



ISSN 2338-0322

JURNAL TEKNIK PERKAPALAN

Jurnal Hasil Karya Ilmiah Lulusan S1 Teknik Perkapalan Universitas Diponegoro

Analisis Pengaruh Mangrove dan Submerged Breakwater Terhadap Reduksi Gelombang dan Olah Gerak Kapal Dengan Metode Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH)

Shafly Dwi Aprilian¹⁾, Andi Trimulyono²⁾, Berlian Arswendo Adietya³⁾

¹⁾ Laboratorium Kapal Kecil dan Perikanan

Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

^{*)} ShaflyAprilian@students.undip.ac.id

Abstrak

Hutan mangrove dan struktur breakwater memiliki peran penting dalam perlindungan wilayah pesisir terhadap energi gelombang serta dalam menciptakan perairan yang lebih tenang bagi aktivitas kapal. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas konfigurasi mangrove dan breakwater dalam mereduksi energi gelombang serta pengaruhnya terhadap olah gerak kapal. Analisis dilakukan menggunakan metode Computational Fluid Dynamics (CFD) berbasis Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) untuk mensimulasikan interaksi antara gelombang, vegetasi mangrove, dan struktur breakwater. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kombinasi mangrove dan submerged breakwater mampu meningkatkan efektivitas peredaman gelombang secara signifikan dengan disipasi energi gelombang mencapai 73,2%–98,2%. Konfigurasi tersebut juga mampu menurunkan respons olah gerak kapal secara signifikan, khususnya pada gerakan heaving, rolling, dan pitching. Sementara itu, breakwater berongga menunjukkan kemampuan disipasi energi gelombang yang tinggi, namun menghasilkan pola refleksi gelombang yang lebih kompleks sehingga dapat mempengaruhi stabilitas gerakan kapal. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa konfigurasi mangrove dan breakwater yang tepat berperan penting dalam meningkatkan efektivitas perlindungan pesisir serta menciptakan kondisi perairan yang lebih stabil bagi aktivitas kapal.

Kata Kunci : Mangrove, Breakwater, Olah Gerak Kapal, Wave Attenuation, SPH

1. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir memiliki peran yang sangat penting dalam ekosistem dan kehidupan manusia, tetapi juga rentan terhadap ancaman seperti abrasi, gelombang besar, dan kenaikan permukaan air laut. Untuk melindungi wilayah ini, diperlukan solusi perlindungan pantai yang efektif. Penggunaan struktur buatan seperti breakwater dan seawall sering digunakan untuk mengurangi dampak gelombang, sementara vegetasi pesisir seperti mangrove berfungsi sebagai penahan alami yang dapat mereduksi energi gelombang dan melindungi pesisir dari erosi [1].

Mangrove telah terbukti efektif dalam mengurangi energi gelombang, memperbaiki

kualitas air, serta melindungi pesisir dari erosi. Akar mangrove yang rapat berfungsi sebagai penghalang alami yang memperlambat kecepatan gelombang dan mengurangi dampak abrasi. Selain itu, mangrove juga menyediakan habitat yang kaya bagi kehidupan laut dan burung, menjadikannya elemen penting dalam ekosistem pesisir yang sehat. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa mangrove dapat mengurangi kecepatan gelombang hingga 50% pada kedalaman yang lebih rendah [2]. Di banyak kawasan pesisir, mangrove juga dimanfaatkan untuk tempat berlabuhnya kapal dan tempat mencari ikan bagi nelayan, seperti yang ditemukan dalam studi [3].

Sementara itu, breakwater adalah struktur buatan yang dirancang untuk mengurangi dampak

gelombang besar yang mengarah ke pesisir. Struktur ini dapat dibangun sebagai submerged breakwater, yang memiliki puncak terendam di bawah permukaan air. Salah satu bentuk submerged breakwater yang banyak diterapkan adalah breakwater berbentuk rubble mound atau permeable. Struktur ini tidak hanya efektif dalam mengurangi energi gelombang, tetapi juga memungkinkan sebagian gelombang untuk terus mengalir, yang membuatnya lebih ramah lingkungan dan memberikan manfaat tambahan dalam melindungi kawasan pesisir. mengungkapkan bahwa breakwater yang terendam sebagian cenderung lebih efektif dalam mereduksi energi gelombang tanpa menghalangi aliran air [4]. Selain itu, bentuk submerged breakwater ini juga mengurangi gangguan terhadap jalur pelayaran, sehingga tidak menghalangi aktivitas kapal. Penelitian terdahulu juga menyebutkan bahwa submerged breakwater memiliki keunggulan dalam hal pengurangan refleksi gelombang dibandingkan dengan *breakwater* yang berada di permukaan air [5].

Penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mensimulasikan interaksi gelombang dengan struktur pesisir dan vegetasi. Dalam hal ini, metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) dipilih karena memiliki beberapa kelebihan dalam memodelkan aliran fluida bebas dan interaksi kompleks di pesisir. SPH merupakan metode berbasis partikel yang tidak memerlukan grid atau mesh, sehingga sangat efisien untuk simulasi aliran fluida dengan geometri yang tidak terstruktur atau kompleks, seperti di sekitar struktur breakwater dan mangrove. Keuntungan lainnya adalah kemampuan SPH dalam menangani interaksi antara air dan objek bergerak, seperti kapal, yang sulit dicapai dengan metode CFD berbasis grid tradisional. Selain itu, karena permasalahan pada gelombang biasanya berkaitan erat dengan aliran *free-surface* dan *large-deformation*, maka metode SPH sangat tepat untuk digunakan dalam permasalahan ini [6]. Dengan menggunakan SPH, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kombinasi mangrove dan submerged breakwater terhadap peredaman gelombang dan pergerakan kapal di wilayah pesisir, dengan fokus pada pemilihan *submerged breakwater* berbentuk rubble mound/permeable untuk mencapai efisiensi perlindungan yang optimal [7].

Gelombang reguler merupakan gelombang yang akan digunakan dalam penelitian ini, gelombang tersebut terbagi menjadi dua jenis yaitu

gelombang pendek dan gelombang panjang. Perbedaan dari kedua gelombang tersebut terletak pada periodenya, dimana semakin panjang gelombang maka akan semakin besar periodenya. Adapun gelombang yang digunakan merupakan gelombang reguler dengan amplitudo gelombang $A = 0,052\text{m}$, tinggi gelombang $H = 0,104\text{m}$, periode $T = 1,15\text{s}$, dan panjang gelombang $\lambda \approx 2\text{m}$. [16].

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics* (CFD) berbasis *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) untuk mensimulasikan interaksi gelombang dengan struktur pesisir dan vegetasi. SPH dipilih karena kemampuannya dalam memodelkan aliran fluida bebas (*free-surface*) dan deformasi besar (*large-deformation*) pada geometri yang kompleks, seperti di sekitar struktur pesisir dan objek bergerak seperti kapal [9].

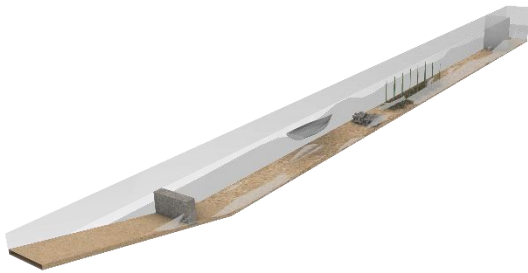
Simulasi dilakukan untuk menganalisis pengaruh berbagai konfigurasi breakwater dan mangrove terhadap peredaman gelombang dan pergerakan kapal. Aplikasi Blender digunakan untuk membuat model 3D dari struktur pesisir dan kapal, sementara Paraview digunakan untuk visualisasi dan analisis data simulasi [10].

2.1. Objek Penelitian

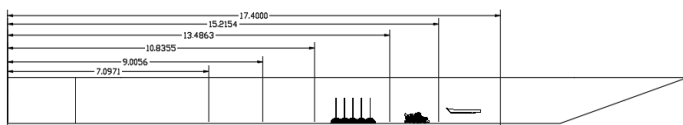
Penelitian ini mencakup beberapa objek yang meliputi: model kolam, model breakwater, dan kapal. Model kolam yang digunakan memiliki dimensi dengan panjang 24 meter, lebar 1 meter, dan tinggi 1,5 meter, serta penggerak piston wave maker yang diletakkan 2,4 meter dari kolam, di samping itu, terdapat 6 wave gauge yang diletakkan di 6 titik sepanjang kolam.

Pemilihan ukuran kolam uji $24\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1,5\text{ m}$ didasarkan pada prinsip desain kolam gelombang yang umum dipakai dalam penelitian eksperimen hidrodinamika, terutama untuk menghasilkan gelombang yang stabil sebelum berinteraksi dengan model kapal. Panjang kolam yang cukup panjang ($\approx 12 \times$ panjang gelombang) memungkinkan pembentukan *wave train* yang berkembang sempurna, lebar kolam yang moderat mengurangi efek lateral yang tidak diinginkan, dan tinggi kolam memadai untuk menampung gelombang maksimum tanpa overflow. Pendekatan ini konsisten dengan referensi eksperimen gelombang terdahulu, yang merekomendasikan

rasio panjang kolam terhadap panjang gelombang minimal $10-12\times$ untuk memastikan gelombang stabil dan representatif pada lokasi model [17].



