9.5
11	108.294	-9.542	17.5	45	8				9.5
12	108.24	-9.572	13	13	8				9.5
13	108.221	-9.587	45	100	8				7.5
14	108.184	-9.542	60	125	8				5.5
15	109.101	-9.727	9	9	8				5.5
16	108.317	-9.578	75	135	8				3.5

2.4 Metode Validasi Model

Setelah diperoleh data *run-up* yang diukur berdasarkan ketinggian pada titik-titik pengamatan (seperti ditunjukkan pada gambar 2-2), dilakukan proses validasi terhadap hasil pemodelan tsunami menggunakan metode Aida (1978) dengan mengacu pada nilai **K** dan **κ**. Nilai **K** merupakan rasio antara tinggi maksimum tsunami hasil survei pengukuran lapangan dan hasil simulasi, sedangkan **κ** menunjukkan nilai simpangan baku (standar deviasi) dari perbandingan tersebut. untuk menilai kinerja model terhadap data observasi, Nilai K yang ideal adalah 1, mengindikasikan bahwa rata-rata ketinggian simulasi sesuai dengan rata-rata observasi, sementara nilai **κ** yang ideal

adalah 0, menunjukkan penyebaran yang minimal antara simulasi dan observasi. Apabila nilai K lebih besar dari satu, maka hal ini menunjukkan bahwa tinggi tsunami hasil observasi lebih besar dibandingkan dengan hasil simulasi. Sebaliknya, semakin kecil nilai κ , maka model dianggap semakin baik karena menunjukkan tingkat sebaran data yang lebih kecil terhadap nilai rata-rata.

$$\log K = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log K_i$$

Dimana : n adalah jumlah titik lokasi dari lokasi survei, $K_i = \frac{R_i}{H_i}$; R_i adalah ketinggian tsunami dari survey lapangan di lokasi i ; dan H_i adalah ketinggian tsunami dari hasil simulasi di lokasi i .

$$\log \kappa = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\log K_i)^2 - (\log K)^2 \right]^{1/2}$$

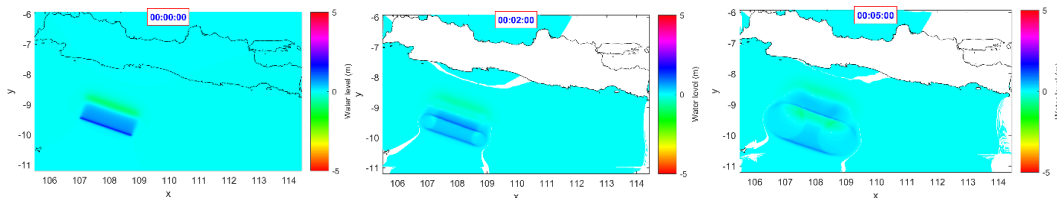
Rentang nilai K dan simpangan baku κ untuk mengevaluasi penerapan model simulasi tsunami telah banyak digunakan, salah satu nilai yang bisa digunakan sebagai pedoman adalah Japan Society of Civil Engineering (JSCE) merekomendasikan rentang nilai $0,95 < K < 1,05$ dan $\kappa < 1,45$ (Muhari et al., 2012) dan berdasarkan Shuto (1991) $0,8 < K < 1,2$ dan $\kappa < 1,45$.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

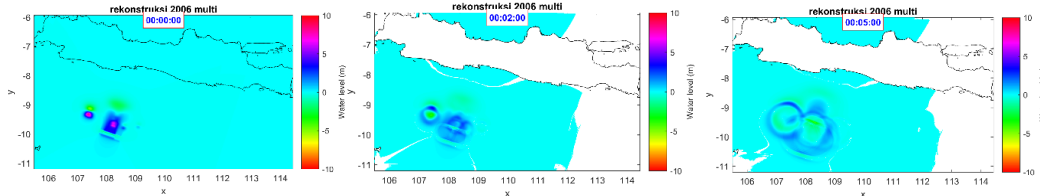
3.1 Pemodelan Tsunami

3.1.1 Penjalaran Gelombang

Kondisi awal (*initial condition*) adalah keadaan pada saat terjadinya pengangkatan atau penurunan dasar laut yang disebabkan oleh pergeseran patahan (naik atau turun). Kondisi awal pembentukan tsunami dari kedua skenario yang ditunjukkan pada gambar 3.1 dan 3.2 menggambarkan dimana ketinggian gelombang positif (+) digambarkan dengan warna biru yang berarti terjadi kenaikan muka air laut, sedangkan ketinggian gelombang negatif (-) digambarkan dengan warna hijau yang berarti terjadi penurunan muka air laut dengan variasi elevasi gelombang yang beragam.



