

PEMODELAN TSUNAMI BANYUWANGI DENGAN SOFTWARE COMCOT

Hendrik Setyobudi^{1,2*}, Danar Guruh Pratomo¹, Khomsin¹

¹Departemen Teknik Geomatika, Fakultas Teknik Sipil Perencanaan dan Kebumihan-
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

e-mail : 6016232017@student.its.ac.id, hendrik.setyobudi@bmkg.go.id

Abstrak. Tsunami di wilayah selatan Jawa, khususnya Banyuwangi, merupakan ancaman signifikan akibat aktivitas megathrust di Zona Subduksi Sunda. Penelitian ini mengevaluasi kinerja software COMCOT versi 1.7 dalam memodelkan skenario tsunami berdasarkan kejadian historis tahun 1994 di Banyuwangi. Pendekatan *nested grid* diterapkan dengan data bathimetri dari GEBCO untuk layer 1 (resolusi kasar) dan BATNAS/DEMNAS untuk layer 2 (resolusi halus), untuk mensimulasikan empat skenario sumber gempa seperti bujur, lintang, panjang bidang patahan, lebar bidang patahan, kedalaman patahan, strike, dip, slip dan dislokasi. Hasil simulasi menunjukkan ketinggian gelombang maksimum hingga 12.11 m di wilayah Bandialit sementara di daerah rajekwesi ketinggiannya 10.64 m. Skenario ke-4 memiliki parameter sumber lintang 11 LS, bujur 113.7 BT, panjang bidang patahan 160 km, lebar bidang 40 km, kedalaman patahan 0 km, strike 280°, dip 12°, slip 90° dan dislokasi 18 m. Ketinggian tsunami terhadap data model untuk skenario ke-4 menghasilkan akurasi terbaik dengan nilai RMSE sebesar 1.44088 m dan koefisien korelasi 0.828282, hal ini menandakan kesesuaian yang baik antara model dan observasi. Temuan ini mengonfirmasi reliabilitas COMCOT dalam memprediksi inundasi tsunami dan menyediakan rekomendasi teknis untuk pengembangan sistem peringatan dini, pemetaan zona rawan, serta rencana evakuasi di pesisir selatan Jawa.

Kata Kunci: Banyuwangi; COMCOT; Mitigasi Bencana; Tsunami

Abstract. Tsunamis in the southern Java region, particularly in Banyuwangi, pose a significant threat due to megathrust activity in the Sunda Subduction Zone. This study evaluates the performance of COMCOT software version 1.7 in modeling tsunami scenarios based on the historical 1994 event in Banyuwangi. A nested grid approach was applied using bathymetry data from GEBCO for Layer 1 (coarse resolution) and BATNAS/DEMNAS for Layer 2 (fine resolution) to simulate four earthquake source scenarios, including longitude, latitude, fault plane length, fault plane width, fault depth, strike, dip, slip, and dislocation. Simulation results indicate maximum wave heights of up to 12.11 m in the Bandialit area, while in the Rajekwesi region, the height reaches 10.64 m. Scenario 4 features source parameters of latitude 11°S, longitude 113.7°E, fault plane length 160 km, fault plane width 40 km, fault depth 0 km, strike 280°, dip 12°, slip 9°, and dislocation 18 m. The tsunami height comparison against model data for Scenario 4 yields the best accuracy, with an RMSE value of 1.44088 m and a correlation coefficient of 0.828282, indicating a good fit between the model and observations. These findings confirm the reliability of COMCOT in predicting tsunami inundation and provide technical recommendations for developing early warning systems, vulnerability zone mapping, and evacuation plans along the southern Java coast.

Keywords: Banyuwangi; COMCOT; Disaster Mitigation; Tsunami

PENDAHULUAN

Pulau Jawa, sebagai wilayah dengan kepadatan penduduk tertinggi di Indonesia, memiliki garis pantai yang membentang sepanjang lebih dari 1.000 km di sisi selatan, yang secara langsung menghadap ke Zona Subduksi Busur Sunda. Zona ini merupakan sumber utama ancaman gempa dan tsunami, karena aktivitas konvergensi lempeng Indo-Australia dan Eurasia yang bergerak dengan kecepatan sekitar 6.7 cm per tahun (Kopp dkk, 2006). Berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia (PUSGEN), zona subduksi selatan Jawa memiliki potensi menghasilkan gempa megathrust hingga magnitudo Mw 9.2 (PUSGEN, 2017). Risiko ini diperparah oleh lokasi sumber gempa yang dekat ke daratan, yang menyebabkan gelombang tsunami dapat mencapai pesisir dalam waktu kurang dari 23 - 30 menit, memberikan waktu respons sangat singkat bagi masyarakat dan sistem peringatan dini (Widodo dkk, 2024; Yulianto dkk, 2008).

Gempa bumi berkekuatan Mw 7.8 yang mengguncang selatan Jawa Timur pada 2 Juni 1994 merupakan salah satu peristiwa tsunami historis penting di kawasan ini. Episenter gempa berada di lepas pantai Banyuwangi, dengan mekanisme sesar naik (thrust) yang khas dari aktivitas subduksi. Gempa ini memicu

tsunami dengan ketinggian gelombang maksimum mencapai 13.9 meter di Pantai Rajekwesi, Banyuwangi (Tsuji dkk, 1995). Gelombang tsunami menyapu pemukiman pesisir dan mengakibatkan lebih dari 200 korban jiwa, 400 orang terluka dan 1000 rumah hancur, dan kerusakan parah pada infrastruktur pesisir seperti pelabuhan, jalan, dan fasilitas pariwisata. Kejadian ini menjadi pemicu mendorong pengembangan sistem peringatan dini tsunami di Indonesia, meskipun kapasitasnya masih sangat terbatas hingga beberapa tahun setelahnya terutama pada tahun 2005 (Spahn dkk, 2014).

