

SIMULASI REDUKSI GELOMBANG MENGGUNAKAN SOFTWARE DELFT3D PADA HUTAN MANGROVE PANTAI DUBIBIR KABUPATEN SITUBONDO

Raden Denisio Edwin Rikarda^{1*}, Muhammad Alfaridzi², Retno Utami Agung Wiyono³, Abdur
Rohman⁴, Gusfan Halik⁵

^{1,2,3,4,5}Program Studi Teknik Sipil, Universitas Jember, Jember, Indonesia

*Penulis korespondensi: rdenisio@unej.ac.id

ABSTRAK

Wilayah pesisir rentan terhadap gelombang tinggi, abrasi, dan banjir rob yang mengancam lingkungan serta infrastruktur pantai. Salah satu upaya perlindungan pesisir yang berkelanjutan adalah konsep *building with nature* melalui pemanfaatan ekosistem mangrove sebagai pelindung alami pantai. Penelitian ini dilakukan di Pantai dubibir, Kecamatan suboh, Kabupaten situbondo, yang memiliki hutan mangrove sepanjang ± 2 km dengan lebar sekitar 250 m dan didominasi oleh jenis rhizophora sp. Lokasi penelitian dipilih karena beberapa bangunan tangkis gelombang yang tidak terlindungi mangrove mengalami kerusakan akibat gelombang tinggi dan banjir rob. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas mangrove dalam mereduksi tinggi gelombang sebagai bentuk perlindungan pantai berbasis ekosistem. Metode yang digunakan adalah pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak delft3d untuk mensimulasikan propagasi gelombang sebelum dan sesudah melewati kawasan mangrove. Data yang digunakan adalah data angin periode 2012–2021 yang diperoleh dari bmkg serta data batimetri dari batnas dan demnas. Data tersebut diolah untuk memperoleh karakteristik angin dominan, kondisi kedalaman perairan, dan topografi pesisir yang kemudian digunakan sebagai data masukan dalam pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak delft3d. Analisis dilakukan pada empat titik observasi yang mewakili kondisi lapangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa keberadaan mangrove mampu mereduksi tinggi gelombang secara signifikan dengan nilai reduksi pada titik observasi a, b, c, dan d berturut-turut sebesar 55%, 43%, 47%, dan 40%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hutan mangrove efektif sebagai *green infrastructure* dalam meningkatkan ketahanan pesisir terhadap gelombang tinggi dan banjir rob serta mendukung penerapan konsep *building with nature* untuk perlindungan dan pengelolaan pesisir berkelanjutan.

Kata kunci: *Building with Nature*, Pantai Dubibir, Perangkat Lunak DELFT3D, Reduksi Tinggi Gelombang, Rhizophora sp

1 PENDAHULUAN

Mangrove merupakan tumbuhan yang mampu bertahan hidup di daerah pesisir intertidal dengan tingkat salinitas tinggi, fluktuasi pasang surut air laut, serta kondisi berlumpur dan anaerobik akibat kejenuhan pasang surut air (Friess et al., 2022). Meskipun ekosistem ini rentan dan menghadapi tekanan akibat perubahan iklim, masih sedikit masyarakat yang menyadari bahwa mangrove dapat dimanfaatkan dalam bidang konstruksi, khususnya teknik sipil (Herison et al., 2021). Pemanfaatan fungsi struktural ini menjadi sangat relevan mengingat wilayah pesisir di seluruh dunia kini terancam oleh penurunan muka tanah dan kenaikan permukaan laut. Hal ini menuntut adanya transisi dari pendekatan teknik konvensional yang kurang berkelanjutan menuju konsep inovatif seperti Building with Nature (BwN), yang mampu mengintegrasikan perlindungan pantai dengan nilai ekologis serta fungsi sosial-ekonomi (van Wesenbeeck et al., 2022).

Pendekatan Building with Nature (BwN) secara aktif menggunakan elemen alam untuk mengatasi masalah pesisir, contohnya menjadikan mangrove sebagai pemecah gelombang alami sekaligus kawasan ekosistem baru yang diukur efektivitas sedimentasinya melalui pemodelan simulasi gelombang (Winterwerp et al., 2021). Konsep ini telah terbukti berhasil di Demak, di mana struktur permeabel dari kayu semak dan bambu dibangun untuk meredam gelombang dan menjebak sedimen agar bibit bakau dapat tumbuh normal (Tonneijck et al., 2023). Untuk mendukung konsep rekayasa seperti ini, penggunaan perangkat lunak seperti DELFT3D sangat krusial sebagai proksi dalam mendefinisikan serta memodelkan rencana alternatif bangunan pantai yang tepat guna mengatasi abrasi dan banjir rob (Pratama et al., 2024; Wiyono et al., 2024).