Gambar 1. Tampak Perspektif 3D Model Kolam



Gambar 2. Tampak Samping Jarak Wave Gauge

Pembuatan seluruh model yang terkait menggunakan software Rhinoceros sebagai visualisasi 3D dari desain yang dibuat, selain itu untuk melihat tampak 2D dari model digunakan software lain berupa Autocad.

Mangrove dipilih sebagai pelindung vegetasi pesisir karena memiliki beberapa keunggulan penting dalam mengurangi dampak gelombang dan abrasi. Akar mangrove yang rapat berfungsi sebagai penghalang alami yang memperlambat kecepatan gelombang dan mengurangi dampak erosi[8]. Penelitian menunjukkan bahwa mangrove dapat mengurangi kecepatan gelombang hingga 50% pada kedalaman yang lebih rendah [2]. Selain itu, mangrove juga memiliki kemampuan untuk menyerap karbon dioksida, yang berfungsi dalam mitigasi perubahan iklim dan memperbaiki kualitas udara [3]. Keberadaan mangrove di pesisir juga membantu menciptakan habitat penting bagi berbagai spesies laut dan burung, menjadikannya elemen vital dalam menjaga keanekaragaman hayati.

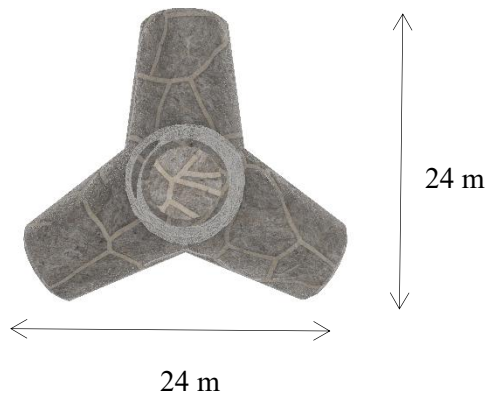


Gambar 4. Tampak Perspektif Model Mangrove

Submerged breakwater dipilih sebagai solusi perlindungan pesisir karena memiliki kemampuan mereduksi energi gelombang tanpa menghalangi jalur pelayaran maupun aktivitas lain di permukaan laut. Struktur ini berada di bawah permukaan air sehingga mampu mengurangi energi gelombang yang datang secara efektif, tetap menjaga estetika kawasan pesisir, serta tidak mengganggu pemanfaatan ruang di atas air. *Submerged breakwater* bekerja dengan mengubah pola perambatan gelombang sehingga energi gelombang yang diteruskan menjadi lebih terkendali dan risiko kerusakan pada fasilitas pesisir dapat berkurang [4]. Selain itu, bentuk permeable pada *submerged breakwater*, misalnya struktur berongga atau batu berpori, memberikan keuntungan tambahan karena memungkinkan sebagian gelombang mengalir melalui rongga-rongga struktur. Kondisi tersebut membantu mengurangi refleksi gelombang yang biasanya terjadi pada struktur solid. Bentuk permeable ini tidak hanya meningkatkan efektivitas dalam mereduksi energi gelombang, tetapi juga lebih ramah lingkungan karena memungkinkan aliran air yang lebih bebas dan mengurangi gangguan terhadap ekosistem laut [5]. Struktur ini juga mendukung distribusi gelombang yang lebih merata sehingga dapat mengurangi risiko kerusakan akibat konsentrasi gelombang pada titik tertentu [7].



Gambar 5. Tampak Perspektif Model *Submerged Breakwater*



Gambar 6. Dimensi geometri *breakwater*.

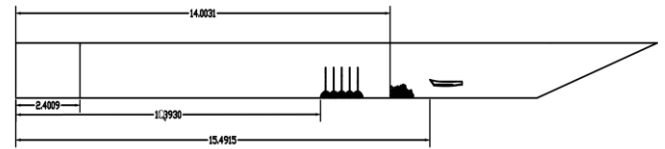
Pembuatan kapal di penelitian ini berupa model kapal sederhana yang diletakan dibagian belakang dari model mangrove dan *breakwater* yang diletakan sejauh 12,65 meter dari ujung kolam.

Tabel 1. Dimensi Model Kapal

Dimension	Full Scale	Model Scale	Unit
Length Overall	6.8	1.36	m
Breadth	2	0.4	m
Draft	0.24	0.048	m



Gambar 7. Tampak Perspektif Model Kapal



Gambar 8. Tampak samping 2D jarak Geometri

2.2. Pengumpula Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini berupa data sekunder yang berasal dari berbagai macam literatur seperti jurnal, E-book, artikel, dan buku baik itu berasal dari internet maupun perpustakaan yang digunakan sebagai penunjang dalam melakukan penelitian. Adapun data yang didapatkan berupa setting-an kolam, piston, breakwater, dan mangrove, serta kapal.

2.3. Pengolahan Data

Setelah selesai dalam melakukan seluruh pembuatan model, tahap selanjutnya yaitu melakukan pengujian secara langsung menggunakan DualSPHysics dan software Paraview. Dalam melakukan simulasi menggunakan DualSPHysics, terdapat tiga tahapan proses, antara lain : 1. 2. 3. *Pre-Processor Running Post-Processor* Pengujian model yang dilakukan mencakup pengujian model gelombang yang dibuat kemudian dilakukan validasi terhadap gelombang tersebut berdasarkan studi literatur. Setelah gelombang tervalidasi, maka selanjutnya dilakukan pengujian terhadap model variasi *submerged breakwater*. Setelah dilakukan pengujian, selanjutnya membahas mengenai perbandingan atau ratio dari ketinggian gelombang akhir yang telah melewati beberapa variasi breakwater yang diteliti dengan ketinggian gelombang sebelum *breakwater*[11]. Setelah mendapat semua data mengenai perbandingan ketinggian gelombang (wave transmission) maka akan diketahui pengaruh antara pemilihan konfigurasi *coastal engineering* yang paling efektif dalam meredam wave transmission[12]. Hasil simulasi wave transmission yang sudah didapatkan menggunakan DualSPHysics akan Paraview sebelum dilihat menggunakan selanjutnya dilakukan visualisasi dengan bantuan software Blender.

Gelombang merupakan salah satu fenomena penting dalam dinamika fluida dan pesisir, yang dibedakan berdasarkan sifat, asal, dan mekanismenya. Berdasarkan arah rambatan dan sumber energi, gelombang dapat diklasifikasikan menjadi gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik, di mana gelombang mekanik memerlukan medium untuk merambat dan mencakup gelombang permukaan laut, gelombang air, dan gelombang tanah, sedangkan gelombang elektromagnetik dapat merambat tanpa medium. Dalam konteks pesisir dan proteksi kapal, fokus utamanya adalah pada gelombang laut, yang dapat dibagi menjadi gelombang panjang (long waves) dengan periode panjang dan energi besar, gelombang pendek (short waves) dengan periode pendek, serta gelombang pasang surut yang dihasilkan oleh interaksi gravitasi bulan dan matahari. Selain itu, gelombang juga dapat diklasifikasikan berdasarkan interaksinya dengan struktur pantai menjadi gelombang incident (datang), refleksi (dipantulkan), transmisi (diteruskan), dan gelombang yang mengalami disipasi energi melalui hambatan vegetasi atau struktur buatan. Pemahaman jenis-jenis gelombang ini sangat penting dalam perencanaan sistem perlindungan pantai, karena karakteristik gelombang menentukan efeknya terhadap kapal, abrasi, dan desain struktur pantai [15].

rata, $\bar{P}$ adalah tekanan rata-rata, ρ adalah massa jenis fluida, μ adalah viskositas efektif, $\bar{U}_i'$ adalah komponen kecepatan fluktuasi, $\rho \bar{U}_i' U_j'$ adalah tegangan Reynolds, dan τ_{ij} adalah komponen tensor dari tegangan viskos rata-rata [3].

