



Simulasi Gelombang Air Laut Selat Madura Menggunakan *Smoothed Particle Hydrodynamics*

Aqshal Tegar Wiratama^{1)*}, M. Biyadihie Adikuasa²⁾, Ahmad Hanif Asyhar¹⁾

¹⁾Program Studi Matematika, Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya, Gunung Anyar 60294, Indonesia

²⁾Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak, Surabaya

*email: aqshal.tegarw@gmail.com

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) dalam simulasi dinamika gelombang air laut di Selat Madura. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak DualSPHysics dengan mekanisme *piston-type wave-maker* yang mengintegrasikan data harian tinggi dan arah gelombang dari BMKG sebagai parameter input. Karakteristik dinamika gelombang yang dihasilkan menunjukkan bahwa elevasi output simulasi memiliki pola fluktuasi yang konsisten dengan data observasi lapangan. Hasil validasi model SPH ditunjukkan dengan nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.0193 dan 0.0063, serta koefisien determinasi (R^2) mencapai 0.97973 dan 0.9938. Hal ini membuktikan adanya hubungan linier yang sangat kuat antara tinggi gelombang input dan output simulasi, di mana model mampu menjelaskan 99% variansi data aktual. Penelitian ini merupakan eksplorasi awal penggunaan metode berbasis partikel SPH untuk memodelkan karakteristik hidrodinamika di perairan Selat Madura.

Kata Kunci: gelombang; selat; simulasi; Smoothed Particle Hydrodynamics

Abstract: This study aims to implement the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to simulate sea wave dynamics in the Madura Strait. The simulation was conducted using DualSPHysics software with a piston-type wave-maker mechanism, integrating daily wave height and direction data from the BMKG as input parameters. The results reveal that the wave dynamics characteristics generated in the simulation show a consistent fluctuation pattern with observation data. The validation of the SPH model is demonstrated by Root Mean Square Error (RMSE) values of 0.0193 and 0.0063, along with coefficients of determination (R^2) reaching 0.97973 and 0.9938. These results prove a very strong linear relationship between the input wave height and the simulation output, where the model is able to explain 99% of the actual data variance. This research serves as an initial exploration into the use of the particle-based SPH method to model hydrodynamic characteristics in the Madura Strait.

Keywords: wave; strait; simulation; Smoothed Particle Hydrodynamics

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan sangat bergantung pada transportasi laut untuk mobilitas penduduk dan logistik, terutama di area sibuk seperti Selat Madura yang melayani hingga 15.000 kapal per tahun (PT PELNI (Persero), 2025). Jumlah penumpang yang melewati



Selat Madura terus mengalami peningkatan dan diperkirakan akan mengalami fluktuasi besar di tahun berikutnya (Fernando & Mailoa, 2024). Selat Madura juga dipenuhi dengan angutan logistik yang dilayani oleh Terminal Petikemas Surabaya (PT Terminal Petikemas Surabaya (TPS), 2024).

Kepadatan aktivitas yang terjadi di perairan Selat Madura merupakan salah satu yang lalu lintas perairan tersibuk di Indonesia (Ravizqi, 2023). Seiring dengan meningkatnya kepadatan lalu lintas perairan di Selat Madura, risiko kecelakaan akibat minim alat navigasi serta kecepatan arus yang tidak stabil juga meningkat (Dumaturun et al., 2024). Alur Pelayaran Barat Surabaya (APBS) mencatat sebanyak 311 kecelakaan kapal terjadi dalam periode 1995–2009 di Selat Madura. Sebagian besar kecelakaan (48,5%) disebabkan oleh tabrakan antar kapal dan 37% disebabkan faktor alam, salah satunya gelombang air laut tinggi (Sumarsono et al., 2017).

Gelombang air laut merupakan fenomena yang terbentuk akibat energi angin mengenai permukaan air laut. Tinggi gelombang laut disebabkan oleh kecepatan angin, lama hembusan, serta luas area terbuka. Pada umumnya, gelombang air laut tinggi terutama dengan ketinggian diatas 2 meter dihasilkan oleh adanya angin kencang atau badai (Sitompul et al., 2023). Selain kecepatan angin, perubahan kecepatan arus dan tinggi gelombang juga dipengaruhi oleh peristiwa alam seperti *El Niño* dan *La Niña* (Haiyqal et al., 2023). Gelombang air laut yang tinggi berpotensi mengganggu keseimbangan dan stabilitas kapal laut saat melakukan *towing* (Toding, 2024).