Gambar 3-1. Kondisi Awal Penjalaran Gelombang Skenario *Single-segmen*



Gambar 3-2 Kondisi Awal Penjalaran Gelombang Skenario *Multi-segmen*

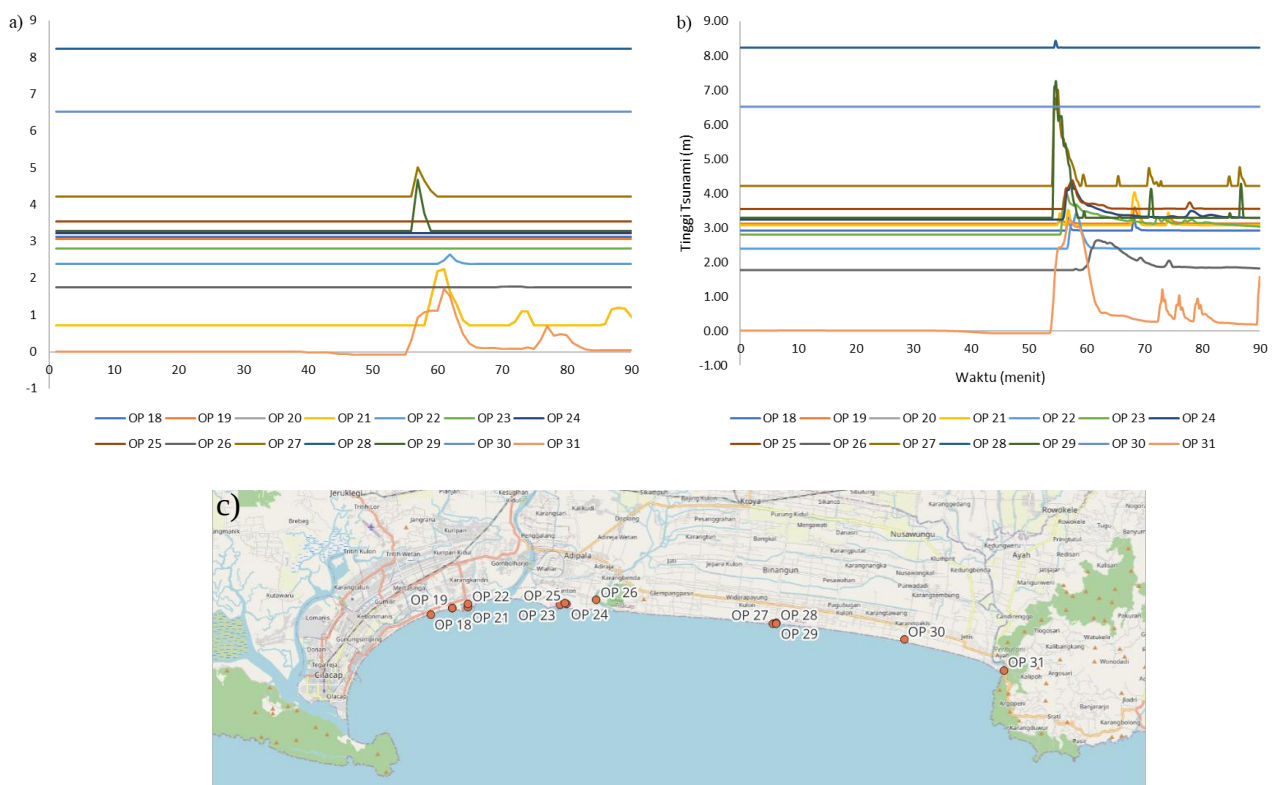
3.2 Run-up Tsunami

Salah satu hasil dari pemodelan ini adalah marigram, sebuah grafik yang merekam perubahan muka air terhadap waktu pada lokasi spesifik. Marigram tidak hanya memberikan gambaran tentang ketinggian gelombang tsunami tetapi juga waktu tiba dan bentuk gelombang yang terjadi, yang dapat digunakan untuk penilaian risiko dan mitigasi bencana. Hasil yang disajikan di pada penelitian menggunakan dua grafik marigram dari rekonstruksi tsunami 2006, dengan pendekatan *single segment* dan *multi-segment*. Pada marigram *single segment* (gambar 3-3a) terlihat bahwa meskipun ada lonjakan muka air yang signifikan sekitar menit ke-55, mencapai sekitar 5 meter, respons setelahnya