Model objek	Jenis Boundary
Kolam	<i>Solid</i>
Kapal	<i>Floating Boundary</i>
<i>Wave maker</i>	<i>Moving boundary</i>
Mangrove	<i>Solid Boundary</i>
Breakwater	<i>Solid boundary</i>

Tabel 2. Model *boundary* pada parameter *setting* DualSPHysics

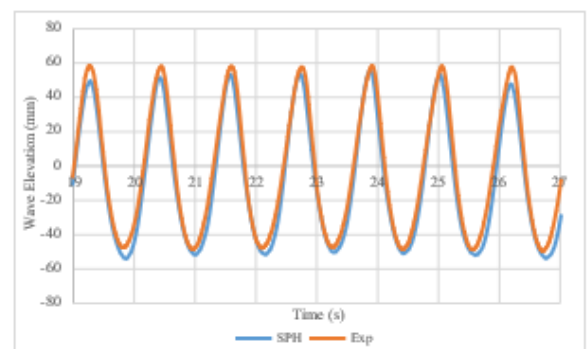
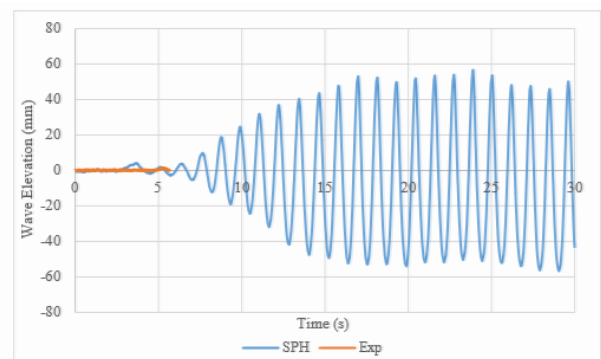
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Validasi Gelombang

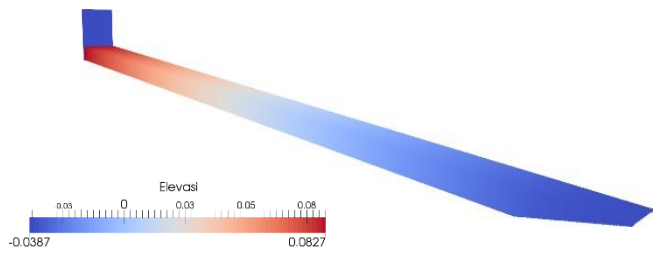
Simulasi pada penelitian ini diawali dengan dilakukannya validasi menggunakan eksperimen yang dilakukan oleh Andi Trimulyono (2019) pada model gelombang yang akan digunakan. Adapun validasi yang digunakan dilakukan pada kolam dengan ukuran 25 x 1 x 1,5 m dengan kedalaman yang sama antara simulasi SPH dengan eksperimen yaitu 0,4 m menggunakan penggerak piston [10]. Simulasi dilakukan menggunakan DualSPHysics v 5.2 dengan D_p (*Distance Particle*) sebesar 0,01 m dan waktu simulasi selama 30 s. Adapun parameter yang digunakan sebagai acuan dalam simulasi penelitian ini dapat dilihat pada tabel

Tabel 3. Parameter Setting Simulasi Gelombang

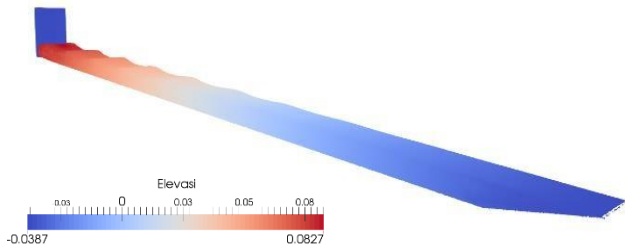
Parameter		Unit
Kernel Function	Wendland	-
Time Step Algorithm	Symplectic	-
D_p (<i>Distance Particle</i>)	0.01	m
α (<i>Artificial Viscosity</i>)	0.001	Ns/m ²
Coefsound	20	-
Coefh	1.2	-
Simulation Time	30	s



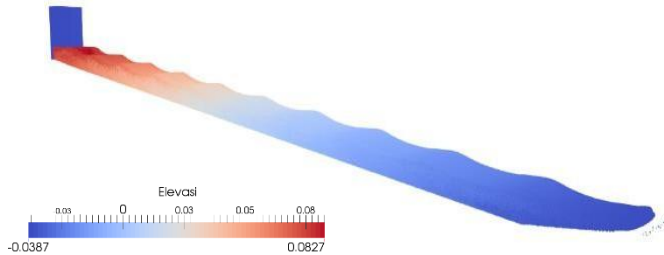
Gambar 9. Perbandingan Elevasi Gelombang Hasil Simulasi SPH dengan eksperimen



(a)



(b)

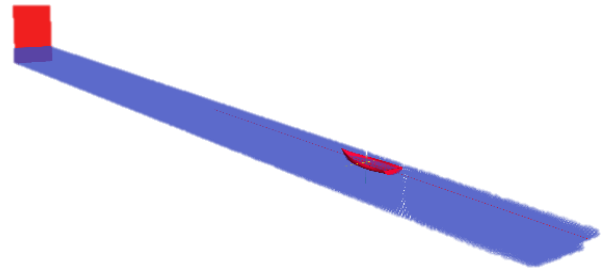


(c)

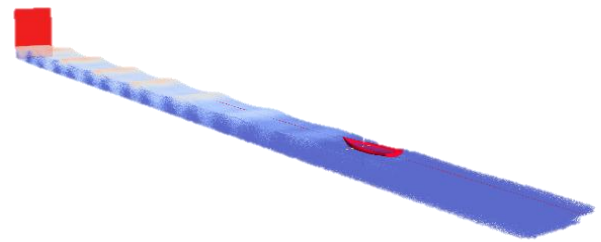
Gambar 10. Simulasi Gelombang Validasi untuk (a) $t = 0$ s, (b) $t = 15$ s, (c) $t = 30$ s

3.2. Konfigurasi Pertama Kapal Saja

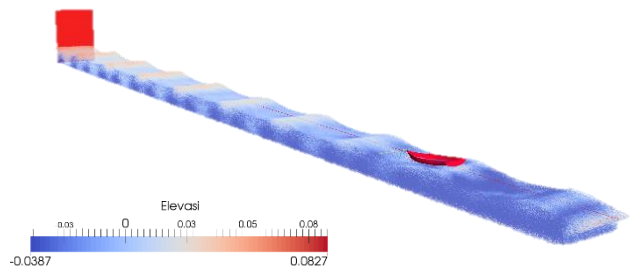
Konfigurasi kapal saja menggambarkan kondisi di mana tidak ada struktur perlindungan seperti breakwater atau mangrove yang ditempatkan di sepanjang pesisir untuk mereduksi energi gelombang. Dalam konfigurasi ini, gelombang yang datang akan langsung menghantam kapal tanpa adanya penghalang atau redaman energi gelombang yang disebabkan oleh struktur buatan atau vegetasi pesisir.



(a) $t = 0$ s

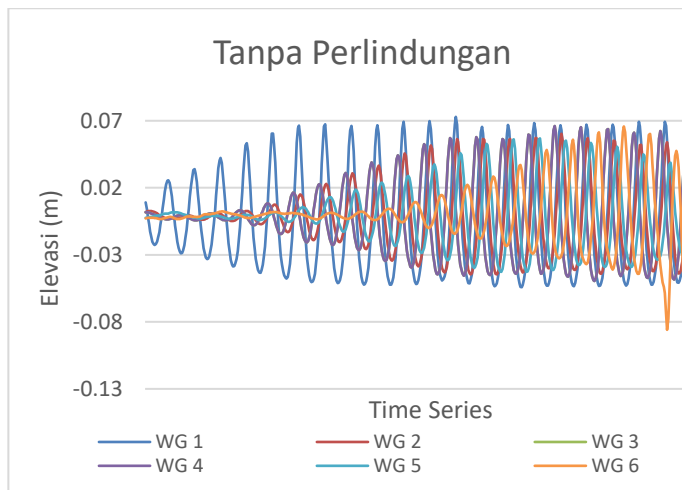


(b) $t = 15$ s



(c) $t = 30$ s

Gambar 11. Simulasi Konfigurasi Tanpa Perlindungan

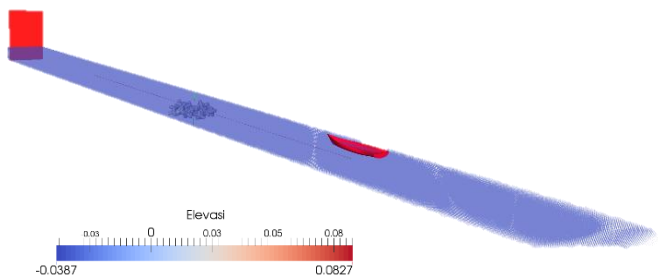


Gambar 12. Perubahan Amplitudo Gelombang ada Konfigurasi Tanpa Pelindung

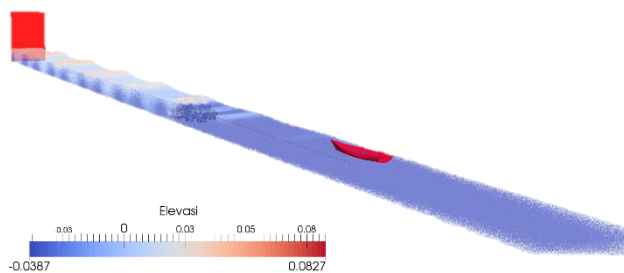
Pada Gambar 10 terlihat simulasi yang dilakukan pada konfigurasi pertama, tanpa adanya pelindung menunjukkan konsistensi pada amplitudo gelombang, terlihat pada grafik terdapat penurunan gelombang pada WG terakhir yaitu WG 6 setelah melewati model kapal, yang menunjukkan tanpa adanya pelindung tidak adanya penurunan pada elevasi gelombang.