Mitigasi bencana tsunami melibatkan pendekatan multi-aspek, mencakup pembuatan peta rawan tsunami, pengembangan sistem peringatan dini, simulasi evakuasi, edukasi masyarakat, serta penataan ruang berbasis risiko bencana. Di antara strategi-strategi tersebut, pemodelan numerik tsunami memegang peran krusial dalam memprediksi dampak potensial tsunami dan menyediakan dasar ilmiah bagi perencanaan mitigasi. Pemodelan tsunami memungkinkan identifikasi area dengan potensi inundasi tinggi, estimasi waktu tiba gelombang, dan simulasi skenario berbagai magnitudo gempa, yang selanjutnya digunakan untuk merancang jalur evakuasi, zona aman, dan kebijakan tata ruang (González-Riancho dkk, 2013; Wegscheider dkk, 2011). Dalam konteks Indonesia, pemodelan tsunami kini menjadi penting dalam rencana kontinjensi bencana di daerah pesisir rawan. Perkembangan pemodelan tsunami telah mengalami percepatan signifikan sejak akhir abad ke-20, dengan lonjakan penelitian dan aplikasi praktik nyata setelah peristiwa Samudera Hindia 2004. Pendekatan awal berbasis persamaan *shallow water linear* (LSWE) kini dilengkapi oleh formulasi non-linier dan Boussinesq untuk mensimulasikan run-up, gelombang pecah, dan inundasi di zona pesisir (Titov & Synolakis, 1998). Di sisi numerik, komunitas riset mengadopsi skema *finite-difference*, *finite-volume*, dan *finite-element* serta teknik *nested-grid* untuk mengatasi skala spasial yang luas. Salah satunya adalah software COMCOT yang menggabungkan skema *leap-frog finite-difference* dan algoritma *nested grid* dua-arah untuk pemodelan mulai dari generasi hingga run-up dan inundasi (Wang dan Power, 2011). Integrasi data batimetri/topografi resolusi tinggi dan prosedur validasi terhadap pengukuran lapangan pasca-bencana kini menjadi standar untuk menilai kredibilitas simulasi. Sementara itu, perkembangan terbaru memperkenalkan pendekatan data-driven seperti *deep learning* yang berpotensi mempercepat dan memperhalus prediksi kedalaman inundasi secara *real-time* (Sriyanto dkk, 2025).

COMCOT (*Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model*) versi 1.7 merupakan salah satu perangkat lunak pemodelan tsunami banyak digunakan, terutama karena integrasi antara grid bersarang dan fleksibilitas dalam pemodelan dari skala regional hingga lokal. COMCOT 1.7 menggunakan persamaan *shallow water nonlinear* dan mampu mensimulasikan generasi, propagasi, dan inundasi tsunami dengan akurasi tinggi (Wang dan Power, 2011). Di Indonesia, COMCOT telah diterapkan dalam berbagai studi untuk mensimulasikan tsunami dan inundasi pesisir. Misalnya untuk kajian evakuasi dan pemodelan inundasi di Aceh dan Sumatra Utara (Ibrahim dkk, 2023; Jihad dkk, 2023; Syamsidik dkk, 2023), pemodelan run-up dan kedalaman aliran pada peristiwa tsunami selatan Jawa 2006 (Laksono dkk, 2020), serta pengembangan basis data pra-komputasi untuk prakiraan dan peringatan di Pelabuhan Ratu (Setiyono dkk, 2017), Studi perbandingan model juga menyertakan COMCOT untuk kawasan pariwisata seperti Pantai Kuta Mandalika (Pradjoko dkk, 2022). Hasil-hasil ini menunjukkan bahwa COMCOT merupakan alat yang berguna untuk kajian bahaya tsunami dan perencanaan mitigasi di Indonesia, meskipun implementasinya sering kali memerlukan kalibrasi dan validasi berdasarkan karakteristik lokal serta data lapangan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dan akurasi COMCOT 1.7 dalam memodelkan skenario tsunami di lokasi Banyuwangi (Jawa Timur). Dengan menggunakan parameter sumber gempa yang disesuaikan dengan karakteristik megathrust di Zona Busur Sunda, simulasi dilakukan untuk menghasilkan peta inundasi di wilayah ini. Hasilnya akan divalidasi secara komparatif terhadap data lapangan dari kejadian 1994. Evaluasi ini diharapkan dapat memberikan rekomendasi teknis mengenai reliabilitas COMCOT 1.7 sebagai alat perencanaan mitigasi bencana, sekaligus menyediakan dasar ilmiah untuk penyempurnaan sistem peringatan dini dan rencana evakuasi di wilayah pesisir selatan Jawa.

METODOLOGI

COMCOT 1.7 merupakan perangkat lunak simulasi tsunami yang berbasis persamaan air dangkal (*shallow water equations*) dengan pendekatan numerik menggunakan metode beda hingga (*finite difference method*). Software ini mampu mensimulasikan seluruh fase tsunami mulai dari generasi akibat deformasi dasar laut, propagasi di laut dalam, hingga inundasi di wilayah pesisir (Liu dkk, 1998). Untuk memodelkan tsunami digunakan persamaan berikut :

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

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = 0 \quad (3)$$

Dengan η : fluktuasi permukaan muka air laut (m); P,Q : Aliran Volume / Volume Flux (m/s²); g : percepatan gravitasi (m/s²); h : kedalaman air (m); ψ : Bujur dan φ : Lintang. Untuk mencapai keseimbangan antara efisiensi komputasi dan resolusi spasial yang detail, digunakan desain grid bersarang (*nested grid*) dengan dua level grid bertingkat. Pendekatan ini memungkinkan resolusi spasial yang tinggi di wilayah studi tanpa mengorbankan komputasi pada cakupan area yang lebih luas (Kowalik dkk, 2007). Implementasi nested grid dalam COMCOT dilakukan dengan pendekatan *two-way nesting* dimana informasi antar grid dipertukarkan secara dua arah. Grid level kasar memberikan *boundary condition* untuk grid level halus, sementara grid level halus memberikan informasi ke grid level kasar. Pendekatan ini secara signifikan meningkatkan akurasi simulasi di wilayah pantai tanpa menambah beban komputasi yang berlebihan (Imamura, 1996).

Kualitas data bathimetri dan topografi merupakan faktor penting dalam menentukan akurasi model tsunami. Data GEBCO dengan resolusi 1.85 km digunakan untuk memodelkan tsunami di sepanjang Selatan JAWA. Data BATNAS dan DEMNAS dengan resolusi 250 m dan 8 m digunakan untuk memodelkan tsunami dekat dengan wilayah Pantai. Skenario gempa dirancang berdasarkan analisis seismotektonik zona subduksi Selatan Jawa yang merupakan hasil interaksi antara lempeng Indo-Australia dengan lempeng Eurasia dan disesuaikan dengan parameter sumber gempa yang pernah diteliti sebelumnya. Parameter sumber gempa yang digunakan dalam COMCOT 1.7 ialah lintang, bujur, panjang bidang patahan, lebar bidang patahan, kedalaman, strike, dip, slip dan dislokasi. Berdasarkan tabel 1 ada sekitar 4 model parameter sumber gempa untuk kejadian gempa Banyuwangi. Data parameter sumber gempa didasarkan dari penelitian Abercrombie dkk, (2001), Budiarta (2014), (Hanifa dkk, 2009), Pribadi dkk (2016) dan Tanioaka dan Satake (1996). Selanjutnya data ketinggian tsunami Banyuwangi didasarkan dari hasil observasi penelitian Banyuwangi (Maramai dan Tinti, 1997; Tsuji dkk, 1995). Dalam pengolahannya software yang digunakan yaitu QGIS yang digunakan untuk pemetaan dan analisis spasial. Python digunakan dalam analisis data. Selanjutnya untuk melakukan evaluasi hasil yang diperoleh digunakan RMSE dan Koefisien Korelasi.

