



JURNAL BERKALA TERAPAN TEKNIK SIPIL

ISSN X..., Homepage: <https://jurnal.unej.ac.id/index.php/BERAKSI>



"ANALISIS EFEKTIVITAS BREAKWATER HORIZONTAL DAN DIAGONAL DALAM MEREDUKSI GELOMBANG TSUNAMI DI PANTAI PUGER MENGGUNAKAN SIMULASI DELFT3D"

Analysis of the Effectiveness of Horizontal and Diagonal Breakwaters in Reducing Tsunami Waves at Puger Beach Using Delft3D Simulation

Raden Denisio Edwin Rikarda*, Rino Dwisadi^a, Gholiqul Amrodh Alawy^a, Retno Utami Agung Wiyono^a

^aProgram Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Jember, Jalan Kalimantan no 37 Jember.

*Corresponding Author : Raden Denisio Edwin Rikarda, Email Address: rdenisio@unej.ac.id

ABSTRAK

Indonesia merupakan negara kepulauan yang sangat rentan terhadap bahaya tsunami akibat posisinya di pertemuan tiga lempeng tektonik aktif. Data menunjukkan bahwa dalam dua dekade terakhir, Indonesia telah mengalami lebih dari 20 kejadian tsunami yang menimbulkan kerusakan parah dan korban jiwa. Sejak tahun 1990, beberapa tsunami signifikan terjadi di selatan Pulau Jawa, seperti tsunami Banyuwangi pada 1994 dan tsunami Pangandaran pada 2006. Berdasarkan survei pada tahun tersebut, ketinggian gelombang tsunami di Kabupaten Jember tercatat sebesar 3,2 m, 5,85 m, dan 7,5 m di tiga lokasi berbeda. Pantai Puger, yang merupakan kawasan padat dengan akses muara sungai, terdampak tsunami dengan ketinggian gelombang antara 4,88 m dan 5,85 m. Pemodelan menggunakan perangkat lunak Delft3D akan dilakukan untuk membuat simulasi yang dapat mereduksi dampak gelombang tsunami melalui dua skenario pemecah gelombang (breakwater) horizontal dan diagonal yang akan divalidasi dengan parameter gempa tsunami Banyuwangi 1994. Hasil simulasi menunjukkan ketinggian gelombang berkurang sebesar 0,2 m (3,4%) dengan waktu kedatangan tsunami bertambah 2 menit (5%). Breakwater diagonal lebih efektif, dengan reduksi ketinggian 4% dan penundaan waktu kedatangan 7%. Namun, terdapat satu titik pengamatan di mana ketinggian gelombang justru meningkat, sehingga breakwater horizontal lebih direkomendasikan untuk diterapkan di kawasan tersebut.

Kata kunci: Delft3D, puger pemecah gelombang, simulasi, tsunami.

ABSTRAC

Indonesia is an archipelagic country highly vulnerable to tsunami hazards due to its location at the convergence of three active tectonic plates. Over the past two decades, Indonesia has experienced more than 20 tsunami events, causing significant damage and loss of life. Notable tsunamis in the southern part of Java Island include the 1994 Banyuwangi tsunami and the 2006 Pangandaran tsunami. Surveys from these events recorded tsunami wave heights in Jember Regency at 3.2 m, 5.85 m, and 7.5 m at different locations. Puger Beach, a densely populated area with access to river estuaries, was impacted by tsunami waves ranging from 4.88 m to 5.85 m. To mitigate the effects of future tsunamis, simulations using Delft3D software will be conducted, testing two breakwater scenarios—horizontal and diagonal. These simulations will be validated using the parameters of the 1994 Banyuwangi tsunami earthquake. Results show a 0.2 m (3.4%) reduction in wave height and a 2-minute (5%) delay in arrival time. Diagonal breakwaters proved to be more effective, reducing wave height by 4% and delaying the tsunami arrival by 7%. However, one observation point showed an increase in wave height, suggesting that horizontal breakwaters would be more suitable for that area.

Keywords: Breakwater, Delft3D, puger, simulation, tsunami.