3.3. Konfigurasi Breakwater-Kapal

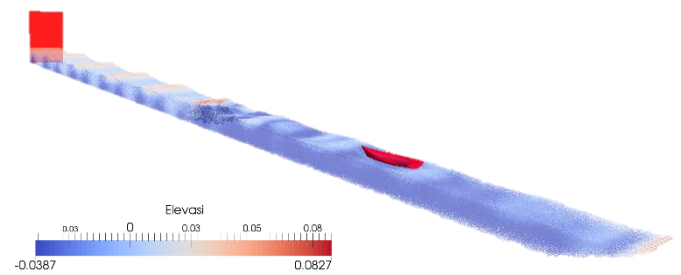
Konfigurasi ini hanya menggunakan struktur buatan yaitu *Submerged breakwater* sebagai pelindung diikuti dengan objek kapal.



(a) $t = 0$ s

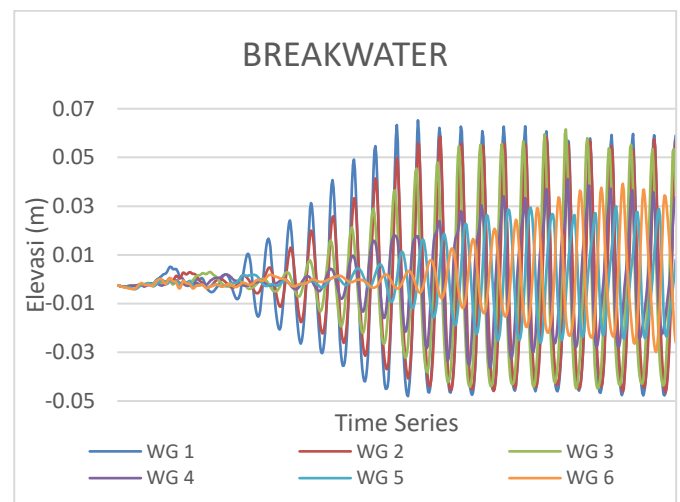


(b) $t = 15$ s



(c) $t = 30$ s

Gambar 13. Simulasi Konfigurasi Breakwater sebagai Perlindung



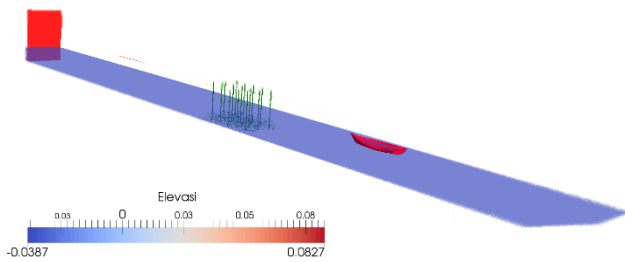
Gambar 14. Perubahan Gelombang Amplitudo pada Konfigurasi *Breakwater* sebagai Pelindung

Pada Gambar 12 terlihat simulasi yang dilakukan pada konfigurasi kedua, terdapat pelindung yaitu *Breakwater* terlihat penurunan tinggi gelombang setelah melewati *Breakwater*. Dibuktikan pada gambar 13 perubahan elevasi gelombang terlihat mulai pada grafik WG 4 yang diletakan setelah model *Breakwater* yang signifikan.

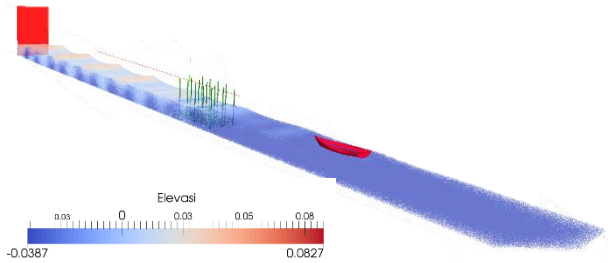
3.4. Konfigurasi Mangrove-Kapal

Konfigurasi mangrove saja menggambarkan kondisi di mana perlindungan pesisir hanya mengandalkan vegetasi mangrove tanpa adanya struktur buatan seperti breakwater, konfigurasi mangrove saja digunakan dalam penelitian ini untuk mengevaluasi kemampuan vegetasi alami dalam meredam energi gelombang serta sebagai

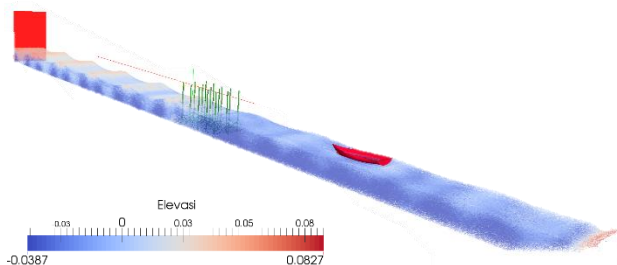
pembandingan terhadap konfigurasi yang melibatkan struktur buatan maupun kombinasi keduanya.



(a) $t = 0$ s

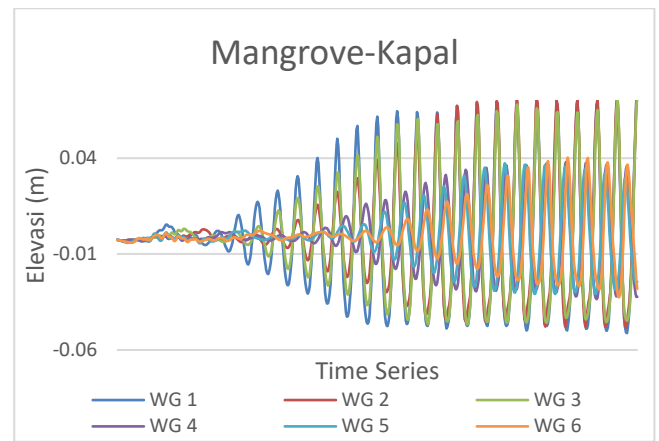


(b) $t = 0$ s



(c) $t = 30$ s

Gambar 15. Simulasi Konfigurasi Mangrove Sebagai Pelindung

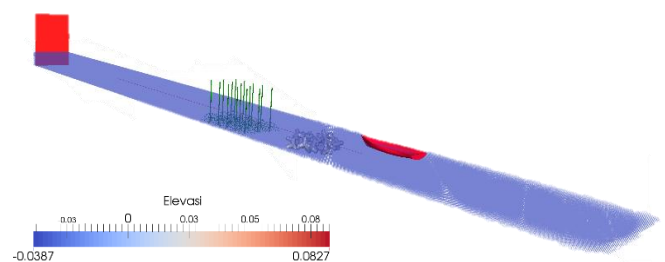


Gambar 16. Perubahan Amplitudo Gelombang pada Konfigurasi Mangrove Sebagai Pelindung

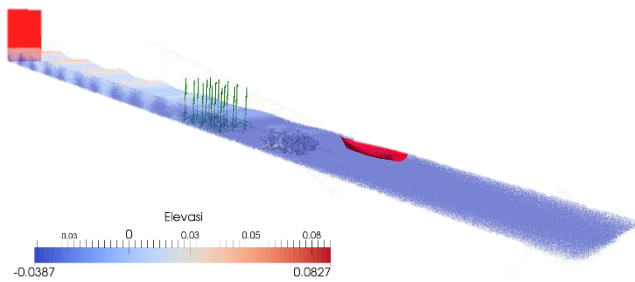
Pada konfigurasi ketiga terlihat dari detik 0 sampai 30 adanya penurunan tinggi gelombang yang dapat dilihat pada gambar 14. Selanjutnya pada gambar 15 adanya penurunan nilai elevasi gelombang pada WG 4 – 6 yang diletakan setelah model mangrove.

3.5. Konfigurasi Mangrove-Breakwater-Kapal

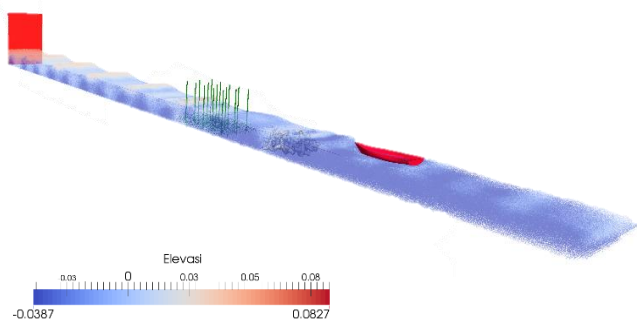
Merupakan konfigurasi keempat yang menempatkan struktur vegetasi diawal mengkombinasikan antara mangrove dan *breakwater*, dimana mangrove diletakan di depan dan *breakwater* sebagai model kedua.