Untuk mengevaluasi keakuratan hasil yang diperoleh dari model tsunami, digunakan metrik statistik seperti Root Mean Square Error (RMSE) dan Koefisien Korelasi. RMSE mengukur deviasi rata-rata antara nilai observasi dengan data prediksi model (Hobs – Hmodel), di mana nilai yang lebih rendah menandakan kesalahan yang minim; dalam konteks ini, RMSE membantu mengidentifikasi apakah model sesuai di wilayah Banyuwangi, sehingga memungkinkan penyesuaian parameter untuk meningkatkan presisi. Koefisien Korelasi, sering kali dinamakan Pearson's r digunakan untuk menilai kekuatan hubungan linier antara model dan observasi, dengan nilai mendekati 1 menunjukkan korelasi positif yang kuat, yang berguna untuk memvalidasi konsistensi model terhadap data historis seperti run-up heights dari survei lapangan. Penggunaan kedua metrik ini tidak hanya memastikan validitas ilmiah model tetapi juga mendukung interpretasi hasil simulasi secara komprehensif, di mana RMSE yang rendah dan dikombinasikan dengan koefisien korelasi

yang tinggi mengindikasikan bahwa model COMCOT mampu mensimulasikan kejadian tsunami dengan baik. Pendekatan ini pada akhirnya berkontribusi pada pengembangan strategi mitigasi bencana yang lebih efektif, termasuk pemetaan zona rawan dan simulasi skenario masa depan untuk wilayah selatan Jawa. Berdasarkan tabel 1 ada 4 model skenario tsunami banyuwangi. Model ini (H_{model}) kemudian di evaluasi berdasarkan nilai RMSE (Watanabe dkk, 2022) hasil observasi (H_{obs}) Tsuji dkk (1995), Maramai dan Tinti (1997), Fritz dkk (2007) dan Lavigne dkk (2007). Adapun persamaan RMSE di tunjukkan pada persamaan 4 yaitu :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (H_{obs} - H_{model})^2} \quad (4)$$

Dengan : H_{model} = ketinggian tsunami hasil pemodelan

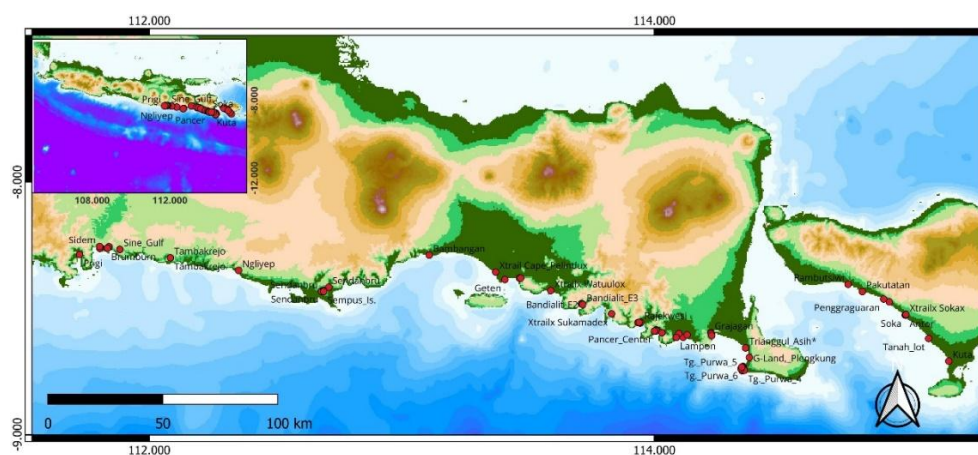
$$H_{\text{obs}} = \text{ketinggian tsunami hasil observasi}$$

Setelah menilai kesesuaian model dengan RMSE, langkah selanjutnya adalah mengukur kekuatan hubungan linier antara nilai yang diprediksi model (H_{model}) dan nilai yang diobservasi secara lapangan (H_{obs}). Pada analisis tsunami, koefisien korelasi Pearson (r) paling sering dipakai karena memberikan gambaran kuantitatif tentang seberapa baik pola variasi data model mengikuti pola variasi data observasi.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs},i} - \bar{H}_{\text{obs}})(H_{\text{model},i} - \bar{H}_{\text{model}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{obs},i} - \bar{H}_{\text{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (H_{\text{model},i} - \bar{H}_{\text{model}})^2}} \quad (5)$$

Tabel 1. Parameter sumber gempa pembangkit Tsunami Banyuwangi (Abercrombie dkk, 2001; Budiarta, 2014; Hanifa dkk, 2009; Pribadi dkk, 2016; Tanioka dan Satake, 1996)

No	Lintang °	Bujur °	Panjang km	Lebar km	Kedalaman Km	Strike °	Dip °	Slip °	Dis m
Tsunami Banyuwangi									
1	-10.477°	112.83°	90	60	18	280	15	90	3.24
2	-10.28	113.04	160	80	16	280	12	90	2.5
3	-11.2	113.2	112.2	56.1	15	269	7	85	3.5
4	-11	113.7	160	40	0	280	12	90	18