cenderung lebih seragam di antara titik-titik pengukuran yang aktif, dengan banyak garis yang tetap datar, menyiratkan asumsi karakteristik yang seragam di seluruh area yang diukur. Sebaliknya, marigram *multi-segment* pada gambar 3-3b menampilkan fluktuasi muka air yang jauh lebih kompleks dan dinamis, ditandai dengan beberapa puncak tajam dan penurunan cepat, terutama antara menit ke-55 hingga ke-60, di mana beberapa titik menunjukkan lonjakan drastis hingga lebih dari 7 meter.

Dari hasil marigram pemodelan tsunami yang ditampilkan pada grafik tersebut, tampak bahwa pada menit-menit awal (sebelum tsunami tiba), nilai ketinggian pada tiap titik pengamatan sudah menunjukkan angka tertentu di atas nol. Hal ini menandakan bahwa nilai yang tertera bukanlah ketinggian muka air absolut (*tsunami height*), melainkan ketinggian relatif terhadap permukaan topografi lokal. Sehingga data yang hanya berupa garis lurus saja, yang menandakan bahwa tsunami tidak sampai di lokasi tersebut atau ketinggian tsunami sama dengan topografinya atau lebih rendah dari topografi setempat sehingga tsunami tidak tercatat (Zhang, et al., 2020).

Berdasarkan pemodelan 2 skenario tersebut, model *single segment* mungkin memberikan tren umum atau rata-rata, model *multi-segment* memberikan gambaran yang memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario *single segment* karena memiliki slip dan area yang lebih besar sehingga akan mempengaruhi ketinggian tsunami (Li, et al., 2020). Perbedaan hasil penelitian pada skenario *single segment* dan *multi-segment* kemungkinan disebabkan oleh adanya perbedaan segmentasi *megathrust* yang digunakan dan nilai *slip* yang berbeda, namun secara keseluruhan pola ketinggian tsunami di pada kedua skenario ini memiliki pola yang sama (Widiyantoro et al., 2020).



Gambar 3-3 Hasil marigram di titik pengukuran dari pemodelan tsunami pada skenario 1 (a) dan skenario 2 (b). Titik pengukuran (c)