Sebagai bentuk kajian lebih lanjut mengenai pemodelan dan potensi perlindungan pesisir ini, penelitian mengambil lokasi di sebuah objek wisata di Kecamatan Suboh, Kabupaten Situbondo. Hutan mangrove di kawasan ini memiliki panjang 1 km dan lebar 250 meter, membentang tepat di dekat area perumahan penduduk dengan dominasi jenis bakau *Rhizophora* sp., yakni tumbuhan tropis yang bersifat halofit (halophytic) atau toleran terhadap garam (Rahim & Baderan, 2017). Efektivitas kawasan mangrove semacam ini dalam melindungi pantai didukung oleh penelitian Taofiqurohman et al. (2022) yang membuktikan bahwa keberadaan hutan mangrove (bersama struktur pelindung) sukses meredam abrasi secara drastis dengan menurunkan tinggi gelombang dari 1,7 meter menjadi 0,1 meter, di mana hasil ini menjadi landasan kuat untuk dikembangkan lebih lanjut menggunakan perangkat lunak bantu masa kini seperti DELFT3D.

Pemilihan lokasi penelitian ini didasarkan pada tingginya frekuensi gelombang tinggi dan banjir rob yang mengakibatkan kerusakan di beberapa titik tangkis gelombang pesisir pantai, terutama pada musim penghujan yang menjadi masa kesiapsiagaan bagi masyarakat di sekitar Pantai Dubibir, Suboh, Situbondo, berdasarkan pemaparan pihak pengelola serta warga setempat. Permasalahan nyata tersebut dijadikan sebagai dasar utama penelitian dengan mengadopsi metode perhitungan dari studi terdahulu. Dalam mendeteksi seberapa efektif hutan mangrove dalam mereduksi energi gelombang tersebut, peneliti diwajibkan melakukan uji coba langsung terhadap karakteristik fisik vegetasi mangrove, yang meliputi pengukuran diameter batang, dimensi akar, serta tingkat kerapatan atau porositas pohon (Jati, 2022).

2 METODE

Penelitian ini berlokasi di Kecamatan Suboh, Kabupaten Situbondo, Provinsi Jawa Timur, yang memiliki luas wilayah sekitar 31,92 km². Kecamatan Suboh merupakan salah satu kawasan pesisir yang memiliki potensi wisata pantai serta ekosistem mangrove yang tumbuh di sepanjang garis pantai sebagai bentuk perlindungan alami terhadap abrasi dan gelombang laut (Wiyono et al., 2024). Salah satu lokasi yang menjadi fokus penelitian adalah Pantai Dubibir yang didominasi oleh vegetasi mangrove jenis *Rhizophora* sp. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada tingginya kerentanan wilayah terhadap gelombang pasang, angin kencang, dan banjir rob yang sering terjadi pada musim penghujan. Kondisi tersebut telah menyebabkan kerusakan pada beberapa bangunan pelindung pantai serta genangan air yang memasuki kawasan permukiman masyarakat pesisir, terutama pada periode November hingga Februari (Pratama et al., 2024). Oleh karena itu, wilayah ini dinilai representatif untuk mengkaji efektivitas mangrove dalam mereduksi tinggi gelombang sebagai bagian dari upaya perlindungan pesisir berbasis ekosistem.

2.1 Pengumpulan dan Pengolahan Data

Data utama yang dibutuhkan dalam penelitian ini berupa data batimetri yang diperoleh dari Batimetri Nasional (BATNAS) dan data topografi dari Digital Elevation Model Nasional

(DEMNAS). Data batimetri digunakan untuk menggambarkan kondisi kedalaman dasar laut yang berpengaruh terhadap transformasi gelombang sebelum mencapai pantai, sedangkan data topografi digunakan untuk merepresentasikan kondisi daratan pada area penelitian. Data angin diperoleh dari ERA-Interim (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts / ECMWF) atau dari data observasi yang tersedia pada situs resmi BMKG. Selanjutnya, data spasial tersebut diolah menggunakan perangkat lunak QGIS dan diintegrasikan ke dalam modul Delft3D-QUICKIN untuk membangun model batimetri dan topografi wilayah studi. Integrasi data batimetri dan topografi dalam pemodelan hidrodinamika telah banyak digunakan untuk meningkatkan akurasi simulasi gelombang, arus, dan proses pantai pada kawasan pesisir (Lesser et al., 2004; Deltares, 2023).

2.1.1 Data Angin

Data angin yang digunakan sebagai input pemodelan gelombang diperoleh dari data angin selama periode 10 tahun (2012–2021) yang bersumber dari BMKG atau basis data meteorologi ECMWF. Data angin meliputi kecepatan dan arah angin yang direkam secara periodik untuk merepresentasikan kondisi meteorologi pada lokasi penelitian. Kecepatan angin umumnya dinyatakan dalam satuan knot, dimana 1 knot setara dengan 1,852 km/jam atau 0,5144 m/s. Selanjutnya, data angin diolah untuk menentukan kecepatan angin maksimum, arah angin dominan, serta karakteristik angin rata-rata yang digunakan sebagai parameter pembangkit gelombang pada pemodelan hidrodinamika dan transformasi gelombang di wilayah pesisir (BMKG, 2023; ECMWF, 2023).