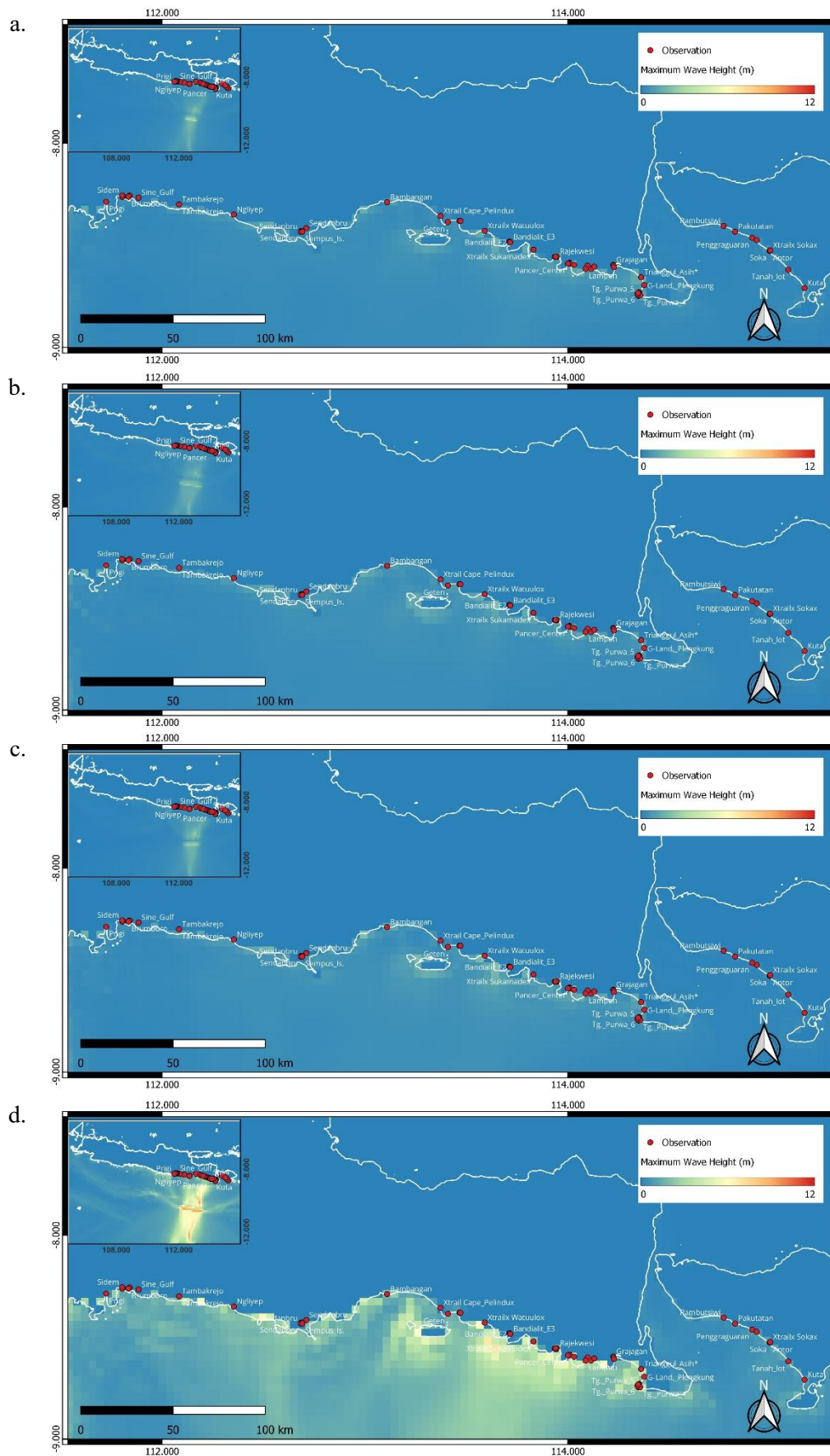
Gambar 1. Lokasi survei tsunami Banyuwangi (Maramai dan Tinti, 1997; Tsuji dkk, 1995)

HASIL DAN PEMBAHASAN

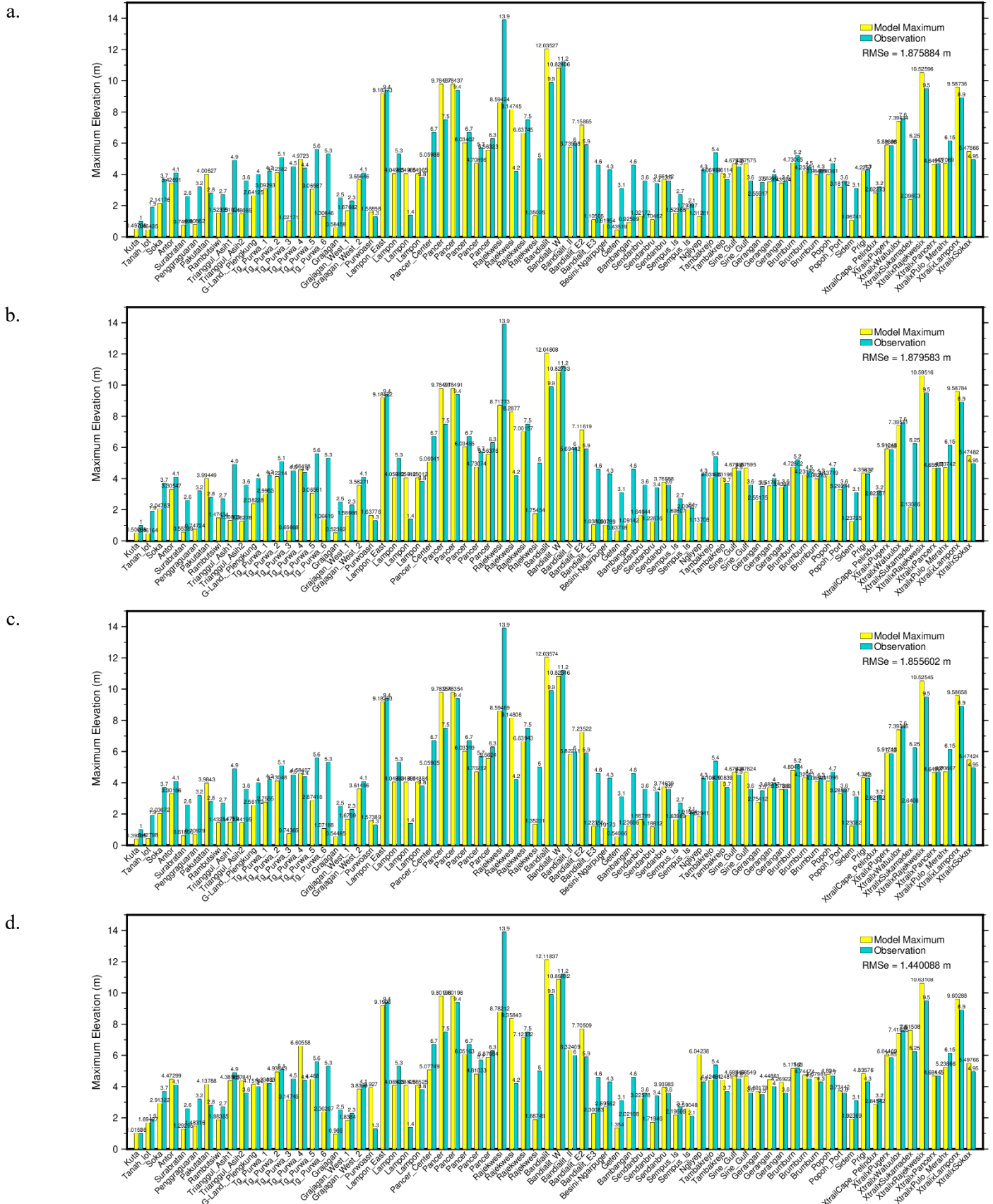
Hasil simulasi tsunami menggunakan software COMCOT versi 1.7 menunjukkan variasi signifikan dalam ketinggian gelombang dan inundasi di wilayah Banyuwangi, berdasarkan empat skenario sumber gempa yang dimodelkan dari kejadian historis 1994. Empat peta ketinggian tsunami (Gambar 2) mengilustrasikan distribusi spasial ketinggian maksimum tsunami untuk masing-masing skenario, dengan resolusi kasar pada layer 1 (GEBCO) dan pada layer 2 adalah data DEM gabungan BATNAS dan DEMNAS yang menggambarkan detail topografi pantai Banyuwangi, pantai Bali, Pantai Jember, Pantai Lumajang, Pantai Malang dan Pantai Tulungagung. Processing untuk tiap model memakan waktu mencapai 30 menit sehingga untuk keseluruhan model memakan waktu 2 jam. Data DEM gabungan BATNAS dan DEMNAS diolah menggunakan python. Dan data hasil pemodelan di petakan dengan software QGIS. Secara umum ketinggian tsunami disajikan dengan scalebar yang sama antara ke 4 skenario. Nilai terendah ditunjukkan dengan warna biru gelap (0 m) sedangkan nilai tertinggi ditunjukkan dengan warna merah gelap (12 m). Pada inset map di sebelah kiri atas di tiap-tiap peta ditunjukkan hasil ketinggian tsunami pada layer 1. Disini ditunjukkan ketinggian tsunami dari sumber gempa yang menyebar ke segala arah terutama mengarah ke selatan Jawa. Lingkaran yang berwarna merah pada peta merupakan daerah titik pengamatan ketinggian tsunami yang selanjutnya akan digunakan sebagai evaluasi skenario model yang telah disimulasikan. Dari Gambar 2 terlihat hasil skenario ke 4 menunjukkan pola ketinggian tsunami yang paling tinggi dibandingkan dengan skenario yang lainnya. Hal ini bisa dipahami karena perbedaan parameter sumber gempa terutama besarnya nilai dislokasi yang mencapai 18 m dibanding skenario yang lainnya serta kedalaman yang sangat dangkal yakni 0 m.