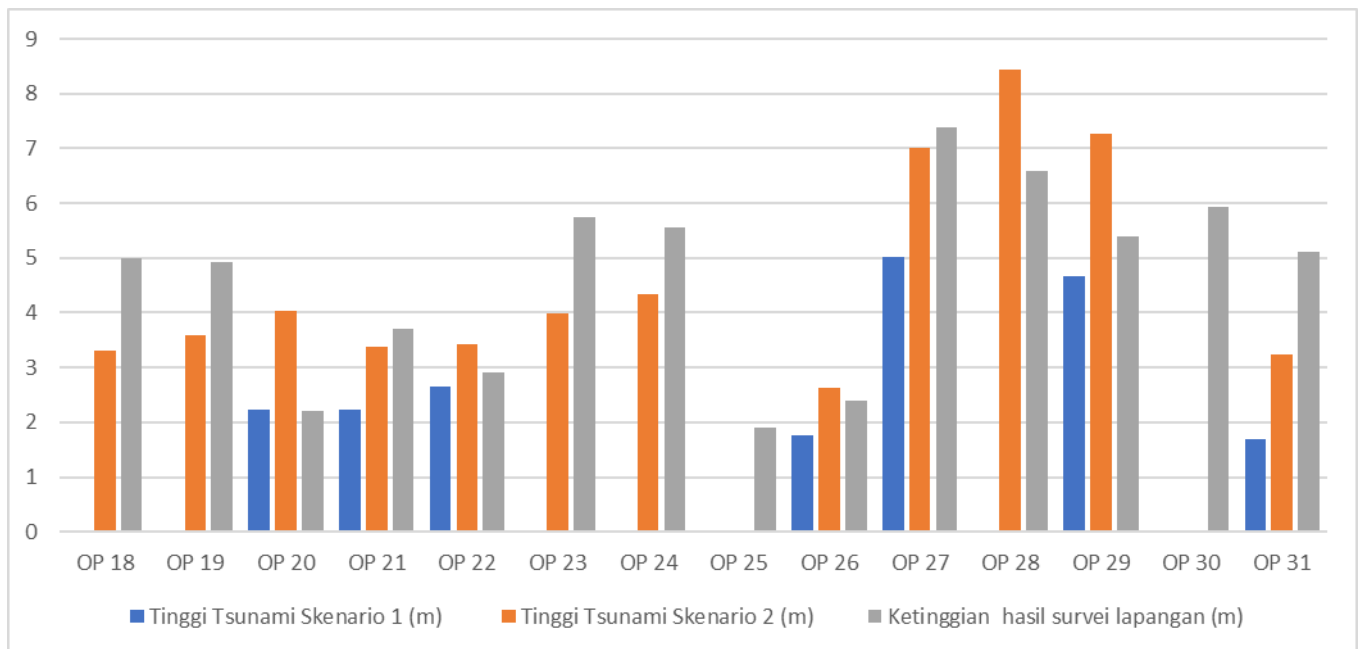
3.3 Validasi

Proses validasi dan verifikasi sangat penting dalam upaya peningkatan akurasi pemodelan numerik tsunami, namun, proses validasi jarang dapat dilakukan karena terbatasnya kejadian tsunami yang pernah terjadi dan terbatasnya data pengamatan yang didapatkan di lapangan. Selain itu, banyaknya ketidakpastian dari berbagai faktor seperti sumber tsunami, data batimetri dan topografi pesisir menjadi hambatan dalam pengembangan metode numerik tsunami yang lebih baik. Proses validasi akibat bencana tsunami dapat menggunakan beberapa data pengukuran tsunami yang berasal dari saksi mata, rekaman video atau CCTV, dan kegiatan observasi lapangan yang dilakukan oleh tenaga ahli,

serta data tersebut dapat digunakan untuk menganalisis proses penjalaran gelombang dan dampak yang diakibatkan oleh genangan (Sugawara, 2021).

Dari perbandingan ketinggian tsunami berdasarkan obeservasi lapangan dan pemodelan rekonstruksi tsunami dengan 2 skenario tersebut, didapatkan grafik seperti pada Gambar 3-6. Pada Gambar 3-6, grafik abu-abu yang menandakan ketinggian tsunami berdasarkan observasi lapangan memiliki ketinggian minimal di 2.2 m dan ketinggian puncak 7.4 m, data observasi ini yang akan digunakan sebagai data validasi pemodelan tsunami. Untuk grafik berwarna biru, yang merupakan hasil dari pemodelan tsunami dengan *single segment* (skenario 1). Menunjukkan nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan data observasi lapangan dan *multi-segment* (skenario 2) di sebagian besar titik. Sedangkan untuk grafik berwarna oranye yang merupakan hasil pemodelan tsunami dengan *multi-segment* menunjukkan pola fluktuasi yang mirip dengan observasi lapangan dan lebih mendekati nilai observasi dibandingkan dengan *single segment*. Terlihat bahwa *multi-segment* memberikan prediksi yang lebih baik dan lebih mendekati data observasi lapangan dibandingkan dengan *single segment* di sebagian besar titik, di OP 25 hasil pemodelan pada kedua skenario memberikan hasil yang jauh lebih tinggi daripada hasil observasi lapangan.

Berdasarkan Gambar 3-4, terlihat bahwa tidak semua titik pengamatan mencatat nilai tinggi tsunami pada skenario 1 maupun skenario 2. Hal ini disebabkan oleh elevasi topografi di beberapa lokasi titik observasi (TES) yang lebih tinggi dibandingkan dengan ketinggian gelombang tsunami hasil simulasi. Dengan demikian, pada titik-titik tersebut, gelombang tsunami tidak mencapai lokasi pengamatan sehingga tidak tercatat nilai run-up atau flow depth, dan dianggap tidak relevan untuk validasi kuantitatif.