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara yang terletak di pertemuan tiga lempeng tektonik utama dunia—Eurasia, Indo-Australia, dan Pasifik—memiliki risiko tinggi terhadap bencana tsunami. Dalam beberapa tahun terakhir, tsunami telah berulang kali melanda wilayah pesisir Indonesia, menimbulkan dampak signifikan bagi masyarakat dan infrastruktur. Menurut BNPB (2020), Indonesia mencatat lebih dari 20 kejadian tsunami dalam dua dekade terakhir, yang sebagian besar dipicu oleh aktivitas seismik dan vulkanik.

Salah satu kejadian signifikan adalah tsunami Palu-Donggala pada 28 September 2018 yang diakibatkan oleh gempa bumi berkekuatan M 7.5 dan fenomena likuifaksi. Laporan dari BMKG (2018) mencatat gelombang tsunami mencapai ketinggian hingga 6 meter dalam waktu singkat, mengakibatkan lebih dari 4.000 korban jiwa dan kerusakan parah di pesisir Sulawesi Tengah. Selain itu, tsunami Selat Sunda pada 22 Desember 2018, yang dipicu oleh longsoran bawah laut akibat erupsi Gunung Anak Krakatau, menunjukkan bahwa tsunami tidak hanya dipicu oleh gempa bumi tetapi juga aktivitas vulkanik (LIPI, 2019)

Dalam lima tahun terakhir, simulasi pemecah gelombang tsunami dengan menggunakan software Delft3D telah banyak dilakukan untuk menganalisis dan memitigasi dampak gelombang tsunami di berbagai kawasan pesisir. Widodo et al. (2020) menyimulasikan kinerja pemecah gelombang di pesisir Jawa untuk mereduksi tinggi gelombang dan menunda waktu kedatangan tsunami. Studi lain oleh Rachman dan Prasetyo (2021) menunjukkan efektivitas pemecah gelombang dengan berbagai konfigurasi, seperti horizontal dan diagonal, dalam mengurangi energi gelombang tsunami di wilayah rawan bencana. Kurniawan et al. (2022) juga menggunakan Delft3D untuk memvalidasi ketinggian gelombang di lokasi terdampak dan merekomendasikan desain optimal pemecah gelombang yang dapat meminimalisir kerusakan. Secara keseluruhan, hasil dari berbagai simulasi ini menunjukkan bahwa pemecah gelombang diagonal umumnya lebih efektif dalam mengurangi tinggi gelombang dan memperlambat waktu kedatangan tsunami dibandingkan dengan model horizontal, meskipun implementasinya perlu mempertimbangkan kondisi lokasi secara spesifik untuk menghindari peningkatan gelombang di titik tertentu

Fenomena ini menegaskan urgensi mitigasi bencana tsunami melalui pemodelan dan analisis yang lebih mendalam. Penggunaan teknologi seperti Delft3D memungkinkan simulasi pola penyebaran dan reduksi gelombang tsunami secara numerik, serta evaluasi efektivitas struktur pelindung seperti offshore breakwater. Selain itu, pendekatan ini dapat membantu dalam perencanaan tata ruang wilayah pesisir, penguatan infrastruktur, dan penyusunan strategi evakuasi yang lebih tepat. Dengan demikian, penelitian terkait mitigasi tsunami menjadi langkah penting untuk meminimalkan risiko kerugian jiwa, ekonomi, dan kerusakan lingkungan di masa depan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode numerik untuk menyajikan dan menentukan solusi numerik, yang dalam hal ini bertujuan untuk memperoleh nilai pendekatan melalui model simulasi tsunami yang telah tervalidasi. Validasi dilakukan dengan parameter ketinggian seperti nilai strike, dip, slip, panjang, lebar patahan, serta kesalahan model. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memperoleh nilai pengurangan risiko tsunami melalui penerapan pemecah gelombang lepas pantai dengan dimodelkan diagonal dan horizontal.

Langkah Penelitian

Analisis Efektivitas Breakwater Horizontal Dan Diagonal Dalam Mereduksi Gelombang Tsunami Di Pantai Puger Menggunakan Simulasi Delft3d

Proses penelitian ini memiliki Langkah-langkah yaitu Pengumpulan data, Validasi, Penetapan titik tinjau lokasi, Desain pemecah gelombang lepas pantai, Penilaian efektivitas

1. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan untuk penelitian ini meliputi karakteristik tsunami Banyuwangi tahun 1994, tsunami Pangandaran tahun 2006, peta gempa Indonesia, serta data batimetri yang relevan dengan domain penelitian, yaitu data dari GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans).