Secara umum, akibat kondisi geografis selat Madura yang semi tertutup, gelombang air laut di selat Madura relatif lebih kecil dibandingkan di perairan laut lepas. Tetapi, kecelakaan kapal akibat gelombang laut masih sering terjadi. Sebagian besar kecelakaan ini dialami oleh para nelayan (Purwanto et al., 2024). Sistem navigasi dan radio untuk komunikasi yang kurang memadai menjadi salah satu faktor yang mengakibatkan nelayan sering hilang terkena gelombang dan cuaca ekstrem (Zuhriyah et al., 2025). Untuk itu, untuk meningkatkan keamanan para nelayan. Maka penelitian untuk simulasi gelombang air laut di selat Madura perlu dilakukan.

Beberapa metode penelitian telah digunakan untuk simulasi gelombang air laut. Metode yang digunakan untuk memodelkan gelombang air laut juga beragam, seperti metode *Hindcasting-Shore Protect Manual 1984* (Ahmad et al., 2022), metode *Sverdrup Munk Bretschneider (SMB)* (Adriat et al., 2024), pemodelan numerik gelombang menggunakan perangkat lunak *DHI-Mike 21* (Nadir et al., 2021), dan metode volume hingga (Khasanah, 2019). Tetapi, metode-metode tersebut memiliki beberapa kelemahan, salah satu kelemahannya adalah hasil simulasi yang dihasilkan tidak dapat menggambarkan gelombang secara halus karena menggunakan pendekatan *grid*.

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) adalah metode numerik dengan pendekatan partikel bebas. *Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)* sering digunakan untuk penelitian untuk simulasi fluida. Salah satunya adalah penelitian yang melakukan simulasi efek tsunami yang bertabrakan dengan sebuah platform statis (Hwang et al., 2024). Lalu, pada penelitian tentang simulasi gelombang laut lepas pada sebuah *offshore* terapung pada tahun 2023 (Salis et



al., 2024; Tagliafierro et al., 2023). Penggunaan *Smoothed Particle Hydrodynamics* juga dapat diaplikasikan untuk simulasi gelombang dekat pantai, pada penelitian tahun 2023 dilakukan simulasi untuk mengetahui karakteristik gelombang air laut di zona pantai terlarang (Altomare et al., 2023). Berdasarkan penelitian-penelitian yang telah dilakukan, metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* memiliki fleksibilitas dan keunggulan dalam simulasi karakteristik gelombang lebih kontinu dan representatif dibandingkan metode berbasis *grid*, terutama untuk interaksi antara gelombang dan sebuah struktur.

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) terbukti cocok untuk simulasi fluida. Sehingga, berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan pada penelitian ini akan menggunakan metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* untuk simulasi gelombang air laut dengan judul penelitian “Implementasi Metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* Pada Gelombang Air Laut di Selat Madura”. Dengan tujuan untuk melakukan eksplorasi awal simulasi gelombang air laut menggunakan metode berbasis partikel SPH di Selat Madura.

METODE PENELITIAN

Data yang digunakan untuk simulasi gelombang air laut di Selat Madura diperoleh dari Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak pada tanggal 1 Januari 2024. Data yang digunakan adalah data ketinggian gelombang (Hs) dan arah gelombang (Dir) di $7.629927^\circ - 7.335823^\circ$ derajat Lintang Selatan dan $112.962799^\circ - 113.690643^\circ$ derajat Bujur Timur. Lokasi pada koordinat merupakan tempat masuk dan keluar kapal menuju pelabuhan baik angkutan penumpang maupun angkutan logistik. Sementara ketinggian gelombang dan arah gelombang menjadi parameter awal yang mengedalikan gerak dan arah gelombang dalam *piston-wave maker*.