Gambar 3-4 Perbandingan ketinggian tsunami dari hasil survei lapangan dan pemodelan tsunami

Untuk melakukan validasi berdasarkan grafik tersebut, digunakan validasi yang mengacu pada pendekatan statistik Aida (1978) melalui dua parameter utama, yaitu nilai K (Koefisien Kesesuaian) dan κ (Koefisien Penyebaran Logaritmik). Validasi dilakukan dengan membandingkan tinggi *run-up* hasil simulasi dengan hasil pengukuran lapangan pada 14 titik observasi yang tersebar di wilayah pesisir selatan Kabupaten Cilacap. Untuk proses validasi, tidak seluruh titik pengamatan (14 titik) digunakan. Beberapa titik tidak mencatat adanya gelombang tsunami berdasarkan hasil simulasi, yang disebabkan oleh elevasi topografi di lokasi tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang tsunami. Oleh karena itu, titik-titik tersebut dianggap tidak memiliki nilai run-up yang dapat dibandingkan dengan data observasi. Dalam skenario *single segment*, digunakan 7 titik pengukuran yang memenuhi kriteria, sedangkan pada skenario *multi-segment* digunakan 13 titik pengukuran. Dalam analisis validasi model tsunami, hanya titik-titik yang memiliki data observasi lapangan yang digunakan dalam perhitungan. Penggunaan data yang tidak tercatat dapat menimbulkan kesalahan interpretasi, terutama jika dianggap sebagai nol atau estimasi, sehingga dapat memperbesar bias dan mengurangi reliabilitas evaluasi model. Oleh karena itu, titik tanpa data dihindari dalam analisis statistik untuk menjaga akurasi dan kredibilitas hasil validasi.

Hasil perhitungan pada *single segment* menunjukkan bahwa nilai K sebesar 0.7286, yang mengindikasikan bahwa secara rata-rata, ketinggian pada skenario *single segment* lebih rendah (*underestimate*) dibandingkan dengan hasil observasi lapangan. Sementara itu, nilai κ sebesar 0.3452 yang menunjukkan tingkat penyebaran yang moderat, nilai yang lebih tinggi ini mengimplikasikan adanya variabilitas yang cukup besar dalam rasio ketinggian simulasi dibandingkan dengan hasil observasi. Untuk perhitungan *multi-segment*, nilai K sebesar 0.9514 yang mengindikasikan bahwa secara rata-rata skenario 2 memiliki kesesuaian yang sangat baik dengan ketinggian tsunami hasil observasi di lapangan karena memiliki rata-rata ketinggian pada skenario *multi-segment* sangat mirip dengan rata-rata ketinggian dari hasil observasi. Sedangkan untuk nilai κ didapatkan 0.3033 yang menunjukkan tingkat penyebaran yang lebih rendah dibandingkan dengan *single segment*.

Dari kedua hasil tersebut, nilai K skenario *multi-segment* memiliki nilai yang sesuai dengan range nilai penelitian Muhari et.al (2012) dan Shuto (1991) dibandingkan dengan nilai K pada skenario *single segment*. Sedangkan untuk nilai κ yang lebih kecil menunjukkan akurasi yang lebih baik dan lebih stabil dalam memprediksi ketinggian tsunami di berbagai lokasi seperti pada skenario *multi-segment*. Dengan demikian, berdasarkan parameter evaluasi ini, skenario *multi-segment* memberikan hasil simulasi yang lebih akurat dan dapat diterima menurut standar JSCE yang berlaku.