2.1.2 Data Batimetri

Integrasi data spasial kedalaman laut dilakukan dengan memanfaatkan data dari website resmi Batimetri Nasional (BATNAS) (Badan Informasi Geospasial, 2018), dimana data ini menggunakan titik koordinat di laut utara Jawa kabupaten Situbondo. Untuk mengetahui kedalaman dasar laut dan mengidentifikasi kekuatan gelombang dari data angin dan kedalaman laut yang akan di input dalam software yang akan digunakan dalam hal ini aplikasi *DELFT3D*. setelah mengetahui kedalaman dasar laut dengan menggunakan data Batimetri kita dapat mengetahui seberapa kuat dan cepat gelombang oleh angin dari kedalaman dasar laut tertentu sebelum mencapai titik pantai.

2.2 Simulasi DELFT3D

Simulasi dilakukan dengan menggunakan *DELFT3D-FLOW*. Area simulasi terdiri dari pembuatan grid pada menu *RGFGRID*. Selain itu, diperlukan tambahan data input untuk menjalankan proses simulasi.

2.2.1 Pembuatan Grid

Tahapan akhir dari pemodelan numerik ini melibatkan pemrosesan jaring pada modul *RGFGRID* dan interpolasi data kedalaman dasar laut (Hashim et al., 2019). Grid digunakan dalam pemodelan koordinat, dan dari tujuan *RGFGRID* adalah memodifikasi, memvisualisasikan, serta rasterize *DELFT3D-FLOW*. Pemodelan grid menggunakan ukuran 4 x 4 m dengan koordinat pada area kritis pesisir pantai dekat vegetasi mangrove, lalu meluas secara gradual menjadi 8 x 8 meter pada area tengah, hingga 14 x 14 meter pada batas laut lepas..

2.2.2 Input Data Kedalaman

Data kedalaman merupakan data yang digunakan untuk input bathimetri pada sistem *DELFT3D-FLOW*. Sebagai input, data kedalaman bertanda positif (+) digunakan sebagai data kedalaman di laut, sedangkan yang bertanda negatif (-) digunakan sebagai data elevasi di darat. Dari hasil pengukuran kedalaman nasional oleh BIG (Geospatial Information Administration),

data diperoleh dalam format *.tiff, kemudian dikonversi ke xyz oleh perangkat lunak pemetaan global, diekspor ke textpad dan disimpan sebagai *.xyz. Data dalam format *.xyz.

2.2.3 Description

Description merupakan teks yang digunakan untuk menjabarkan informasi tentang uji coba yang sedang berlangsung untuk menjelaskan tujuan dari simulasi yang akan dilaksanakan

2.2.4 Domain

Domain adalah area model yang ditinjau untuk area simulasi. Cakupan area domain pada area simulasi. Dua skenario yang digunakan dalam simulasi ini yaitu dengan menggunakan Hutan *Mangrove* dan tanpa Hutan *Mangrove*. Grid parameters merupakan sub-data untuk memasukkan data grid yang dibuat oleh *RGFGRID* dan menentukan jenis koordinat yang akan digunakan. Jenis koordinat yang digunakan adalah koordinat lingkaran.

2.2.5 Time Frame

Time Frame adalah menu yang membantu memberikan informasi tentang awal simulasi dan mencatat setiap generasi yang terjadi dalam jarak tertentu. Sub-data *Time Frame* terdiri dari:

1. *References date* ialah sub-data yang berisikan tanggal uji coba yang dilakukan. Sedangkan start time ialah awal mula terjadinya uji coba.
2. Simulation stop time ialah uji coba dengan isi mengenai tanggal dan waktu terakhir terjadinya ujicoba.
3. *Time step* ialah berisikan interval waktu yang akan diukur atau diperhitungkan waktunya

2.2.6 Boundaries

Boundaries adalah toolbar yang menyediakan data tentang batas model saat ini dan semua hal yang dibutuhkan untuk pemodelan. Pada Boundaries , peneliti dapat mengisi nilai batas dari data pasut sebagai komponen pasut

2.2.7 Physical parameters

Physical parameters adalah parameter fisik yang terkait dengan keadaan daerah model. Parameter yang digunakan dalam simulasi ini adalah konstanta.

2.2.8 Monitoring

Monitoring dalam pemodelan ini hanya menggunakan data observasi. Observasi untuk mengukur setiap titik pada lokasi yang dipilih

2.2.9 Output

Output digunakan untuk mengatur hasil simulasi yang sudah dilakukan atau yang akan dilakukan.