Selanjutnya berdasarkan hasil dari gambar 3 ditunjukkan perbandingan tinggi tsunami hasil pemodelan dan hasil observasi pada 72 lokasi. Pada skenario 1 daerah yang memiliki nilai ketinggian tsunami yang terendah pada daerah Geten di Jember dengan ketinggian 0.43 m sementara daerah yang memiliki nilai tertinggi pada daerah Bandialit di Jember dengan ketinggian 12.03 m. Pada skenario 2 daerah yang memiliki nilai ketinggian tsunami terendah berada pada daerah tanah lot Bali dengan ketinggian 0.46 m sedangkan nilai tertinggi berada pada daerah Bandialit Jember dengan ketinggian 12.04 m. Pada skenario ke-3 daerah yang memiliki nilai ketinggian tsunami terendah berada pada daerah Kuta Bali yaitu 0.39 m sedangkan daerah yang memiliki nilai ketinggian tsunami tertinggi berada pada daerah Bandialit Jember. Pada skenario ke-4 daerah yang memiliki nilai ketinggian tsunami terendah berada pada daerah Grajagan Banyuwangi dengan ketinggian 0.96 m sedangkan nilai tertinggi berada pada daerah Bandialit Jember dengan ketinggian 12.11 m. Dari grafik-grafik ini mencerminkan adanya model yang overestimasi dan under estimasi. Hal ini dapat dipahami bahwa data digital elevation model yang digunakan merupakan data yang diukur tidak pada saat terjadinya kejadian tsunami 1994 sehingga terjadi perbedaan tinggi model tsunami.

Dengan adanya data model dan observasi maka nilai RMSE tiap-tiap skenario tsunami dapat dihitung. Pada skenario 1 nilai RMSE sekitar 1.875884 m, pada skenario 2 nilai RMSE 1.879583 m, pada skenario 3 nilai RMSE 1.855602 m dan pada skenario ke 4 nilai RMSE 1.440088 m. Skenario ke-4 menunjukkan nilai RMSE yang paling rendah (1.440088 m) dibandingkan skenario lainnya, yang menandakan bahwa parameter dislokasi tinggi dan kedalaman dangkal lebih mendekati dinamika tsunami 1994, sehingga menghasilkan estimasi inundasi yang lebih akurat di wilayah Jawa Timur. Perbedaan RMSE ini menggarisbawahi pentingnya sensitivitas model terhadap variasi sumber gempa, di mana overestimasi dan underestimasi ketinggian tsunami pada skenario 1 sampai 4 kemungkinan disebabkan oleh ketidaksesuaian data DEM dan kondisi topografi saat kejadian. Di titik observasi tsunami seperti di dua tempat di daerah Rajekwesi yang berjarak 18 meter tercatat perbedaan tinggi tsunami yang sangat signifikan yakni di lokasi pertama 4.2 m dan di lokasi ke dua 13.9 meter. Sedangkan menurut hasil pemodelan di skenario 4 nilainya sekitar 8.78 m dan 8.35 m. Dari sini dapat disimpulkan bahwa hasil observasi ini yang memiliki jarak yang terlalu dekat dengan perbedaan yang sangat signifikan akan sulit bagi COMCOT untuk memodelkannya. Dan dari pengecekan peta topografi dari DEM gabungan (BATNAS dan DEMNAS) pada daerah ini tidak terlalu signifikan perbedaan ketinggiannya.