Hasil pemodelan ketinggian tsunami menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara pendekatan sumber gempa *single-segment* dan *multi-segment*, serta dibandingkan dengan data observasi lapangan. Ketidaksesuaian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor lokal yang tidak sepenuhnya tercakup dalam pemodelan numerik. Topografi pesisir, bentuk garis pantai, kondisi batimetri dangkal, serta keberadaan vegetasi pantai, pemecah gelombang, dan bangunan infrastruktur dapat mengubah karakteristik gelombang secara signifikan sebelum mencapai daratan (Ohira et al., 2012). Selain itu, keterbatasan resolusi spasial data input terutama pada grid batimetri dan topografi membatasi akurasi simulasi. Asumsi terkait sumber gempa juga berkontribusi terhadap perbedaan hasil simulasi. Ketepatan lokasi episenter, kedalaman patahan, serta besarnya slip dan luas area rupture sangat menentukan deformasi dasar laut yang dihasilkan. Ketidaktepatan dalam penentuan parameter ini dapat menghasilkan ketidaksesuaian yang cukup besar antara simulasi dan kenyataan di lapangan (Satake, 2014). Oleh karena itu, validasi model dengan data observasi lapangan tetap menjadi langkah penting dalam memastikan akurasi simulasi dan keandalan hasilnya untuk digunakan dalam analisis risiko tsunami.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis validasi menggunakan parameter K dan κ berdasarkan metode Aida, dapat disimpulkan bahwa simulasi *multi-segment* secara signifikan lebih akurat dan lebih representatif dalam memprediksi ketinggian tsunami dibandingkan *single segment*. Dengan nilai K dan nilai κ pada skenario *multi-segment*, menunjukkan kesesuaian yang baik dengan data observasi. Nilai K berada dalam kisaran yang direkomendasikan oleh JSCE ($0.95 < K < 1.05$) maupun Shuto ($0.8 < K < 1.2$), sedangkan nilai κ yang jauh di bawah batas maksimum 1.45 menunjukkan tingkat penyebaran yang rendah dan konsistensi hasil simulasi yang tinggi. Perbedaan hasil antara skenario *single segment* dan *multi-segment* mengindikasikan pentingnya pemilihan parameter sumber gempa dalam model simulasi tsunami. Penggunaan konfigurasi *multi-segment* terbukti lebih efektif dalam mereplikasi kompleksitas propagasi gelombang tsunami serta interaksinya dengan topografi pesisir dibandingkan dengan pendekatan *single segment*. Oleh karena itu, pada penelitian selanjutnya, kalibrasi model dengan data observasi lapangan serta peningkatan kualitas data masukan menjadi langkah krusial untuk menghasilkan model tsunami yang lebih akurat dan andal dalam mendukung upaya mitigasi bencana dan perencanaan wilayah pesisir.

REFERENSI

- Aida. (1978). Source model from parameters. *J. Phys. Earth*, 57–73.
- BPS. (2024). *Data Strategis Kabupaten Cilacap*.
- BPS Kabupaten Cilacap. (2023). Kabupaten Cilacap dalam Angka 2023. In *BPS Kabupaten Cilacap*.
- Imamura, F., & Anawat, S. (2012). Damage due to the 2011 Tohoku earthquake tsunami and its lessons for future mitigation. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Lessons Learned from the 2011 Great East Japan Earthquake*, July, 21–30. <http://www.gsi.go.jp/common/000060133.pdf>
- Kongko, W., & Schlurmann, T. (2011). the Java Tsunami Model: Using Highly-Resolved Data To Model the Past Event and To Estimate the Future Hazard. *Coastal Engineering Proceedings*, 32, 25. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.management.25>
- Lavigne, F., Gomez, C., Giffo, M., Wassmer, P., Hoebreck, C., Mardiatno, D., Priyono, J., & Paris, R. (2007). Field

- observations of the 17 July 2006 Tsunami in Java. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1), 177–183. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-177-2007>
- Murotani, S., Iwai, M., Satake, K., Shevchenko, G., & Loskutov, A. (2015). Tsunami Forerunner of the 2011 Tohoku Earthquake Observed in the Sea of Japan. *Pure and Applied Geophysics*, 172(3–4), 683–697. <https://doi.org/10.1007/s00024-014-1006-5>
- Murty, T. S., Aswathanarayana, U., & Nirupama, N. (2007). *The Indian Ocean Tsunami*.
- Ohira, W., Honda, K., & Harada, K. (2012). Reduction of tsunami inundation by coastal forests in Yogyakarta, Indonesia: A numerical study. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(1), 85–95. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-85-2012>
- Tsuji, Y., Fachrizal, H. S., & Indra, G. (2021). July 17, 2006 Tsunami survey results due to the earthquake off the southwest coast of Java Island. *Research Report of Tsunami Engineering*, 38, 45–68.
- 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. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72142-z>