2.2.10 Perhitungan Energi Gelombang

Energi gelombang adalah jumlah energi kinetik dengan energi potensial. Energi kinetik (EK) adalah energi yang disebabkan oleh kecepatan partikel air akibat gerak gelombang. Energi potensial (PE) adalah energi yang dapat ditimbulkan oleh pergerakan muka air yang disebabkan oleh gelombang. Jadi dapat diketahui persamaan sebagai berikut:

$$E = E_k + E_p = \frac{pgH^2L}{16} + \frac{pgH^2L}{16} = \frac{pgH^2L}{8} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dari persamaan diatas dapat diperoleh rerata untuk satuan luas ialah:

$$E = \frac{pgH^2L}{8} \dots\dots\dots(2.2)$$

Maka

$$E_i = \frac{pgH_i}{8} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$E_t = \frac{pgH_t}{8} \dots\dots\dots(2.4)$$

$$E_r = \frac{pgH_r}{8} \dots\dots\dots(2.5)$$

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data hidrodinamika diawali dengan pengumpulan data angin historis selama 10 tahun (2012–2021) yang diperoleh dari Stasiun Meteorologi BMKG Kalianget, Sumenep. Data tersebut dianalisis menggunakan metode wind rose untuk mengidentifikasi arah dan frekuensi angin dominan. Hasil analisis menunjukkan bahwa angin dominan yang memengaruhi perairan Pantai Dubibir berasal dari arah timur (East) dengan frekuensi kejadian sebanyak 1.013 kali selama periode pengamatan. Arah angin dominan tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan effective fetch sebagai dasar pembangkitan gelombang. Hasil perhitungan menunjukkan panjang fetch efektif sebesar 120,72 km dengan kecepatan angin maksimum terkoreksi sebesar 21 m/s. Berdasarkan metode hindcasting, diperoleh karakteristik gelombang ekstrem berupa tinggi gelombang signifikan (H_s) sebesar 5,0 m dengan periode puncak (T_p) sebesar 9,38 detik, yang merepresentasikan kondisi gelombang dominan di wilayah penelitian (ECMWF, 2023; BMKG, 2023).

Hasil survei lapangan menunjukkan bahwa kawasan pesisir Pantai Dubibir didominasi oleh vegetasi mangrove jenis *Rhizophora* sp. yang berperan sebagai pelindung alami pantai melalui mekanisme peredaman energi gelombang (Friess et al., 2022; Taofiqurohman et al., 2022). Struktur vegetasi mangrove terdiri atas batang, tajuk, dan sistem akar yang mampu meningkatkan hambatan hidrodinamika terhadap aliran dan gelombang. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan, jarak antar pohon mangrove relatif seragam dengan rata-rata sekitar 3 m. Karakteristik fisik tersebut kemudian direpresentasikan dalam model numerik melalui parameter kekasaran (roughness coefficient) untuk menggambarkan pengaruh vegetasi terhadap reduksi energi gelombang dan perubahan pola aliran di kawasan pesisir (Herison et al., 2021; Jati, 2022).

Tahapan pemodelan hidrodinamika dilakukan menggunakan perangkat lunak Delft3D melalui beberapa tahapan, yaitu pengolahan data batimetri dari Batimetri Nasional (BATNAS), pembuatan model elevasi menggunakan QGIS, serta pembangkitan grid komputasi menggunakan modul RGFRID. Grid model dirancang dengan bentuk ortogonal dan resolusi yang disesuaikan dengan karakteristik wilayah penelitian, yaitu $4\text{ m} \times 4\text{ m}$ pada area mangrove dan pesisir kritis, kemudian diperbesar secara bertahap menjadi $8\text{ m} \times 8\text{ m}$ dan $14\text{ m} \times 14\text{ m}$ ke arah perairan yang lebih dalam. Simulasi numerik dijalankan menggunakan coupling antara modul DELFT3D-FLOW dan DELFT3D-WAVE untuk mensimulasikan interaksi antara arus, pasang surut, dan gelombang. Parameter fisik yang digunakan meliputi percepatan gravitasi sebesar $9,81\text{ m/s}^2$, densitas air laut sebesar 1.025 kg/m^3 , serta koefisien kekasaran Manning sebesar 0,08 yang merepresentasikan kondisi vegetasi mangrove pada area penelitian. Integrasi kedua modul tersebut memungkinkan simulasi yang lebih akurat dalam mengevaluasi efektivitas mangrove sebagai pelindung alami pantai terhadap gelombang tinggi dan banjir rob (Lesser et al., 2004; Deltares, 2023; van Wesenbeeck et al., 2022).