Gambar 2. Hasil Simulasi Ketinggian Tsunami Banyuwangi a. Skenario 1, b. Skenario 2, c. Skenario 3, d. Skenario 4

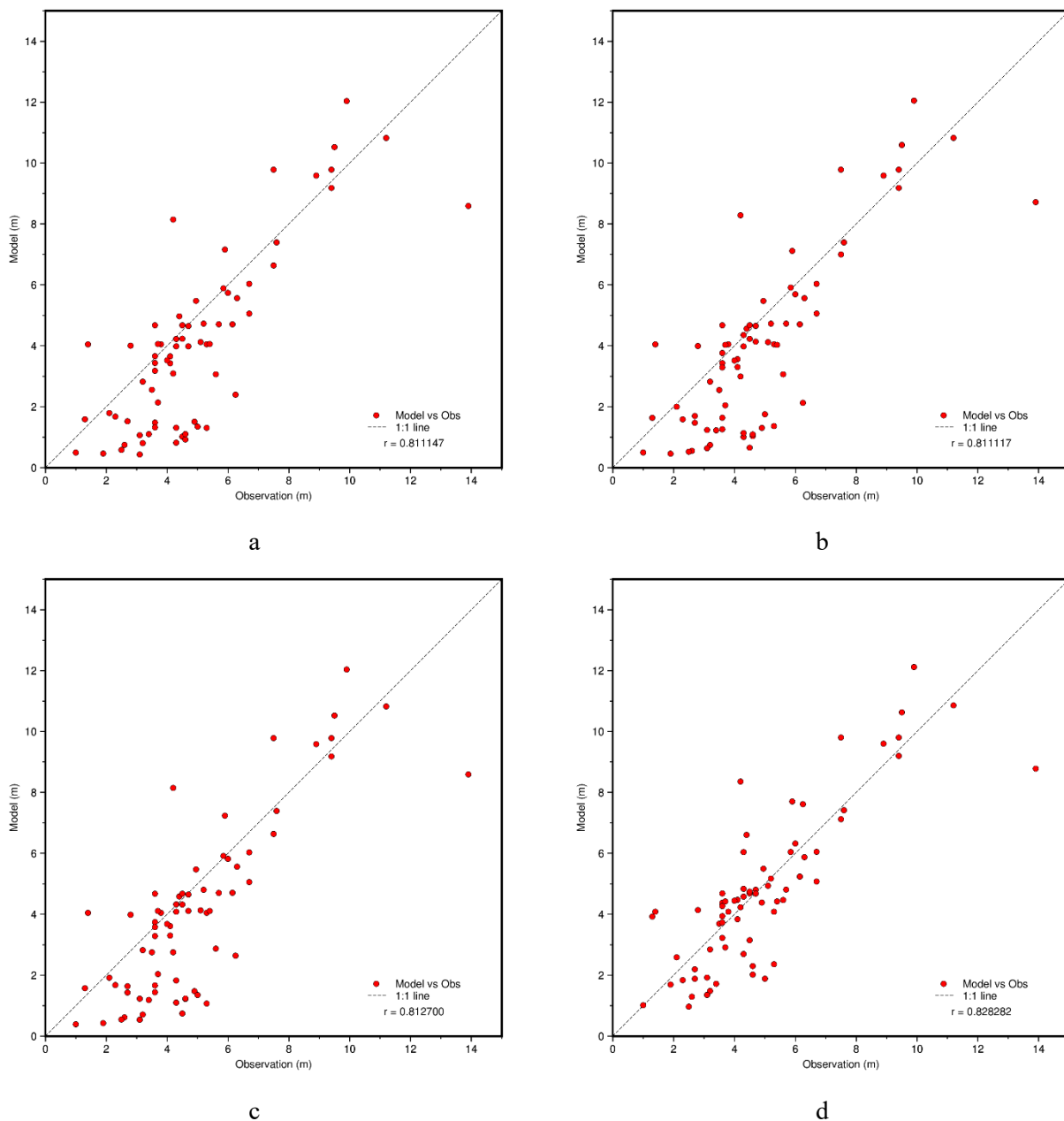


Gambar 3. Perbandingan hasil ketinggian tsunami antara model dan observasi, a. Skenario 1, b. Skenario 2, c. Skenario 3, d. Skenario 4

Perbedaan dalam Data Elevation Digital (DEM) dapat menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi akurasi hasil simulasi tsunami menggunakan program COMCOT versi 1.7. Untuk meningkatkan presisi model, diperlukan data topografi yang lebih detail, seperti yang dapat dihasilkan dari survei LiDAR (Sriyanto dkk, 2024). Selanjutnya untuk hasil sebaran data model dan observasi serta nilai koefisien korelasi ditunjukkan pada gambar 4. Pada skenario ke 1 nilai koefisien korelasinya 0.811147 pada skenario ke 2 nilai koefisien korelasinya 0.811117 pada skenario ke 3 nilai koefisien korelasinya 0.812700 pada skenario ke 4 nilai koefisien korelasinya 0.828282. Hasil simulasi ini menekankan pentingnya analisis sensitivitas terhadap parameter sumber gempa dalam model tsunami. Nilai dislokasi yang lebih tinggi dan kedalaman sumber yang sangat dangkal (0 m) dalam skenario 4 tidak hanya memberikan RMSE terendah, tetapi juga menghasilkan distribusi ketinggian tsunami yang paling sesuai dengan kondisi historis. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan kecil dalam parameter awal dapat memiliki dampak besar terhadap hasil akhir model. Penelitian lanjutan yang menguji rentang parameter dislokasi dan kedalaman sumber secara sistematis akan sangat membantu dalam memahami batasan dan kemampuan model COMCOT untuk menangkap kompleksitas dinamika tsunami.