(a) $t = 0$ s

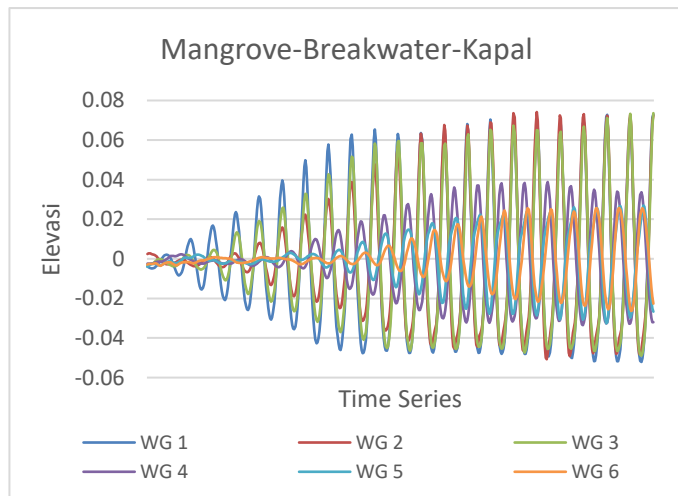


(b) $t = 15$ s



(c) $t = 30$ s

Gambar 17. Simulasi Konfigurasi Kombinasi Mangrove *Breakwater* Sebagai Pelindung



Gambar 18. Perubahan Amplitudo Gelombang pada Konfigurasi Kombinasi Mangrove *Breakwater* Sebagai Pelindung

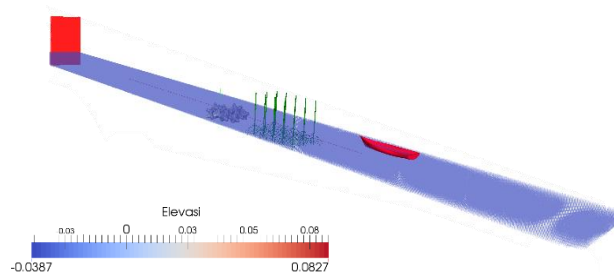
Pada gambar 16 terlihat adanya penurunan transmisi gelombang yang disebabkan adanya pelindung yaitu mangrove dan *breakwater*.

Konfigurasi ini menunjukkan pada WG 1-3 amplitudo yang konsisten sebelum adanya objek mangrove dan *breakwater*, pada WG 4-6

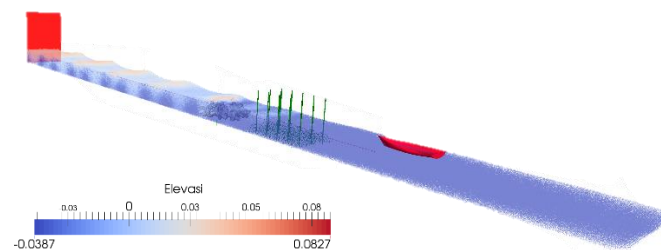
menunjukkan adanya penurunan amplitudo yang cukup signifikan, yang mana WG 4-6 diletakan setelah objek pertama, kedua, dan setelah objek terakhir yaitu kapal.

3.6. Konfigurasi Breakwater-Mangrove-Kapal

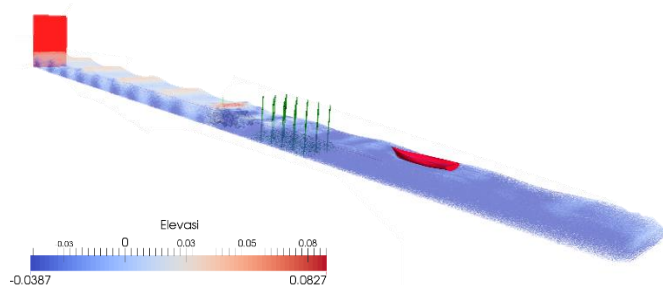
Pada konfigurasi ini meletakan *breakwater* sebagai struktur buatan yang diikuti oleh model mangrove sebagai kombinasi yang kemudian diletakan model kapal.



(a) $t = 0$ s

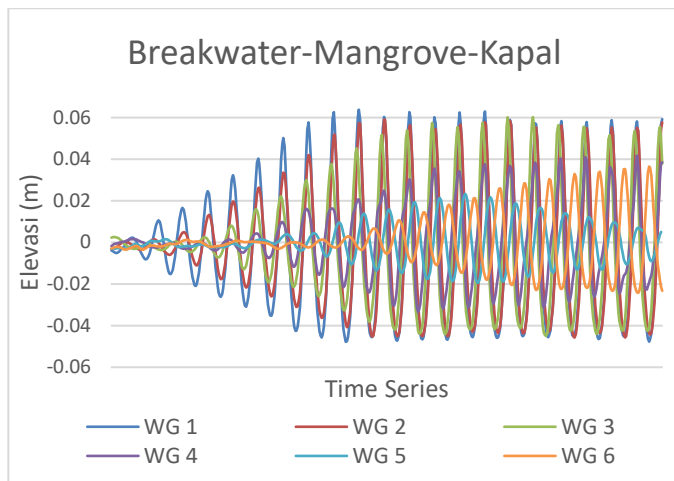


(a) $t = 15$ s



(b) $t = 30$ s

Gambar 18. Simulasi Konfigurasi Kombinasi *Breakwater*-Mangrove Sebagai Pelindung



Gambar 19. Perubahan Amplitudo pada Konfigurasi Kombinasi *Breakwater* Mangrove Sebagai Pelindung

Pada konfigurasi ini terlihat perubahan amplitudo yang sangat signifikan pada WG dibelakang model *Breakwater* dan mangrove yaitu WG 4, WG 5, dan WG 6 yang dapat kita ketahui efektifitas dari kombinasi 2 objek ini terlihat pada gambar 19.

3.7. Hasil Koefisien Refleksi, Koefisien Transmisi dan Disipasi Energi Gelombang

Perhitungan koefisien refleksi (K_r), koefisien transmisi (K_t), dan disipasi energi gelombang dapat dilakukan menggunakan nilai puncak (N_{max}) dan lembah (N_{min}) amplitudo gelombang dari sensor wave gauge. Amplitudo gelombang incident (η_i) diperoleh dengan rumus

$$\eta_i = \frac{N_{max} + N_{min}}{2} \quad [1]$$

sedangkan amplitudo gelombang refleksi (η_r) dihitung dari selisih puncak dan lembah melalui

$$\eta_r = \frac{N_{max} - N_{min}}{2} \quad [2]$$

Untuk gelombang yang diteruskan melewati struktur, amplitudo transmisi (η_t) dihitung menggunakan data sensor di belakang struktur, \Setelah amplitudo gelombang incident, refleksi, dan transmisi diketahui,

koefisien refleksi dan transmisi dapat dihitung dengan

$$K_r = \left(\frac{\eta_r}{\eta_i}\right)^2 \text{ dan } K_t = \left(\frac{\eta_t}{\eta_i}\right)^2 \quad [3]$$

karena energi gelombang sebanding dengan kuadrat amplitudo. Disipasi energi gelombang dihitung dengan

$$D = 1 - K_r - K_t$$

$$D(\%) = (1 - K_r - K_t) \times 100 \quad [4]$$

yang menunjukkan proporsi energi gelombang yang hilang akibat interaksi dengan struktur atau vegetasi. Metode ini praktis digunakan pada data eksperimen karena hanya membutuhkan pengukuran puncak dan lembah gelombang, tanpa harus melakukan analisis Fourier atau metode dua sensor, sehingga mempermudah evaluasi efektivitas struktur perlindungan pantai dalam meredam energi gelombang.

Tabel 3. Koefisien Refleksi. Koefisien Transmisi dan Disipasi Energi Gelombang

Konfigurasi	K_r	K_t	Disipasi
Breakwater	0.803	0.596	0.645
Mangrove	0.831	0.556	0.691
Mangrove-Breakwater	0.798	0.267	0.830
Breakwater-Mangrove	0.753	0.321	0.900

Analisis menunjukkan bahwa perlindungan gabungan, baik Mangrove-Breakwater maupun Breakwater-Mangrove, mampu mendisipasi energi gelombang secara signifikan, dengan persentase disipasi masing-masing 97% dan 93%. Nilai K_r yang tinggi pada kombinasi ini menunjukkan energi gelombang sebagian besar dipantulkan, sementara energi terdisipasi juga maksimal. Sebaliknya, Breakwater tunggal memiliki

disipasi energi terendah (31%), menunjukkan efektivitasnya dalam meredam gelombang lebih rendah dibandingkan perlindungan kombinasi. Mangrove tunggal memberikan disipasi energi menengah (75%), menunjukkan peran penting vegetasi pesisir dalam mereduksi energi gelombang. Hasil ini menegaskan bahwa strategi perlindungan yang menggabungkan struktur alami dan buatan meningkatkan efisiensi pengendalian energi gelombang dan stabilitas kapal di perairan pesisir.

3.8. Root Mean Square Pada Setiap Variasi Konfigurasi Pelindung

Selain perhitungan disipasi energi gelombang pada penelitian ini juga menghitung root mean square yang merupakan perhitungan yang digunakan untuk mengetahui rata-rata kuadrat dari tinggi gelombang, dan kemudian dari nilai RMS tersebut dapat menghitung energi gelombang. Dan pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai dari energi gelombang yang tercipta setelah gelombang melewati hutan mangrove. Rumus dari root mean square adalah.

$$\text{RMS Amplitudo} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i^2}$$

Dimana A_i merupakan amplitude dari setiap gelombang, dan n merupakan jumlah pengukuran. Dan untuk perhitungan energi gelombang menggunakan rumus dibawah ini.

$$E = \frac{1}{2} \rho g H_{rms}^2 [5]$$

Tabel 4. Perhitungan Root Mean Square

Konfigurasi	RMS	Energi Gelombang (J/m ²)
Mangrove	0.86	906.60
Breakwater	0.79	765.90
Mangrove-Breakwater	0.65	518.90
Breakwater-Mangrove	0.69	585.80

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kondisi tanpa perlindungan menghasilkan nilai RMS dan energi gelombang terbesar, yang menandakan bahwa hampir seluruh energi gelombang diteruskan menuju area kapal. Penerapan vegetasi mangrove mampu menurunkan nilai RMS serta energi gelombang akibat adanya hambatan aliran yang dihasilkan oleh batang dan akar mangrove sehingga sebagian energi gelombang terdisipasi. Sementara itu, penggunaan breakwater juga memberikan reduksi energi gelombang melalui mekanisme refleksi dan pemecahan gelombang ketika gelombang berinteraksi dengan struktur.