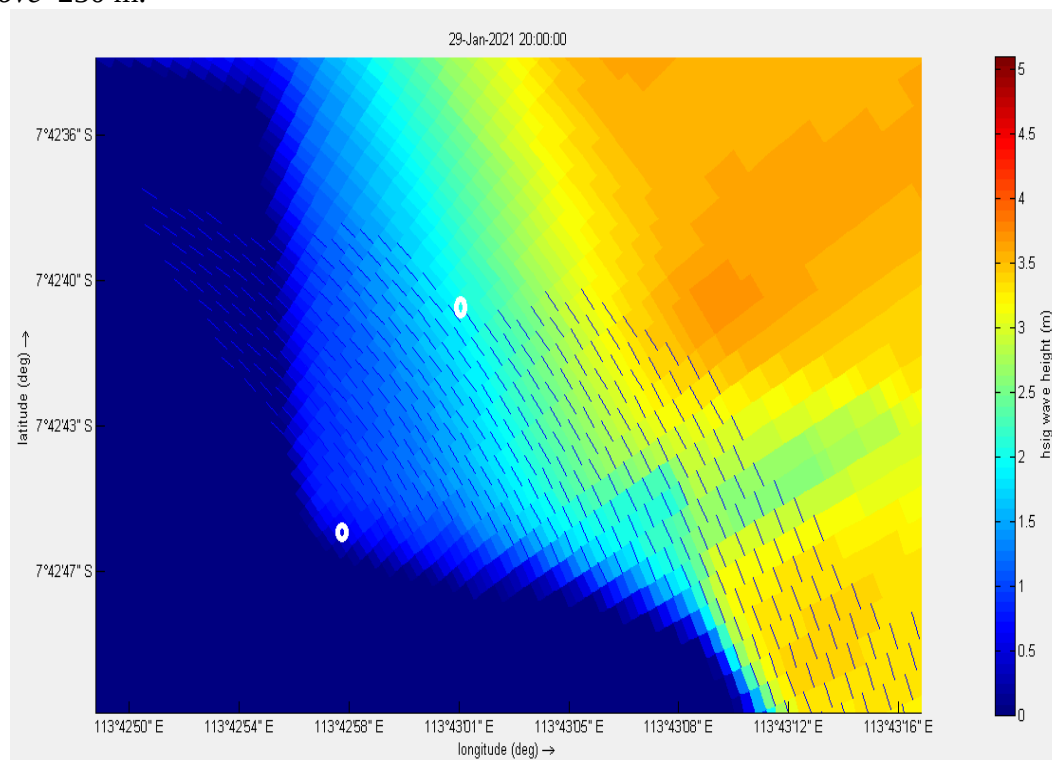
3.1 Hasil Reduksi Gelombang

Simulasi dilakukan dengan 2 skenario yaitu di sebelum mangrove dan setelah mangrove, dengan menggunakan 4 titik observasi yang akan diukur reduksi yang terjadi pada lokasi tersebut menggunakan Software *DELFT3D*. Setelah melakukan beberapa setting parameter dan input data yang sudah dilakukan sebelumnya dan menghasilkan reduksi seperti berikut :

Tabel 1. Hasil reduksi gelombang pada titik observasi A

Titik Observasi A				
No.	Parameter	Satuan	Hasil	
			Obs Depan <i>Mangrove</i>	Obs Belakang <i>Mangrove</i>
1	Tinggi gelombang	meter	2.1084	0.9584
2	Periode Gelombang	detik	10.3526	10.7209
3	Panjang Gelombang	meter	58.2577	42.5230
4	tinggi Muka Air	meter	0.8888	0.82342
5	Energi Gelombang	Joule	150470	49925
6	Reduksi Tinggi Gelombang	meter	1.1500	
7	Persentase Reduksi Tinggi Gelombang	%	55	
8	Reduksi Energi Gelombang	Joule	100545	
9	Persentase Reduksi Energi	%	67	

Berdasarkan tabel diatas dapat diketahui bahwa terjadi terjai reduksi tinggi gelombang sebesar 55% dan energi gelombang sebesar 67% pada titik observasi A yang memiliki ketebalan *mangrove* 250 m.



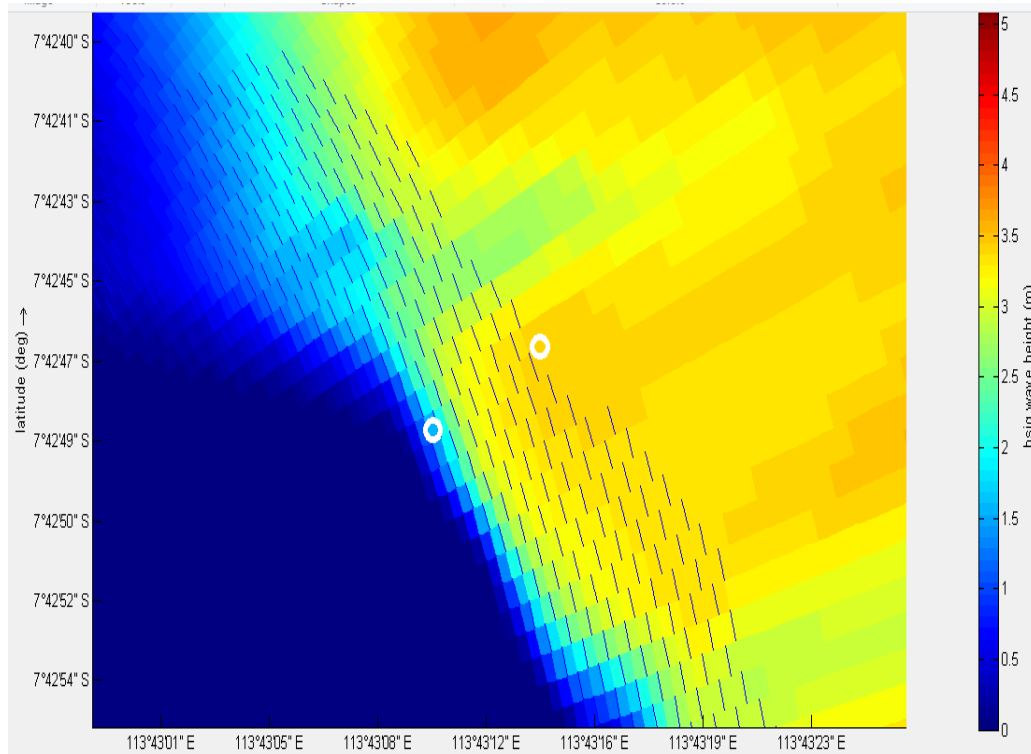
Gambar 1. Tinggi gelombang signifikan di titik observasi A