Temuan bahwa model COMCOT gagal memodelkan variasi ketinggian tsunami yang ekstrem pada jarak sangat dekat (18 meter) di Rajekwesi, mengungkapkan adanya keterbatasan data DEM. Model seperti COMCOT menyederhanakan kompleksitas topografi dan hidrodinamika lokal, terutama di area dengan perubahan elevasi yang ekstrem dan geometri pantai yang rumit. Fenomena seperti *hydrodynamic focusing* atau *wave run-up* di daerah batu karang, tebing, atau lembah sempit sering kali tidak terwakili dengan akurat. Ini menekankan bahwa model komputasi harus selalu di konfirmasi dengan survei lapangan dan pemantauan spasial untuk memvalidasi hasil yang terjadi di skala sub-kilometer, terutama dalam konteks perencanaan mitigasi bencana. Nilai RMSE, meskipun menjadi ukuran umum yang berguna, harus dilihat dalam konteks penggunaannya. Dalam penelitian ini, skenario 4 menunjukkan nilai RMSE terendah, yang secara tidak langsung mendukung validitas skenario tersebut dalam mewakili tsunami historis. Namun, RMSE juga memiliki keterbatasan, karena bisa mengaburkan *bias* (bias sistematis) atau *outlier* (data ekstrem). Misalnya, meskipun total RMSE rendah, model bisa terus *overestimate* di daerah tertentu dan *underestimate* di daerah lain. Hasil penelitian ini secara kuat mendukung rekomendasi penggunaan data LiDAR untuk meningkatkan kualitas input model. Data LiDAR, yang dapat menciptakan DEM dengan resolusi hingga 0.5 meter dan akurasi tinggi pada area pesisir, jauh lebih unggul dalam menangkap detail topografi mikro dibandingkan data GEBCO atau BATNAS/DEMNAS yang memiliki resolusi kasar. Integrasi data LiDAR dalam pemodelan tsunami akan sangat meningkatkan kemampuan model dalam memprediksi lokalitas gelombang, termasuk puncak ketinggian dan pola inundasi di lokasi strategis. Jika diintegrasikan secara sistematis, data LiDAR tidak hanya memperbaiki akurasi, tetapi juga dapat digunakan untuk identifikasi zona terdampak yang lebih akurat dan memodifikasi rencana tata ruang pesisir secara proaktif.

Berdasarkan temuan ini, beberapa rekomendasi strategis dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya dan pengelolaan bencana. Pertama, pengembangan database pemodelan tsunami dengan berbagai skenario sumber gempa yang dikoordinasikan dan diverifikasi dengan data observasi historis perlu diprioritaskan. Kedua, kemitraan antara lembaga meteorologi, geofisika, dan peneliti bidang pemodelan perlu diperkuat untuk mengintegrasikan data lapangan, seperti LiDAR, ke dalam pipeline pemodelan secara rutin. Ketiga, model seperti COMCOT sebaiknya digunakan sebagai alat pendukung dalam pengambilan keputusan, bukan sebagai satu-satunya sumber informasi. Terakhir, hasil dari studi ini harus dimanfaatkan untuk memperbarui peta zona berisiko dan rencana evakuasi, terutama di daerah seperti Bandialit Jember dan Rajekwesi, yang menunjukkan kerentanan tinggi terhadap ketinggian surge tsunami yang tidak dapat diprediksi secara akurat oleh model saat ini.



Gambar 4. Perbandingan grafik koefisien korelasi model dan observasi a. Skenario 1, b. Skenario 2, c. Skenario 3, d. skenario 4.

PENUTUP

Simulasi tsunami menggunakan COMCOT versi 1.7 berhasil mengevaluasi empat skenario sumber gempa berbasis kejadian historis 1994 di Banyuwangi, dengan skenario 4 menunjukkan akurasi tertinggi (RMSE 1,44088 m, $R=0,828282$) dan ketinggian maksimum hingga 12,11 m di Bandialit serta 10,64 m di Rajekwesi. Hasil ini mengonfirmasi reliabilitas model dalam memprediksi propagasi dan inundasi, meskipun terdapat keterbatasan dalam menangkap variasi lokal ekstrem akibat resolusi DEM yang kasar. Faktor seperti parameter dislokasi tinggi dan kedalaman dangkal pada skenario 4 paling sesuai dengan dinamika tsunami 1994. Hal ini menekankan perlunya analisis sensitivitas untuk skenario masa depan. Secara keseluruhan, studi ini menunjukkan bahwa COMCOT efektif sebagai alat pendukung mitigasi bencana, tetapi harus dikombinasikan dengan data topografi berkualitas tinggi seperti LiDAR untuk presisi lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Abercrombie, R. E., Antolik, M., Felzer, K., dan Ekström, G. (2001). The 1994 Java tsunami earthquake: Slip over a subducting seamount. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 106(B4), 6595–6607. <https://doi.org/10.1029/2000jb900403>
- Budiarta. (2014). *Tsunami Simulation of the 1994 Java Earthquake for Tsunami Hazard Assessment along the Southern Coast of East Java, Indonesia*. International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISSE), Japan.
- Fritz, H. M., Kongko, W., Moore, A., McAdoo, B., Goff, J., Harbitz, C., Uslu, B., Kalligeris, N., Suteja, D., Kalsum, K., Titov, V., Gusman, A., Latief, H., Santoso, E., Sujoko, S., Djulkarnaen, D., Sunendar, H., dan Synolakis, C. (2007). Extreme runup from the 17 July 2006 Java tsunami. *Geophysical Research Letters*, 34(12). <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/2007GL029404>
- González-Riancho, P., Aguirre-Ayerbe, I., Aniel-Quiroga, I., Abad, S., González, M., Larreynaga, J., Gavidia, F., Gutiérrez, O. Q., Álvarez-Gómez, J. A., dan Medina, R. (2013). Tsunami evacuation modelling as a tool for risk reduction: application to the coastal area of El Salvador. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3249–3270. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3249-2013>
- Hanifa, N. R., Meilano, I., Sagiya, T., Kimata, F., dan Abidin, H. Z. (2009). Numerical modeling of the 2006 Java tsunami earthquake. In *Advances in Geosciences Volume 13 Solid Earth* (hal. 231–248). https://doi.org/10.1142/9789812836182_0016
- Ibrahim, Syamsidik, Azmeri, Hasan, M., Irwansyah, A., dan Al Farizi, M. D. (2023). Assessing tsunami vertical evacuation processes based on probabilistic tsunami hazard assessment for west coast of Aceh Besar, Indonesia. *Geoenvironmental Disasters*, 10(1), 8. <https://doi.org/10.1186/s40677-023-00238-5>
- Imamura, F. (1996). *Review of tsunami simulation with a finite difference method BT - Long-Wave Runup Models* (H. Yeh, P. L.-F. Liu, & C. Synolakis (ed.); hal. 25–42). World Scientific.
- Jihad, A., Muksin, U., Syamsidik, Ramli, M., Banyunegoro, V. H., Simanjuntak, A. V. H., dan Rusdin, A. A. (2023). Tsunami evacuation sites in the northern Sumatra (Indonesia) determined based on the updated tsunami numerical simulations. *Progress in Disaster Science*, 18, 100286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pdisas.2023.100286>
- Kopp, H., Flueh, E. R., Petersen, C. J., Weinrebe, W., Wittwer, A., dan Scientists, M. (2006). The Java margin revisited: Evidence for subduction erosion off Java. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1), 130–142. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.11.036>
- Kowalik, Z., Knight, W., Logan, T., dan Whitmore, P. (2007). *The Tsunami of 26 December, 2004: Numerical Modeling and Energy Considerations BT - Tsunami and Its Hazards in the Indian and Pacific Oceans* (K. Satake, E. A. Okal, & J. C. Borrero (ed.); hal. 379–393). Birkhäuser Basel.
- Laksono, F., Aditama, M. R., Setijadi, R., dan Ramadhan, G. (2020). Run-up Height and Flow Depth Simulation of the 2006 South Java Tsunami Using COMCOT on Widarapayung Beach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 982(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/982/1/012047>
- Lavigne, F., Gomez, C., Giffó, M., Wassmer, P., Hoebreck, C., Mardiatno, D., Priyono, J., dan Paris, R. (2007). Field observations of the 17 July 2006 Tsunami in Java. *Natural Hazards and Earth System Science*, 7(1). <https://doi.org/10.5194/nhess-7-177-2007>
- Liu, P. L.-F., Woo, S.-B., dan Cho, Y.-S. (1998). *Computer Programs for Tsunami Propagation and Inundation, Technical report*.
- Maramai, A., dan Tinti, S. (1997). The 3 June 1994 Java Tsunami: A Post-Event Survey of the Coastal Effects. *Natural Hazards*, 15(1), 31–49. <https://doi.org/10.1023/A:1007957224367>
- Pradjoko, E., Karisman, A., Pracoyo, A., Harianto, B., Suroso, A., dan Saadi, Y. (2022). The application of two tsunami inundation model in the Kuta Mandalika Coast. In *Proceedings of the First Mandalika International Multi-Conference on Science and Engineering 2022 (MIMSE 2022)*, 95–102. https://doi.org/https://doi.org/10.2991/978-94-6463-088-6_11
- Pribadi, S., Puspito, N. T., Rahman, M. S. S., dan Tristanawati. (2016). Earthquake source characterization for tsunami zoning (Case study of the Bengkulu 12 September 2007 tsunami and the 2 June 1994 Banyuwangi tsunami). *AIP Conference Proceedings*, 1730(1), 20015. <https://doi.org/10.1063/1.4947383>