2. Validasi

Simulasi awal dilakukan dengan menggunakan karakteristik yang serupa dengan data survei tsunami Banyuwangi tahun 1994 (Maramai dan Tinti, 1997). Data yang digunakan berupa ketinggian gelombang, dan parameter pendekatannya meliputi nilai strike, dip, slip, panjang sesar, serta lebar sesar. Parameter-parameter tersebut akan disesuaikan secara terus-menerus hingga hasil simulasi sesuai dengan data validasi yang ada.

3. Penetapan titik Observasi

Penentuan titik observasi didasarkan pada daerah rawan bencana dengan aktivitas manusia tinggi, seperti muara sungai yang menjadi jalur rayapan air laut ke kawasan padat penduduk, aktivitas nelayan, dan pasar ikan TPI Jember. Titik ini dianalisis menggunakan Green's Formula untuk mendekati perubahan tinggi gelombang akibat pendangkalan, sesuai prinsip Green's Law bahwa tinggi gelombang meningkat seiring berkurangnya kedalaman air menuju garis pantai (Green, 1838 dalam Mei, 1989).

4. Disain Breakwater

Pemodelan simulasi akan dibuat dengan 2 skenario berdasarkan disain breakwater dengan kondisi berada di laut lepas berjarak 3,5 km dari muara sungai. skenario 1 akan disimulasikan dengan disain breakwater horizontal terhadap pantai puger dan skenario 2 akan disimulasikan dengan disain breakwater diagonal terhadap pantai puger.

5. Penilaian efektivitas

Hasil penelitian akan disajikan dengan tampilan persentase yang merupakan hasil nilai reduksi maksimum pada waktu terjadinya tsunami dan ketinggian tsunami.

Hasil dan Pembahasan

Penentuan simulasi awal didasarkan pada data lokasi observasi yang diperoleh dari data survei yang disajikan pada tabel 1.

Tabel 1 Data survei tsunami tahun 1994

Lokasi	Koordinat		Data observasi
	<i>Latitude</i>	<i>longitude</i>	
Tanjung Pelindu	-8.32	113.32	3,2 m
Pantai Puger	-8.38	113.43	4,88-5,85 m
Pantai Watu Ulo	-8.44	113.56	6,5 - 7,5 m

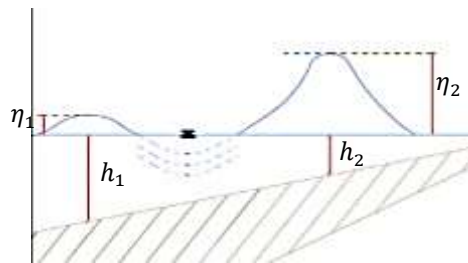
Analisis Efektivitas Breakwater Horizontal Dan Diagonal Dalam Mereduksi Gelombang Tsunami Di Pantai Puger Menggunakan Simulasi Delft3d

Simulasi validasi dilakukan berdasarkan data ketinggian tsunami dengan mengevaluasi parameter seperti strike, dip, slip, panjang sesar, dan lebar sesar. Data parameter tsunami banyuwangi 1994 tersaji pada tabel 2 berikut ini.

Tabel 2 Data survei tsunami tahun 1994

Nama	longitude (o)	latitude (o)	Magnitude (Mw)	Depth (Km)	Strike (o)	Dip (o)	Slip	Fault Length (Km)	Fault Width (Km)
Tsunami Banyuwangi 1994	112.835°	-10.477°	8	10	100	15	85	130	70

Hasil simulasi pada titik Observasi (OBS) akan dimasukkan pada rumus green formula. Berikut gambaran rumus green formula :



Gambar 1. Ihtisar perhitungan

$$\frac{\eta_2}{\eta_1} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{4}} \dots\dots\dots \text{persamaan 1.}$$

- Keterangan :
- η₁ = Tsunami Height in the sea (m)
 - η₂ = Tsunami Height in coastal area (m)
 - h₁ = Water Depth in the sea (η₁) (m)
 - h₂ = Water Depth in the sea (η₂) (m)