Berdasarkan tabel pada titik Observasi B diketahui bahwa terjadi terjadi reduksi tinggi gelombang sebesar 43% dan energi gelombang sebesar 63% pada titik observasi B yang memiliki ketebalan *mangrove* 150 m. dapat dilihat dari tabel berikut ini :

Tabel 1. Hasil reduksi gelombang pada titik observasi B

Titik Observasi B				
No.	Parameter	Satuan	Hasil	
			Obs Depan <i>Mangrove</i>	Obs Belakang <i>Mangrove</i>
1	Tinggi gelombang	meter	3.2748	1.8722
2	Periode Gelombang	detik	9.3638	10.1164
3	Panjang Gelombang	meter	64.8453	37.4522
4	tinggi Muka Air	meter	0.4635	0.4325
5	Energi Gelombang	Joule	260139	95070
6	Reduksi Tinggi Gelombang	meter	1.4026	
7	Persentase Reduksi Tinggi Gelombang	%	43	
8	Reduksi Energi Gelombang	Joule	165068	
9	Persentasi Reduksi Energi	%	63	

Diketahui penurunan reduksi gelombang terjadi sebesar 165068 dengan persentase penurunan sebesar 63%.



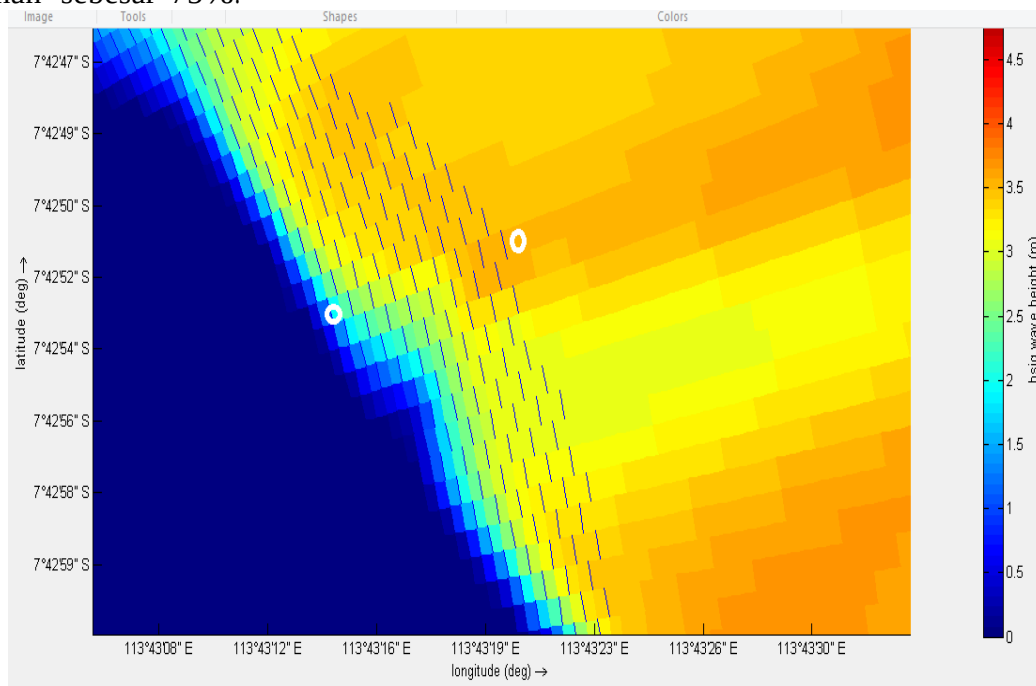
Gambar 1. Tinggi gelombang signifikan di titik observasi B

Selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap Lokasi Observasi di titik C dengan hasil pada tabel berikut :

Tabel 3. Hasil reduksi gelombang pada titik observasi C

Titik Observasi C				
No.	Parameter	Satuan	Hasil	
			Obs Depan <i>Mangrove</i>	Obs Belakang <i>Mangrove</i>
1	Tinggi gelombang	Meter	3.6219	1.9118
2	Periode Gelombang	Detik	9.2351	9.72886
3	Panjang Gelombang	Meter	75.9895	35.5928
4	tinggi Muka Air	Meter	0.6327	0.57310
5	Energi Tinggi Gelombang	Joule	337156	83357
6	Reduksi Tinggi Gelombang	Meter	1.7101	
7	Persentase Reduksi Tinggi Gelombang	%	47	
8	Reduksi Energi Gelombang	Joule	253799	
9	Persentase Reduksi Energi	%	75	

Diketahui penurunan reduksi gelombang terjadi sebesar 253799 dengan persentase penurunan sebesar 75%.