No.	Komentar Reviewer	Tanggapan Penulis/Revisi pada Naskah
1	apakah ini nama metode? kalau bukan tuliskan nama metode yang benar	Hasil ketinggian tsunami kemudian divalidasi dilakukan menggunakan perhitungan parameter K (koefisien kesesuaian) dan κ (koefisien penyebaran) berdasarkan metode Aida
2	di perairan dangkal termasuk kekasaran dasar laut	Permasalahan utama dalam studi tsunami adalah adanya kesenjangan antara hasil simulasi numerik dan data lapangan yang diperoleh dari survei pasca tsunami. Terdapat beberapa hal yang dapat memengaruhi hasil tersebut seperti adanya perbedaan kondisi topografi dan penggunaan lahan, selain itu data batimetri yang digunakan sebagai data sekunder memainkan peran yang penting dalam menentukan karakteristik tsunami terutama yang berada di perairan dangkal
3	"k" atau simbol "kappa"?	simbol kappa (κ)
4	berikan latar belakang penggunaan pendekatan ini diawali penjelasan dari masing-masing pendekatan	Pendekatan <i>single segment</i> dipilih untuk merepresentasikan skenario sumber gempa yang sederhana dan sering digunakan dalam simulasi awal, sementara pendekatan <i>multi-segment</i> digunakan untuk menangkap kompleksitas geometri patahan yang lebih realistis dan dinamis sebagaimana diperkirakan terjadi pada peristiwa nyata.
5	Dari 284 desa yang ada, sebanyak 55 desa di wilayah pesisir selatan yang berpotensi terdampak tsunami yang tersebar di 10 wilayah kecamatan, yaitu Nusawungu, Binangun, Adipala, Kesugihan, Cilacap Utara, Cilacap Selatan dan Cilacap Tengah, Tri Komara, Maos, dan Kampung Laut (Republika, 2019).	Dari 284 desa yang ada, sebanyak 55 desa di wilayah pesisir selatan berpotensi terdampak tsunami. Desa-desanya tersebut tersebar di 10 kecamatan, yaitu Nusawungu, Binangun, Adipala, Kesugihan, Cilacap Utara, Cilacap Selatan, Cilacap Tengah, Tritih Komara, Maos, dan Kampung Laut (Republika, 2019).
6	apakah ini berbicara metode atau sumber data?	metode yang digunakan untuk memperoleh data topografi
7	pada penelitian menggunakan data Lidar yang berasal dari penelitian yang dilakukan oleh BPPT tahun 2006 lalu dengan resolusi 5 meter.	Dalam penelitian ini, data topografi diperoleh dari hasil survei LiDAR yang dilakukan oleh BPPT pada tahun 2006, dengan resolusi spasial 5 meter. Data ini digunakan secara khusus pada domain pesisir (layer 4) untuk meningkatkan akurasi model run-up tsunami dan estimasi genangan.
8	kenapa pemilihan titik pengukuran dilakukan dengan membandingkan tinggi tsunami? Bagaimana maksudnya? bukankah seharusnya perbandingan tinggi tsunami bisa dilakukan setelah menentukan titik pengukuran	Dalam penelitian ini, titik pengukuran dipilih berdasarkan lokasi observasi lapangan yang telah terdokumentasi sebelumnya oleh Lavigne et al. (2007) dan Tsuji et al. (2021). Pemilihan ini dimaksudkan untuk memfasilitasi proses validasi hasil pemodelan numerik dengan data observasi nyata dari peristiwa tsunami Pangandaran 2006. Dengan menggunakan titik yang sama, perbandingan ketinggian tsunami antara hasil simulasi dan observasi lapangan dapat dilakukan secara lebih konsisten dan akurat.