Hasil dari validasi pada 3 titik lokasi pengamatan tersaji pada tabel berikut :

Tabel 3 Validasi hasil simulasi tsunami tahun 1994

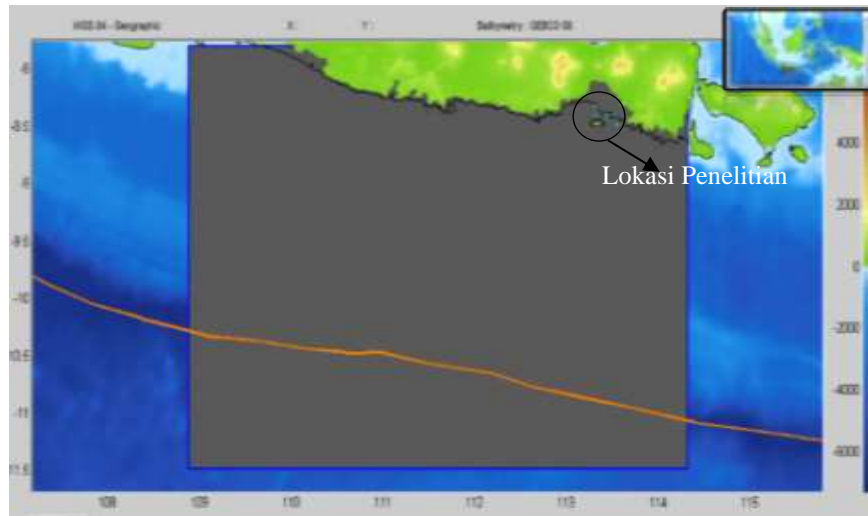
No	Lokasi	Koordinat		Data observasi	Hasil simulasi
		latitude	longitude		
1	Tanjung Pelindu	-8.32	113.32	3,2 m	3,42 m
2	Pantai Puger	-8.38	113.43	4,88-5,85 m	5,96 m
3	Pantai Watu Ulo	-8.44	113.56	6,5 - 7,5 m	7,15 m

Hasil simulasi menunjukkan ketinggian tsunami berkisar antara 3 meter hingga 7,15 meter, menandakan potensi bahaya tsunami yang masih perlu diwaspadai. Perbedaan reduksi antara data validasi dan data simulasi observasi di Pantai Watu Ulo berkisar antara 2 persen hingga 11 persen. Perbedaan ini kemungkinan dipengaruhi kurangnya ketelitian data lokasi dan dari faktor lain, seperti variasi pasang surut, angin musiman, dan kondisi lingkungan selama periode tersebut.

pemodelan simulasi diawali dengan pembuatan domain atau area kerja yang akan diteliti. Domain simulasi terdiri dari 1091 sel pada arah M dan 740 sel pada arah N atau luas daerah

Analisis Efektivitas Breakwater Horizontal Dan Diagonal Dalam Mereduksi Gelombang Tsunami Di Pantai Puger Menggunakan Simulasi Delft3d

penelitian adalah 250.166,33348 km. Ukuran setiap sel adalah 0,005 x 0,005 derajat. Berikut domain dari area yang akan diteliti pada gambar 2.



Gambar 2. Domain penelitian

Langkah selanjutnya menentukan titik pengukuran Observasi (OBS) di daerah muara sungai. Hal ini dilakukan guna mengukur kecepatan dan ketinggian tsunami setelah melewati breakwater tersebut. Fungsi dari titik ini adalah untuk mengetahui reduksi dari beberapa pemodelan Pemecah gelombang yang akan dilakukan sebelum masuk ke area muara sungai dengan mempertimbangkan waktu tiba tsunami sebagai waktu evakuasi dan ketinggian tsunami sebagai bahaya. Titik OBS ini berbeda dengan Titik validasi tsunami, titik ini ditempatkan pada daerah muara sungai



Gambar 3. Titik observasi muara sungai

Maka didapatkan 3 lokasi titik OBS baru tersaji pada tabel 4.