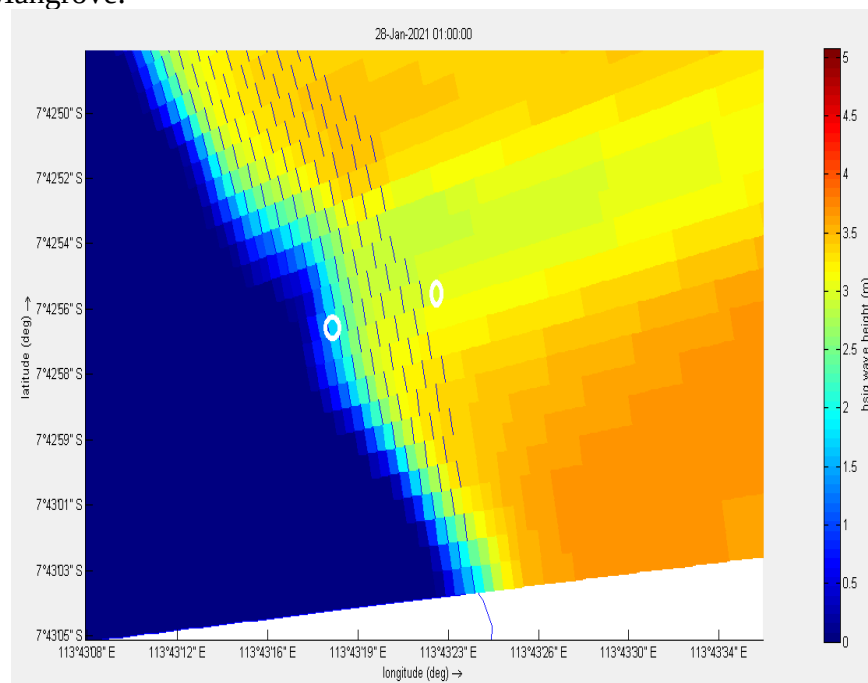
Gambar 2. Tinggi gelombang signifikan di titik observasi C

Selanjutnya dilakukan pengecekan terhadap Lokasi Observasi di titik D dengan hasil pada tabel berikut:

Tabel 4. Hasil reduksi gelombang pada titik observasi D

Titik Observasi D				
No.	Parameter	Satuan	Hasil	
			Obs Depan <i>Mangrove</i>	Obs Belakang <i>Mangrove</i>
1	Tinggi gelombang	meter	3.4883	2.1086
2	Periode Gelombang	detik	9.7093	9.4701
3	Panjang Gelombang	meter	69.7886	36.7750
4	tinggi Muka Air	meter	0.4322	0.41103
5	Energi Gelombang	Joule	298221	94992
6	Reduksi Tinggi Gelombang	meter	1.3797	
7	Persentase Reduksi Tinggi Gelombang	%	40	
8	Reduksi Energi Gelombang	Joule	203228	
9	Persentasi Reduksi Energi	%	68	

Berdasarkan tabel diatas dapat diperoleh data tinggi gelombang sebelum adanya Mangrove dan setelah adanya Mangrove pada titik observasi D yang memiliki ketebalan mangrove sebesar 100 m memiliki persentase reduksi sebesar 40% untuk menghitung besar energi gelombang yang terjadi pada titik observasi sebelum adanya Mangrove dan sesudah adanya reduksi oleh Mangrove.



Gambar 4. Tinggi gelombang signifikan di titik observasi D

Diketahui penurunan reduksi gelombang terjadi sebesar 203228 J dengan persentase penurunan sebesar 68%. Dari setiap hasil simulasi diatas dapat dilihat bahwa hutan Mangrove sangat efektif dalam menurunkan energi gelombang yang datang pada titik observasi dengan kerapatan dan