9	pada tanggal berapa dan kapan waktunya, jam berapa dan berapa jarak waktunya dari gempa	sudah di tambahkan data persitiwa tsunamipangandaran pada pendahuluan
10	kenapa pada lokasi penelitian hanya fokus pada Kabupaten Cilacap? Lantas kalau pengukuran dilakukan hanya di Cilacap, kenapa wilayah lain disebutkan sebagai cakupan penelitian ini?	pemodelan yang dilakukan di wilayah cilacap saja, dan untuk lokasi lain sudah tidak diikutsertakan dalam naskah
11	Tampak perbedaan beberapa titik pengukuran dari penelitian terdahulu antara gambar 2-2 dan 2-3. Mohon dipastikan lagi.	gambar sudah diperbaiki
12	efek non-linear tidak signifikan pada laut dalam tapi tidak terbatas pada wilayah kecil. efek coriolis memang tidak signifikan pada wilayah kecil, tapi pengabaian efek coriolis bukan penentu apakah gelombang linear atau non-linear mohon diperiksa dan disusun kembali ...	Pada wilayah pemodelan di perairan, COMCOT menggunakan persamaan air dangkal linear dalam koordinat Kartesius untuk mengurangi kompleksitas dan meningkatkan efisiensi komputasi karena pendekatan yang lebih sederhana masih mampu merepresentasikan dinamika gelombang tsunami secara memadai. Namun, seiring dengan perambatan tsunami menuju wilayah landas kontinen dan pesisir, ketidaklinieran mulai menjadi signifikan akibat perubahan kedalaman dan interaksi dengan topografi dasar laut. Oleh karena itu, pada wilayah tersebut, penggunaan persamaan air dangkal non-linear menjadi lebih relevan untuk menggambarkan fenomena secara lebih akurat
13	mengapa sejak kondisi awal (menit 0) antara 1 titik observasi dengan lainnya sudah terdapat perbedaan tinggi tsunami? misal pada skenario 1 OP 29 > 8 meter	Dari hasil marigram pemodelan tsunami yang ditampilkan pada grafik tersebut, tampak bahwa pada menit-menit awal (sebelum tsunami tiba), nilai ketinggian pada tiap titik pengamatan sudah menunjukkan angka tertentu di atas nol. Hal ini menandakan bahwa nilai yang tertera bukanlah ketinggian muka air absolut (tsunami height), melainkan ketinggian relatif terhadap permukaan topografi lokal.
14	mengapa pula terdapat perbedaan tinggi tsunami antara skenario 1 dan skenario 2 pada titik yang sama? Apakah legenda warna sudah sama antara skenario 1 dan 2?	Berdasarkan pemodelan 2 skenario tersebut, model single segment mungkin memberikan tren umum atau rata-rata, model multi-segment memberikan gambaran yang memberikan hasil yang lebih tinggi dibandingkan dengan skenario single segment karena memiliki slip dan area yang lebih besar sehingga akan mempengaruhi ketinggian tsunami lgenda warna sudah disamakan
15	Pemilihan jenis grafik kurang tepat karena bukan tren melainkan perbandingan antara tiap titik. Gunakan grafik yang lebih tepat. misal bar chart	sudah diperbaiki dengan grafik bar

16	Apakah ini ditunjukkan oleh garis datar pada gambar 3-3. namun gambar tersebut tetap menunjukkan ada tinggi tsunami pada garis yang datar. berikan penjelasan lebih jauh untuk ini, apakah karena faktor data spasial atau faktor lainnya?	Dalam analisis validasi model tsunami , hanya titik-titik yang memiliki data observasi lapangan yang digunakan dalam perhitungan. Penggunaan data yang tidak tercatat dapat menimbulkan kesalahan interpretasi, terutama jika dianggap sebagai nol atau estimasi, sehingga dapat memperbesar bias dan mengurangi reliabilitas evaluasi model. Oleh karena itu, titik tanpa data dihindari dalam analisis statistik untuk menjaga akurasi dan kredibilitas hasil validasi
17	apakah relevan membandingkan 2 skenario ini sementara jumlah titik observasinya berbeda? tolong jelaskan	titik-titik observasi yang tidak memiliki data tinggi tsunami atau bernilai nol dikecualikan dari analisis, untuk menghindari bias terhadap nilai K dan k. Hal ini dilakukan guna menjaga keandalan interpretasi performa model terhadap hasil observasi lapangan. Selain itu, hanya titik-titik yang tersedia dan konsisten pada kedua skenario yang digunakan untuk perbandingan langsung, demi memastikan validitas dan kesetaraan analisis antar skenario
18	mohon beri pembahasan lebih jauh batasan ini sehingga memengaruhi hasil pemodelan	Hasil pemodelan ketinggian tsunami menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara pendekatan sumber gempa single-segment dan multi-segment, serta dibandingkan dengan data observasi lapangan. Ketidaksesuaian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor lokal yang tidak sepenuhnya tercakup dalam pemodelan numerik. Topografi pesisir, bentuk garis pantai, kondisi batimetri dangkal, serta keberadaan vegetasi pantai, pemecah gelombang, dan bangunan infrastruktur dapat mengubah karakteristik gelombang secara signifikan sebelum mencapai daratan (Ohira et al., 2012). Selain itu, keterbatasan resolusi spasial data input terutama pada grid batimetri dan topografi membatasi akurasi simulasi. Asumsi terkait sumber gempa juga berkontribusi terhadap perbedaan hasil simulasi. Ketepatan lokasi episenter, kedalaman patahan, serta besarnya slip dan luas area rupture sangat menentukan deformasi dasar laut yang dihasilkan.