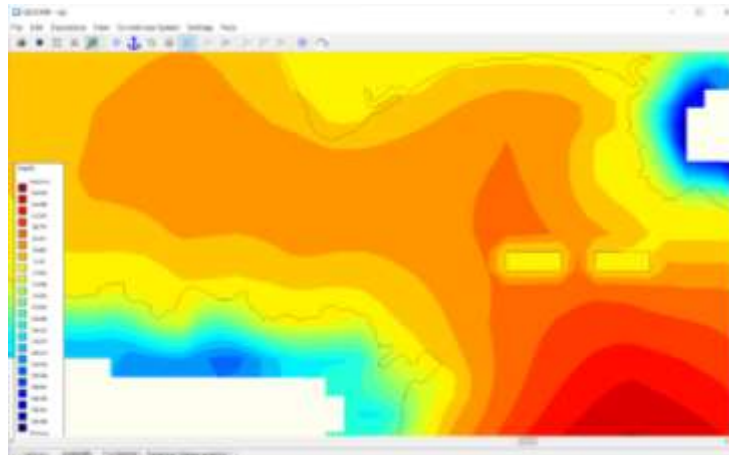
Tabel 4. Lokasi OBS 1,2 dan 3 berdasarkan koordinat

No	Lokasi	Koordinat		Sel Koordinat		Kedalaman
		latitude	longitude	M	N	Z
1	OBS 1	-8.4059	113.4141	918	623	0,01 m
2	OBS 2	-8.3887	113.4679	918	622	11,35 m

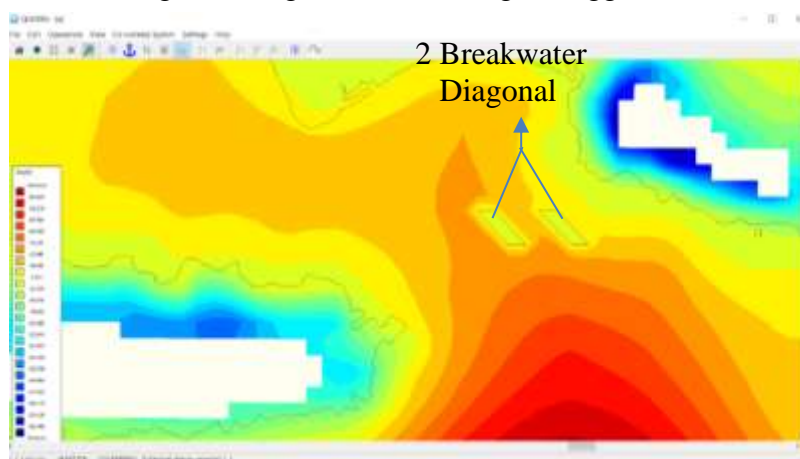
Analisis Efektivitas Breakwater Horizontal Dan Diagonal Dalam Mereduksi Gelombang Tsunami Di Pantai Puger Menggunakan Simulasi Delft3d

3 OBS 3 -8.3940 113.4653 918 621 18,39 m

Pemodelan terbagi dalam 2 skenario pada peletakan pemecah gelombang sehingga nantinya akan terlihat efektif tidaknya pemecah gelombang dalam mengurangi kecepatan dan ketinggian tsunami. Pemodelan menggunakan simulasi tsunami skenario tsunami banyuwangi 1994 dengan waktu simulasi yaitu 1 jam. Simulasi pertama yaitu pemodelan pemecah gelombang Horizontal dan terletak pada kedalaman minus 5 M dari permukaan air laut (SWL) dan dilanjutkan dengan simulasi kedua yaitu pemecah gelombang diagonal.