ketebalah hutan yang berbeda-beda. Reduksi energi gelombang tinggi yang terjadi dari 63% hingga mencapai 75%.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan Penelitian yang telah dilakukan menggunakan software DELFT3D dan setelah melakukan pengolahan data angin pada 10 tahun terakhir dan data batymetri dari BATNAS dapat disimpulkan bahwa persentase reduksi gelombang berbanding lurus dengan tingkat ketebalan hutan bakau, terjadi reduksi tinggi gelombang sebesar 55% dan energi gelombang sebesar 67% pada titik observasi A yang memiliki ketebalan mangrove 250 m. terjadi reduksi tinggi gelombang sebesar 43% dan energi gelombang sebesar 63% pada titik observasi B yang memiliki ketebalan mangrove 150 m. terjadi reduksi tinggi gelombang sebesar 47% dan energi gelombang sebesar 70% pada titik observasi C yang memiliki ketebalan mangrove 200 m. terjadi reduksi tinggi gelombang sebesar 40% dan energi gelombang sebesar 68% pada titik observasi D yang memiliki ketebalan mangrove 100 m.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jember atas dukungan akademik dan fasilitas selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Badan Informasi Geospasial (BIG) selaku penyedia layanan data Batimetri Nasional (BATNAS) dan Seamless *Digital Elevation Model* (DEMNAS) yang telah menyediakan data spasial elevasi guna pemetaan karakteristik kedalaman dasar laut di lokasi penelitian. Apresiasi dan penghargaan yang tinggi juga kami sampaikan kepada *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) atas penyediaan data angin melalui situs ERA-Interim, serta Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) atas akses pengunduhan data parameter angin resmi.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. (2018). Panduan penggunaan Seamless Digital Elevation Model (DEMNAS) dan Batimetri Nasional (BATNAS). Badan Informasi Geospasial.
- BMKG. (2023). Pedoman pengamatan meteorologi permukaan. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Bao, T. Q. (2016). Effect of mangrove forest structures on wave attenuation in coastal Vietnam. *Ocean & Coastal Management*, 132, 43–51. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.008>
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Poli, P., & Simmons, A. J. (2016). Evaluation of wind data from the ERA-Interim reanalysis project for coastal wave hindcasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(697), 1210–1222. <https://doi.org/10.1002/qj.2721>
- Deltares. (2023). Delft3D-FM Suite User Manual. Deltares, Delft, The Netherlands
- ECMWF. (2023). ERA5 Reanalysis Documentation. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- Friess, D. A., Yando, E. S., Alemu, J. B., & Githaiga, M. N. (2022). Mangrove forests as nature-based solutions: Ecosystem services, resilience, and climate change adaptation in intertidal zones. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 268, Article 107119. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.107119>

- Hashim, R., Catherine, S. M. E., & Marzuki, M. (2019). Numerical modeling of wave attenuation through mangrove forests using Delft3D. *Journal of Coastal Research*, 35(2), 345–356. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-18-00121.1>
- Herison, A., Romdania, Y., & Yuda, A. (2021). The utilization of mangrove ecosystems for coastal protection structures in civil engineering design. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 15(4), 212–218.
- Horstman, E. M., Dohmen-Janssen, C. M., & Bouma, T. J. (2021). Wave attenuation in mangrove forests: Combining field measurements and numerical modeling. *Wave Motion*, 102, Article 102712. <https://doi.org/10.1016/j.wavemoti.2021.102712>
- Jati, A. W. (2022). Analisis karakteristik fisik dan porositas vegetasi mangrove terhadap efisiensi reduksi energi gelombang laut. *Jurnal Teknik Sipil dan Infrastruktur Pesisir*, 8(2), 89–97.
- Lesser, G. R., Roelvink, J. A., van Kester, J. A. T. M., & Stelling, G. S. (2004). Development and validation of a three-dimensional morphological model. *Coastal Engineering*, 51(8–9), 883–915. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2004.07.014>
- Ning, D. Z., Zhao, X. L., Zhao, M., Hann, M., & Kang, H. G. (2017). Analytical investigation of hydrodynamic performance of a dual pontoon WEC-type breakwater. *Applied Ocean Research*, 65, 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.03.012>
- Pratama, D. T. B., Kusuma, M. N., & Setyawan, A. (2024). Coastal hydrodynamic modeling using Delft3D for tidal flood and abrasion mitigation. *Journal of Marine Science and Technology*, 29(1), 45–56.
- Rahim, S., & Baderan, D. W. K. (2017). *Hutan mangrove dan pemanfaatannya*. Deepublish.
- Taofiqurohman, A., Purba, N. P., & Syamsuddin, M. (2022). Wave attenuation efficiency by *Rhizophora* sp. in tropical coastal areas: Field measurements and mathematical approaches. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 27(3), 231–240. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.27.3.231-240>
- Tonneijck, F., Wilms, T., & Suryadi, Y. (2023). Scaling up Building with Nature in Demak, Indonesia: Permeable structures and sustainable land-use integration. *Coastal Engineering Journal*, 65(2), 178–192. <https://doi.org/10.1080/21664250.2023.2190801>
- van Wesenbeeck, B. K., Wieggers, R., & de Vries, M. B. (2022). Building with Nature: Designing and integrating nature-based solutions for sustainable coastal defense. *Frontiers in Marine Science*, 9, Article 842105. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.842105>
- Winterwerp, J. C., Albers, T., Anthony, E. J., & Wilms, T. (2021). Managing coastal erosion on muddy coasts through Building with Nature: Lessons from sediment dynamics and wave attenuation. *Ocean & Coastal Management*, 215, Article 105118. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105118>
- Wiyono, R. U. A., Rikarda, R. D. E., & Halik, G. (2024). Pemodelan numerik hidrodinamika gelombang dengan pendekatan Building with Nature di perairan Situbondo. *Jurnal Hidrologi dan Infrastruktur Keairan*, 12(1), 15–28