Konfigurasi kombinasi mangrove dan breakwater menunjukkan penurunan nilai RMS serta energi gelombang yang lebih signifikan dibandingkan konfigurasi tunggal.

Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi perlindungan alami dan struktur buatan mampu mereduksi energi gelombang secara lebih efektif melalui perpaduan mekanisme disipasi, refleksi, dan peredaman gelombang. Dengan berkurangnya energi gelombang yang merambat ke area belakang struktur, kondisi perairan menjadi lebih stabil sehingga potensi gangguan terhadap olah gerak kapal dapat diminimalkan.

3.9. Hasil Olah Gerak Kapal Pada Saat Ada Pelindung dan Tidak Ada Pelindung

Simulasi olah gerak kapal yang diamati merupakan gerakan coupling 4 DOF (degree of freedom) berdasarkan dengan gerakan yang dapat direspon oleh kapal berupa heave, pitch, dan roll. Gerakan coupling ini didapat menggunakan bantuan tools chrono pada DualSPHysics yang diatur dalam XML_GUIDE_CHRONO dengan output menggunakan post-processing floatinginfo untuk membaca data floating object (kapal). Dan pada olah gerak yang dihasilkan oleh metode SPH mengacu pada persamaan rigid body dynamics untuk benda yang bergerak karena fluida (fluid driven object), yang mengacu pada hukum gerak kedua newton. Dimana gerak floating object diperoleh dari interaksi antara floating object dengan fluida dan berat dari benda tersebut. Hal tersebut

dapat tercapai dengan menjumlahkan gaya pada seluruh floating object yang diasumsikan sebagai benda kaku (rigid body), yang diaplikasikan sebagai boundary particle. gaya total pada setiap boundary particle dihitung berdasarkan dengan jumlah gaya pada semua fluid particle di sekitarnya. Maka, setiap boundary particle mengalami gaya persatuan massa.

$$fk = \sum b \frac{dvkb}{dt} + g \quad [6]$$

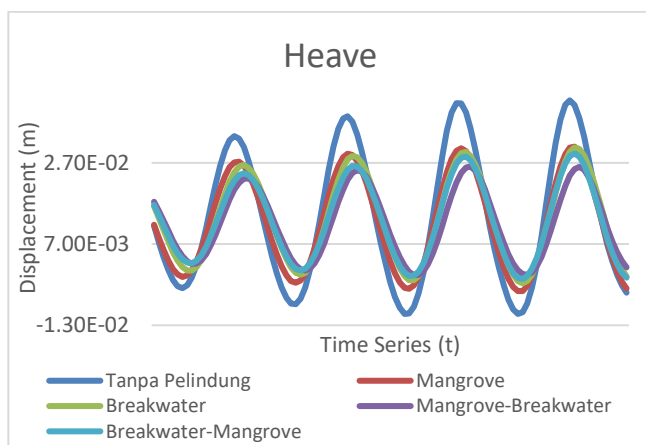
Dan persamaan umum dari rigid body dynamics adalah

$$M \frac{dv}{dt} = \sum_k m_k f_k \quad [7]$$

$$I \frac{d\Omega}{dt} = \sum m_1 ((r_k - R_0) \times f_k) \quad [8]$$

Dimana M adalah massa dan I adalah momen inersia dari floating object. V dan Ω adalah kecepatan linier dan kecepatan rotasi. dan R_0 adalah pusat massa. Dari persamaan (10) dan (11) diintegrasikan dengan waktu untuk mengetahui nilai dari V dan Ω pada waktu berikutnya. Setiap boundary particle pada kapal memiliki kecepatan berdasarkan

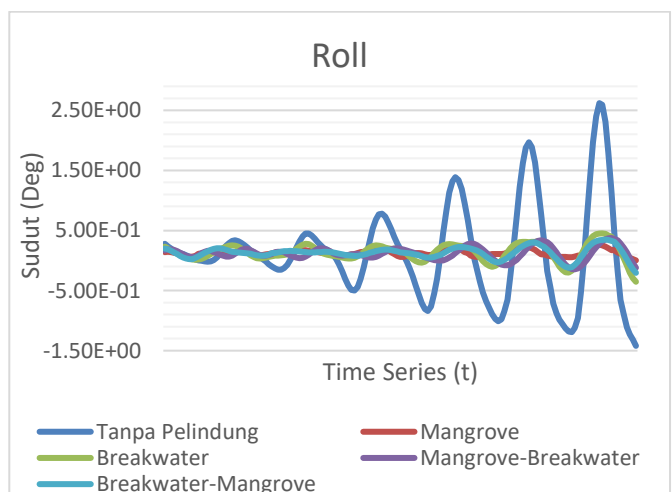
$$uk = v + \Omega \times (r_k - R_0) \quad [18]$$



Gambar 20. Hasil Olah Gerak *Heaving* Kapal pada Setiap Konfigurasi

Tabel 5. Nilai *Heaving* Setiap Variasi

Konfigurasi	Min(m)	Time(S)	Max(m)	Time(s)
Tanpa Pelindung	-0.0244	29.95	0.0355	30.00
Mangrove	-0.0097	29.95	0.0314	29.95
Breakwater	-0.0081	29.95	0.0293	29.95
Mangrove-Breakwater	-0.0102	29.95	0.0417	30
Breakwater-Mangrove	-0.0158	29.95	0.0311	29.95



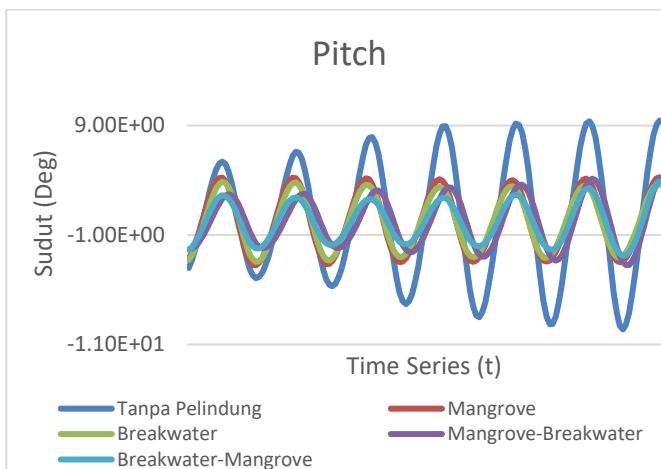
Gambar 21. Hasil Olah Gerak *Rolling* Kapal pada Setiap Konfigurasi

Tabel 6. Nilai *Rolling* Setiap Konfigurasi

Konfigurasi	Min(m)	Time(S)	Max(m)	Time(s)
Tanpa Pelindung	-1.723	30	1.849	29.20
Mangrove	-0.128	29	0.423	29.20
Breakwater	-0.087	29	0.346	29.20
Mangrove-Breakwater	-1.42	29	2.62	30
Breakwater-Mangrove	-0.120	29	0.345	20.20

Berdasarkan data roll kapal tanpa pelindung yang diperoleh dari simulasi, terlihat amplitudo roll mencapai puncak $\pm 2,62$ meter, dengan fluktuasi yang konsisten sepanjang durasi pengukuran. Nilai roll mulai meningkat saat kapal melewati puncak gelombang dan menurun saat berada di lembah gelombang, menunjukkan adanya kaitan langsung antara

posisi kapal terhadap gelombang dan momen roll yang terbentuk. Misalnya, pada titik awal roll mendekati nol, kapal mengalami akselerasi lateral seiring kenaikan gelombang hingga nilai maksimum 2,62 meter, kemudian turun kembali saat gelombang menurun. Setelah adanya pelindung atau turbulensi yang dihasilkan, terjadi perubahan pola gelombang lokal di sekitar lambung kapal, memodifikasi distribusi tekanan dan turbulensi pada waterplane area sehingga menghasilkan variasi tambahan pada gerakan rolling kapal. Pola ini berulang secara periodik, menandakan resonansi dinamis antara frekuensi gelombang dan frekuensi natural kapal. Amplitudo roll yang tinggi ini konsisten dengan mekanisme parametric roll, di mana energi gelombang terakumulasi di kapal karena perubahan waterplane area saat melewati puncak dan lembah gelombang. Data numerik ini membuktikan bahwa tanpa pelindung, kapal lebih rentan terhadap roll ekstrim akibat interaksi sistematis antara gelombang, turbulensi, dan lambung kapal, bukan hanya gerakan acak.