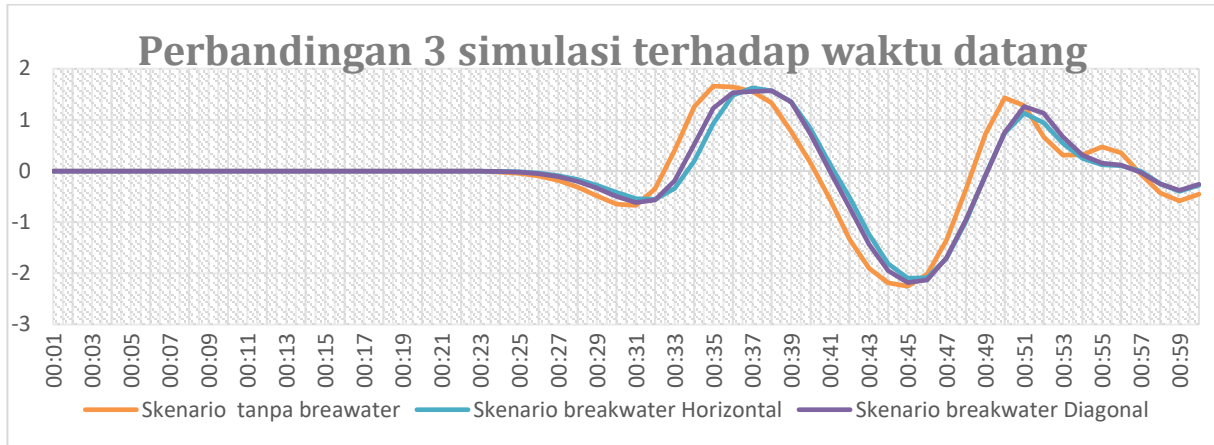
Gambar 4. Pemecah gelombang Horizontal dengan tinggi -5 meter dari permukaan air laut



Gambar 5. Pemecah gelombang Diagonal dengan tinggi -5 meter dari permukaan air laut

Dimensi pemecah gelombang adalah 3 sel dan pada 1 sel yang memiliki panjang 500 m artinya panjang breakwater 500x1500 m. dengan jumlah pemecah gelombang 2. Dimensi Breakwater diagonal memiliki 4 sel dengan hanya setengah yang terpenuhi yang artinya memiliki 2 sel sehingga Panjang pemecah gelombang 500 x 1000 meter dengan jumlah 2 pemecah gelombang.

Hasil dari simulasi pemecah gelombang horizontal dan diagonal dapat memberikan dapat reduksi pada waktu sampai tsunami dan tinggi gelombang tsunami. Perhitungan untuk waktu dapat terlihat dari time step yang telah di seting selama 1 jam. Pengukuran terhadap tinggi gelombang tsunami ditranformasikan terlebih dahulu dengan menggunakan rumus green formula untuk mendapatkan pendekatan tinggi gelombang dilepas pantai ketika akan berada di darat sesuai titik observasi yang telah ditentukan. Hasil dari simulasi akan disajikan dalam grafik gambar 6.



Gambar 6. Perbandingan waktu pada titik Observasi 1

Dari hasil simulasi pada titik Observasi 1 dapat terlihat efektifitas dari kedua jenis breakwater. Selanjutnya data tinggi ketinggian gelombang tsunami tersebut diolah untuk mendapatkan kondisi tinggi gelombang tsunami di darat. Data tersaji pada tabel 5.

Tabel 5. Perbandingan simulasi pemecah gelombang

No	Lokasi	Skenario validasi		Pemecah gelombang Horizontal		Pemecah gelombang Diagonal	
		Waktu (Menit)	Ketinggian (meter)	Waktu (Menit)	Ketinggian (meter)	Waktu (Menit)	Ketinggian (meter)
1	OBS 1	39 m	1.3384 m	40 m	1.2427 m	40 m	1.2560 m
2	OBS 2	35 m	5.4140 m	37 m	5.3046 m	38 m	5.1205 m
3	OBS 3	35 m	5.9103 m	37 m	5.8340 m	37 m	6.1097 m

Pemodelan menggunakan pemecah gelombang (*breakwater*) horizontal dan pemecah gelombang diagonal memiliki angka efektivitas yang berbeda-beda. Dari 3 data observasi didapatkan data rata-rata persentase pengurangan waktu dan tinggi pada jenis simulasi pemecah gelombang. Pemecah gelombang horizontal dapat memberikan persentase pengurangan waktu hingga 5% dan dapat memberikan penurunan tinggi gelombang hingga 3,4%. Sedangkan pemecah gelombang Diagonal dapat lebih efektif pada titik OBS 1 dan 2 tetapi mengalami peningkatan tinggi pada OBS 3. Berdasarkan hasil kajian mengenai kerutuhan Pemecah gelombang terhadap tsunami yang pernah terjadi di jepang yaitu dari jurnal “The Effect of Offshore Barriers on the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Tsunamis Earthquakes and Lessons Learned, maka dimodelkan pemecah gelombang yang berbentuk diagonal. Pemecah gelombang di sini diharapkan mampu mengurangi kecepatan dan ketinggian serta dapat juga membelokan arah gelombang. Hasil dari simulasi direkomendasikan untuk menggunakan pemecah gelombang horizontal dikarenakan dari titik tinjau tetap bisa stabil dalam mengurangi reduksi gelombang tsunami. Berdasarkan kajian mengenai keruntuhan Pemecah gelombang kamaishi akibat tsunami di jepang yang menyebutkan bahwa laju pengurangan dari tekanan hidrostatik pada permukaan belakang dari pemecah gelombang kamaishi menjadi sekitar 10%, dan gerusan yang melimpah memiliki dampak yang sangat besar pada koefisien gesekan (Taro Akinawa, Dkk. 2012), maka