- PUSGEN. (2017). *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Pemukiman PUPR.
- Setiyono, U., Gusman, A. R., Satake, K., dan Fujii, Y. (2017). Pre-computed tsunami inundation database and forecast simulation in Pelabuhan Ratu, Indonesia. *Pure and Applied Geophysics*, 174(8), 3219–3235. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1633-8>
- Spahn, H., Hoppe, M., Kodijat, A., Rafliana, I., Usdianto, B., dan Vidiarina, H. D. (2014). *Walking the Last Mile: Contributions to the Development of an End-to-End Tsunami Early Warning System in Indonesia BT - Early Warning for Geological Disasters: Scientific Methods and Current Practice* (F. Wenzel & J. Zschau (ed.); hal. 179–206). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12233-0_10
- Sriyanto, S. P. D., Adriano, B., Fujii, Y., dan Koshimura, S. (2025). Estimation of high-resolution tsunami inundation depth using deep learning models: Case study of Pangandaran, Indonesia. *Ocean Engineering*, 330, 121019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2025.121019>
- Sriyanto, S. P. D., Nurokhim, A., Sulistian, T., Gunawan, I., Sari, R. I., Samapta, B. T., Fatchurochman, I., Mugiarto, F. T., dan Harrys, R. M. (2024). Tsunami hazard assessment for the Cilegon industrial zone, Java, Indonesia, by considering various digital elevation model (DEM) datasets and fault source models. *Arabian Journal of Geosciences*, 17(12), 333. <https://doi.org/10.1007/s12517-024-12133-w>
- Syamsidik, Rasyif, T. M., Fritz, H. M., Idris, Y., dan Rusydy, I. (2023). Fragility based characterization of alternative tsunami evacuation buildings in Banda Aceh, Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 88, 103607. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103607>
- Titov, Vasily V., and Costas Emmanuel Synolakis. "Numerical modeling of tidal wave runup." *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 124, no. 4 (1998): 157-171.
- Tanioka, Y., dan Satake, K. (1996). Tsunami generation by horizontal displacement of ocean bottom. *Geophysical Research Letters*, 23(8). <https://doi.org/10.1029/96GL00736>
- Tsuji, Y., Imamura, F., Matsutomi, H., Synolakis, C. E., Nanang, P. T., Jumadi, Harada, S., Han, S. S., Arai, K., dan Cook, B. (1995). *Field Survey of the East Java Earthquake and Tsunami of June 3, 1994 BT - Tsunamis: 1992–1994: Their Generation, Dynamics, and Hazard* (F. Imamura & K. Satake (ed.); hal. 839–854). Birkhäuser Basel. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7279-9_25
- Wang, X., dan Power, W. (2011). *COMCOT: a Tsunami Generation Propagation and Run-up Model*. Institute of Geological and Nuclear Sciences Limited.
- Watanabe, M., Arikawa, T., Kihara, N., Tsurudome, C., Hosaka, K., Kimura, T., Hashimoto, T., Ishihara, F., Shikata, T., Morikawa, D. S., Makino, T., Asai, M., Chida, Y., Ohnishi, Y., Marras, S., Mukherjee, A., Cajas, J. C., Houzeaux, G., Paolo, B. D., ... Tateno, T. (2022). Validation of tsunami numerical simulation models for an idealized coastal industrial site. *Coastal Engineering Journal*, 64(2), 302–343. <https://doi.org/10.1080/21664250.2022.2072611>
- Wegscheider, S., Post, J., Zosseder, K., Mück, M., Strunz, G., Riedlinger, T., Muhari, A., dan Anwar, H. Z. (2011). Generating tsunami risk knowledge at community level as a base for planning and implementation of risk reduction strategies. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2), 249–258. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-249-2011>
- Widodo, A., Aditama, F. Y., Rochman, J. P. G. N., Kartikasari, D., Putra, N. M., dan Pribadi, S. (2024). Preliminary study of tsunami simulations on megathrust earthquake scenarios in Pacitan Regency, East Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1307(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1307/1/012004>
- Yulianto, E., Kusmayanto, F., Supriyatna, N., dan Dirhamsyah, D. (2008). *Selamat dari bencana tsunami: pembelajaran dari tsunami Aceh dan Pangandaran*. UNESCO Office Jakarta.