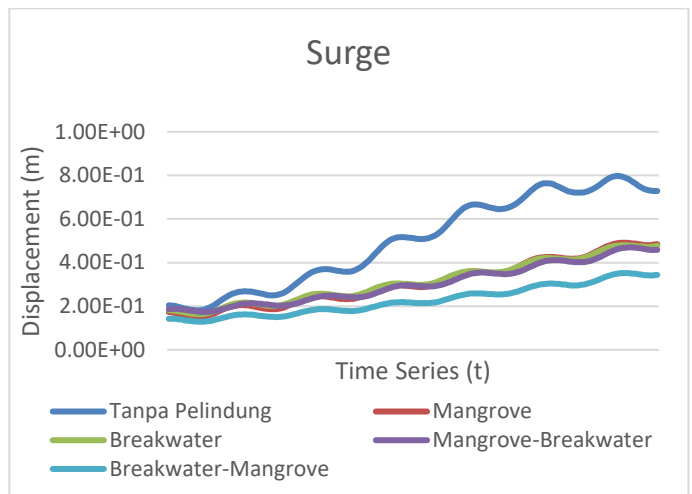


Gambar 22. Hasil Olah Gerak *pitching* Kapal pada Setiap Konfigurasi

Tabel 7. Nilai *pitching* Setiap Konfigurasi

Konfigurasi	Min(m)	Time(S)	Max(m)	Time(s)
Tanpa Pelindung	-1.723	30	1.849	29.20
Mangrove	-0.087	29.95	0.346	29.20
Breakwater	-0.087	29.95	0.346	29.20
Mangrove-Breakwater	-9.62	29.95	9.40	30

Breakwater-Mangrove	-2.89	29.95	3.92	29.20
---------------------	-------	-------	------	-------



Gambar 23. Hasil Olah Gerak *pitching* Kapal pada Setiap Konfigurasi

Tabel 8. Nilai *Surge* Setiap Konfigurasi

Konfigurasi	Min(m)	Time(S)	Max(m)	Time(s)
Tanpa Pelindung	0.128	30	0.667	29.20
Mangrove	0.128	29.95	0.360	29.20
Breakwater	0.128	29.95	0.360	29.20
Mangrove-Breakwater	0.143	29.95	0.354	30
Breakwater-Mangrove	0.107	29.95	0.259	29.20

Hasil analisis dinamika kapal menunjukkan bahwa kondisi tanpa perlindungan menghasilkan respons gerakan kapal paling besar. Pada kondisi ini, nilai heave mencapai minimum $-0,0244$ m pada 29,95 s dan maksimum 0,0355 m pada 30,00 s dengan amplitudo sekitar 0,02995 m. Selain itu, gerakan roll dan pitch juga menunjukkan nilai yang relatif tinggi dengan minimum $-1,723^\circ$ dan maksimum $1,849^\circ$, yang menunjukkan bahwa energi gelombang langsung mengenai kapal tanpa adanya mekanisme reduksi.

Sebaliknya, konfigurasi breakwater-mangrove menunjukkan kinerja terbaik dalam mereduksi gerakan kapal. Pada konfigurasi ini, nilai heave memiliki amplitudo terkecil sekitar 0,01634 m, dengan minimum $-0,0158$ m pada

29,95 s dan maksimum 0,0311 m pada 30,00 s. Gerakan roll juga relatif kecil dengan amplitudo sekitar $0,2325^\circ$, sedangkan pitch memiliki amplitudo sekitar $3,405^\circ$. Kondisi ini menunjukkan bahwa urutan struktur breakwater diikuti oleh mangrove mampu mereduksi energi gelombang secara bertahap sebelum mencapai kapal.

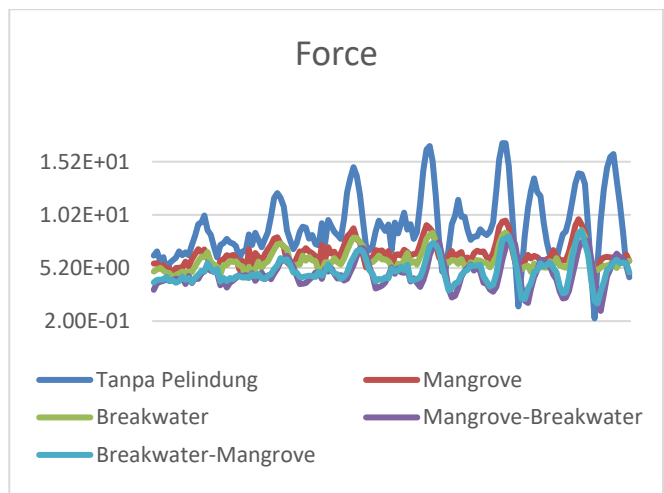
Analisis gerakan surge kapal menunjukkan bahwa pada kondisi tanpa perlindungan, kapal mengalami pergerakan maju-mundur paling besar, dengan nilai minimum $-1,723$ m dan maksimum $1,849$ m, menandakan energi gelombang yang merambat langsung ke kapal sangat tinggi. Penerapan vegetasi mangrove menurunkan amplitudo surge menjadi minimum $-0,087$ m dan maksimum $0,346$ m, sementara breakwater tunggal menghasilkan nilai surge minimum $-0,087$ m dan maksimum $0,346$ m, menunjukkan penurunan gerakan kapal yang signifikan dibanding tanpa pelindung. Kombinasi mangrove-breakwater menurunkan amplitudo surge lebih jauh, dengan minimum $-9,62$ m dan maksimum $9,40$ m, sedangkan konfigurasi breakwater-mangrove menghasilkan minimum $-2,89$ m dan maksimum $3,92$ m.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi struktur pelindung pantai mampu meningkatkan stabilitas kapal dibandingkan kondisi tanpa perlindungan, dengan konfigurasi breakwater-mangrove memberikan performa paling efektif dalam mereduksi respons dinamika kapal.

3.10. Hasil Gaya Pada Kapal Pada Saat Ada Pelindung dan Tidak Ada Pelindung

Untuk memahami pengaruh masing-masing konfigurasi perlindungan pantai terhadap kapal, dilakukan analisis terhadap gaya total (*forces total*) yang bekerja pada kapal selama interval waktu 15–30 s, yaitu saat kondisi gelombang telah mencapai keadaan relatif stabil. Analisis ini bertujuan untuk membandingkan respons gaya hidrodinamik kapal pada lima kondisi pengujian, yaitu tanpa perlindungan, mangrove, breakwater,

mangrove-breakwater, dan breakwater-mangrove. Nilai gaya total kemudian diolah untuk melihat kecenderungan perubahan gaya yang diterima kapal pada setiap konfigurasi perlindungan. Grafik berikut menunjukkan perbandingan gaya maksimum yang bekerja pada kapal pada masing-masing konfigurasi, sehingga dapat diketahui konfigurasi perlindungan yang paling efektif dalam mereduksi gaya gelombang terhadap kapal.



Gambar 24. Hasil Olah Gerak Heaving Kapal pada Setiap Konfigurasi

Analisis gaya total pada kapal menunjukkan bahwa keberadaan struktur perlindungan pantai mampu menurunkan gaya hidrodinamik yang bekerja pada kapal secara signifikan dibandingkan kondisi tanpa perlindungan. Gaya maksimum pada kondisi tanpa perlindungan mencapai sekitar 19.6 N, sedangkan pada konfigurasi dengan perlindungan terjadi penurunan yang cukup besar. Konfigurasi mangrove-breakwater menghasilkan gaya maksimum paling kecil yaitu sekitar 8.38 N, diikuti oleh breakwater sebesar 9.18 N, breakwater-mangrove sebesar 9.57 N, dan mangrove sebesar 10.2 N. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi vegetasi mangrove dan struktur breakwater mampu memberikan perlindungan yang lebih efektif terhadap gaya gelombang yang bekerja pada kapal.

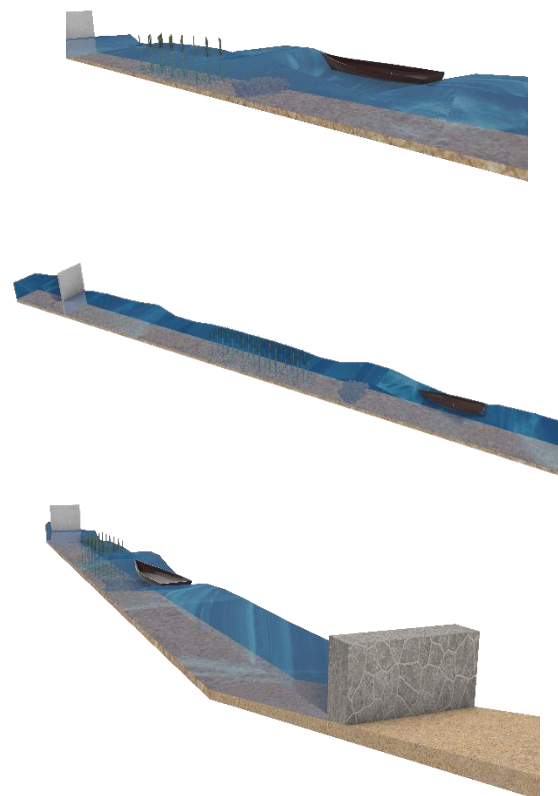
Konfigurasi mangrove-breakwater memberikan performa terbaik karena gelombang terlebih dahulu melewati area

vegetasi mangrove yang menyebabkan terjadinya disipasi energi melalui mekanisme hambatan oleh batang dan akar mangrove. Energi gelombang yang telah berkurang kemudian berinteraksi dengan breakwater sehingga terjadi proses refleksi dan pecah gelombang yang lebih lanjut menurunkan energi gelombang sebelum mencapai kapal. Kombinasi kedua mekanisme tersebut menyebabkan energi gelombang yang diterima kapal menjadi paling kecil sehingga gaya hidrodinamik yang bekerja pada kapal juga menurun secara signifikan.