Analisis Efektivitas Breakwater Horizontal Dan Diagonal Dalam Mereduksi Gelombang Tsunami Di Pantai Puger Menggunakan Simulasi Delft3d

dimodelkan pemecah gelombang yang berbentuk diagonal. Pemecah gelombang di sini diharapkan mampu mengurangi kecepatan dan ketinggian serta dapat juga membelokan arah gelombang.

KESIMPULAN

Pemodelan pemecah gelombang horizontal dan diagonal menunjukkan efektivitas dapat mengurangi tinggi dan kecepatan datang gelombang tsunami. Tetapi terdapat perbedaan pada titik observasi 3 dimana pembelokan akibat reduksi menambahkan tinggi gelombang tsunami. Hal ini memberikan perberbedaan yang signifikan dalam mengurangi dampak tsunami. Berdasarkan data observasi, pemecah gelombang horizontal mampu mengurangi waktu kedatangan tsunami hingga 5% dan ketinggian gelombang hingga 3,4%, serta cenderung memberikan hasil yang lebih stabil di semua titik observasi (OBS). Sementara itu, pemecah gelombang diagonal menunjukkan keunggulan pada beberapa titik (OBS 1 dan OBS 2), tetapi justru mengalami peningkatan tinggi gelombang di OBS 3.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG). (2018). Laporan Tsunami Palu-Donggala 28 September 2018. Jakarta: BMKG.
- Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB). (2020). Kejadian Tsunami di Indonesia: Tinjauan Bencana Alam 2020. Jakarta: BNPB.
- Green, G. (1838). On the motion of waves in shallow water. Cambridge Philosophical Society.
- Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI). (2019). Tsunami Selat Sunda: Dampak dan Penyebab. Jakarta: LIPI.
- Mei, C. C. (1989). The Applied Dynamics of Ocean Surface Waves. World Scientific Publishing.
- Rikarda, R. D. E., Wiyono, R. U. A., Halik, G., Hidayah, E., & Pratama, M. B. (2020). Tsunami simulation in Puger Beach considering the combination of earthquake source in South Java. AIP Conference Proceedings, 2278(1).
- Röbke, B. R., Leijnse, T., Winter, G., van Ormondt, M., van Nieuwkoop, J., & de Graaff, R. (2021). Rapid assessment of tsunami offshore propagation and inundation with D-FLOW Flexible Mesh and SFINCS for the 2011 Tōhoku tsunami in Japan. Journal of Marine Science and Engineering, 9(5), 453.
- Sulaiman, M. (2019). Simulasi numerik perubahan morfologi pantai akibat konstruksi jetty pada muara Lambada Lhok Aceh Besar menggunakan software Delft3D. Jurnal Teknik Sipil, 8(1), 15-25
- Suryanto, S. (2017). Seri pemecah gelombang modifikasi di pesisir untuk pengurangan energi gelombang tsunami. Jurnal Teknik Sipil, 23(1), 45-52.
- Suryanto, S., & Suryani, D. (2020). Analisis perencanaan bangunan pemecah gelombang dengan menggunakan data gelombang angin, pasang surut, transport sedimen, dan peta bathimetri. Jurnal Teknik Sipil, 26(2), 123-130.
- Waluyo, S. (2007). Asesmen terhadap berat batu lapis pelindung pemecah gelombang pada PLTU Adipala. Jurnal Teknik Sipil, 14(2), 1-10.