Sebaliknya, pada konfigurasi breakwater–mangrove, meskipun nilai disipasi energi gelombang relatif tinggi, gaya yang bekerja pada kapal tidak menjadi yang paling kecil. Hal ini dapat disebabkan oleh fenomena refleksi gelombang yang terjadi pada breakwater sehingga sebagian energi gelombang masih dapat merambat ke arah vegetasi mangrove dan kemudian menuju kapal. Kondisi ini menunjukkan bahwa urutan penempatan elemen perlindungan pantai memiliki pengaruh terhadap distribusi energi gelombang yang akhirnya mempengaruhi respons gaya pada kapal.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa konfigurasi perlindungan pantai tidak hanya mempengaruhi karakteristik transformasi gelombang, tetapi juga berdampak langsung terhadap gaya hidrodinamik yang bekerja pada kapal. Oleh karena itu, penempatan vegetasi mangrove di bagian depan yang diikuti oleh struktur breakwater dapat menjadi konfigurasi yang lebih efektif dalam mengurangi gaya gelombang pada kapal di wilayah pesisir.

3.11. Post-Processing dan Visualisasi Menggunakan Blender



Gambar 25. *Post Processing* Hasil Simulasi Menggunakan *Software* Blender

Setelah melakukan proses *running*, DualSPHysics dapat menghasilkan output file berupa file VTK (*Visualization ToolKit*) yang biasa digunakan dalam melakukan *post processing*. File VTK ini dapat digunakan pada berbagai jenis *software post processing* salah satunya yaitu Blender. Hasil *post-processing* menggunakan blender dapat dilihat pada gambar 25.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi numerik menggunakan DualSPHysics, dapat disimpulkan bahwa keberadaan struktur perlindungan pantai memberikan pengaruh yang signifikan terhadap transformasi energi gelombang serta respons olah gerak kapal di wilayah perairan. Pada kondisi tanpa perlindungan, gelombang merambat secara langsung menuju kapal sehingga energi gelombang yang diteruskan relatif besar.

Penerapan perlindungan berupa vegetasi mangrove maupun struktur breakwater mampu mengurangi energi gelombang melalui mekanisme refleksi, transmisi, dan disipasi sebelum mencapai kapal.

Berdasarkan hasil pengolahan amplitudo gelombang untuk lima konfigurasi perlindungan pantai, terlihat perbedaan yang signifikan pada energi gelombang yang diteruskan ke area belakang. Konfigurasi tanpa pelindung menunjukkan amplitudo gelombang tertinggi, dengan nilai minimum 0,128 m dan maksimum 0,667 m, serta gaya hidrodinamik kapal terbesar mencapai puncak 15,2 N, menunjukkan bahwa energi gelombang merambat langsung tanpa redaman. Kapal pada kondisi ini mengalami gerakan heave, pitch, dan roll ekstrem, serta gerakan surge dengan amplitudo antara -1,723 m hingga 1,849 m, yang menandakan potensi risiko destabilitas kapal paling tinggi dibandingkan konfigurasi lainnya.

Penerapan vegetasi mangrove atau breakwater tunggal menurunkan amplitudo gelombang secara moderat (maksimum sekitar 0,360 m), mengurangi RMS dan energi gelombang, serta menurunkan fluktuasi gerakan kapal dan gaya hidrodinamik yang diterima. Pada mangrove tunggal, disipasi energi tercatat sebesar 69,1%, sedangkan breakwater tunggal sekitar 64,5%, menunjukkan bahwa kedua elemen mampu menurunkan energi gelombang melalui mekanisme disipasi dan refleksi. Amplitudo surge menurun signifikan, dengan nilai maksimum masing-masing sekitar 0,346 m, menandakan pergerakan maju-mundur kapal lebih terbatas dan kondisi perairan lebih stabil dibandingkan tanpa perlindungan.

Kombinasi mangrove-breakwater menunjukkan redaman paling optimal, dengan amplitudo gelombang maksimum 0,354 m, RMS 0,65, energi gelombang 518,9 J/m², transmisi gelombang minimal ($K_t = 0,267$), dan disipasi energi tinggi (83%). Gerakan kapal *heave*, *pitch*, *roll* stabil, amplitudo surge menurun signifikan, dan gaya total kapal menurun hingga 8,38 N. Konfigurasi

breakwater-mangrove juga efektif dengan disipasi energi tertinggi (90%) dan gaya total kapal lebih rendah dibanding perlindungan tunggal, namun amplitudo dan gerakan kapal sedikit lebih besar dibanding mangrove-breakwater. Temuan ini menegaskan bahwa urutan penempatan elemen perlindungan sangat memengaruhi efisiensi redaman gelombang, distribusi energi, dan respons kapal. Secara keseluruhan, integrasi vegetasi mangrove dan breakwater, terutama dengan mangrove di depan dan breakwater di belakang, mampu menciptakan kondisi perairan lebih tenang, menurunkan amplitudo gerakan kapal dan gaya hidrodinamik, serta meningkatkan keselamatan kapal di wilayah pesisir.

Daftar Pustaka

- [1] P. P. Wong et al., *Coastal Systems and Global Change*. Berlin, Germany: Springer, 2007.
- [2] E. W. Koch et al., "The role of seagrasses in coastal protection," *Marine Ecology Progress Series*, vol. 154, pp. 37–46.
- [3] D.M. Alongi, "Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change," *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 76, no. 1, pp. 1–13, 2008.
- [4] H. F. Burcharth et al., "Submerged breakwater systems in coastal protection," *Coastal Engineering Journal*, vol. 48, no. 1, pp. 59–75, 2006.
- [5] H. Burcharth, "Submerged breakwaters: Theoretical and practical aspects," *Coastal Engineering Proceedings*, vol. 1, no. 33, pp. 1–12, 2013.
- [6] A. Trimulyono and A. Wicaksono, "Simulasi numerik large-deformation surface wave dengan Smoothed Particle Hydrodynamics," *KAPAL*, vol. XV, no. 3, pp. 102–103, 2018.
- [7] I. J. Losada, J. L. Lara, and R. Guanche, "Modeling of wave interaction with submerged breakwaters," *Coastal Engineering*, vol. 55, no. 10, pp. 821–835, 2008.

- [8] Y. Mazda, M. Magi, Y. Ikeda, T. Kurokawa, and T. Asano, "Wave reduction in a mangrove forest dominated by *Sonneratia* sp.," *Wetlands Ecology and Management*, vol. 5, no. 1, pp. 51–58, 1997.
- [9] A. J. C. Crespo, J. M. Domínguez, B. D. Rogers, M. Gómez-Gesteira, S. Longshaw, R. Canelas, R. Vacondio, A. Barreiro, and O. García-Feal, "DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)," *Computer Physics Communications*, vol. 187, pp. 204–216, 2015.
- [10] J. M. Domínguez, A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, and B. D. Rogers, "DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver for fluid–structure interaction," *Computer Physics Communications*, vol. 183, no. 3, pp. 617–627, 2012.
- [11] M. Gómez-Gesteira et al., "SPHysics – Development of a free-surface fluid solver," *Computers & Geosciences*, vol. 48, pp. 289–299, 2012.
- [12] I. J. Losada, M. Losada, and A. J. Baquerizo, "An analytical method to evaluate the efficiency of low-crested breakwaters," *Coastal Engineering*, vol. 37, no. 2, pp. 93–104, 1999.
- [13] S. Massel, K. Furukawa, and R. M. Brinkman, "Surface wave propagation in mangrove forests," *Fluid Dynamics Research*, vol. 24, no. 4, pp. 219–249, 1999.
- [14] T. Suzuki, M. Zijlema, B. Burger, M. Meijer, and S. Narayan, "Wave dissipation by vegetation with layer schematization in SWAN," *Coastal Engineering*, vol. 59, no. 1, pp. 64–71, 2012.
- [15] L. H. Holthuijsen, *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press, 2007.
- [16] A. Trimulyono and H. Hashimoto, "Experimental Validation of Smoothed Particle Hydrodynamics on Generation and Propagation of Water Wave," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. VII, pp. 1–17, 2019.
- [17] R. G. Dean and R. A. Dalrymple, *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Singapore: World Scientific, 1991.
- [18] E. V. Lewis, Ed., *Principles of Naval Architecture Volume III: Motions in Waves and Controllability*. Jersey City, NJ, USA: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME), 1989.