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) adalah metode berbasis lagrangian tanpa *mesh* yang mendiskritkan bentuk kontinu menjadi partikel-partikel diskrit. Dimana gerakan partikel-partikel tersebut diperoleh dengan menggunakan interpolasi dari partikel-partikel tetangga (Domínguez et al., 2022). Formulasi ini dikembangkan dari pemanfaatan penelitian (Hwang et al., 2021). Untuk penjelasan lebih detail mengenai pengembangan formula SPH dapat ditemukan pada beberapa penelitian berikut (Adami et al., 2012; Hu & Adams, 2006). Dengan demikian, persamaan umum metode SPH secara matematis digambarkan sebagai pendekatan integral dari setiap fungsi $F(\mathbf{r})$ berikut ini:

$$F(\mathbf{r}) = \int F(\mathbf{r}') W(\mathbf{r} - \mathbf{r}') d\mathbf{r}' \quad (1)$$

Selanjutnya, fungsi F didekati dengan interpolasi dari partikel-partikel tetangga dalam bentuk diskrit:

$$F(\mathbf{r}_a) = \sum_b F(\mathbf{r}_b) W(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b, h)^{\frac{m_b}{\rho_b}} \quad (2)$$

dengan a dan b sebagai target dan partikel tetangga, h adalah *smoothing length*, m adalah massa, dan ρ adalah massa jenis. Selain itu, fungsi kernel $W(\mathbf{r}, h)$ yang akan digunakan dalam



penelitian ini adalah fungsi kernel Wendland (Wendland, 1995), yang didefinisikan sebagai berikut:

$$W(q) = \alpha_D \left(1 - \frac{q}{2}\right)^2 (2q + 1), \text{ dengan } 0 \leq q \leq 2 \quad (3)$$

dimana α_D adalah bilangan real dengan tetapan $7/4\pi$ untuk dua dimensi dan $21/16\pi h^3$ untuk tiga dimensi. Sementara $q = r/h$ merupakan jarak *non-dimensional* antara partikel-partikel, dan r adalah jarak antara partikel a dan b . Kernel Wendland dipilih karena bersifat *positive definite* yang mampu meningkatkan stabilitas numerik serta mencegah *pairing instability* pada partikel SPH. Sifat *smoothness* yang tinggi pada kernel ini juga memberikan aproksimasi gradien yang lebih akurat dan stabil, sehingga sesuai untuk simulasi gelombang air laut dan aliran bebas (Wendland, 1995; Liu & Liu, 2003; Fourtakas et al., 2019).

Governing Equations

Untuk menggambarkan dinamika fluida, penelitian ini menggunakan persamaan *Navier-Stokes*. Didalam metode SPH, persamaan *Navier-Stokes* digunakan untuk mendikte dinamika dari partikel-partikel yang ada. Selanjutnya, persamaan momentum dan kontinuitas didiskritisasi dalam bentuk langrangian, menjadi seperti berikut (Domínguez et al., 2022):

$$\frac{dv_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{p_a + p_b}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla_a W_{ab} + \Gamma_a + g \quad (4)$$

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} v_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} + D_a \quad (5)$$

dimana $(\cdot)_{ab} = (\cdot)_a - (\cdot)_b$, W_{ab} adalah fungsi kernel, t adalah waktu, v adalah kecepatan, p adalah tekanan, D_a adalah kekentalan difusi yang didefinisikan pada **Persamaan 11**, dan g adalah percepatan gravitasi konstan. Sementara $\nabla_a W_{ab}$ adalah gradien fungsi kerel dimana:

$$\nabla_a W_{ab} = \left(\frac{\partial W}{\partial r_{ab}} \right) \cdot \frac{\mathbf{r}_{ab}}{r_{ab}} \quad (6)$$

Dengan \mathbf{r}_{ab} adalah vektor posisi partikel. Sedangkan Γ_a merupakan momentum disipasi, dengan definisi sebagai berikut:

$$\Gamma_a = \sum_b m_b \frac{4v_0 r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab}}{(\rho_a + \rho_b)(r_{ab}^2 + 0.01h^2)} v_{ab} + \sum_b m_b \left(\frac{\tilde{\tau}_a^{ij} + \tilde{\tau}_b^{ij}}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla^i W_{ab} \quad (7)$$

bagian pertama dari **Persamaan 7** adalah kekentalan laminar dengan $v_0 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ yang berasal dari kinematika kekentalan fluida, sementara $\tilde{\tau}_a^{ij}$ dan $\tilde{\tau}_b^{ij}$ adalah tekanan geser (*shear stress*) (Y.M. Lo & Shao, 2002).

Selanjutnya, untuk menjabarkan model dalam skala sub-partikel, sesuai dengan bentuk variasi yang konsisten dari sebuah formulasi simetris (Dalrymple & Rogers, 2006). Maka ditambahkan tegangan regangan, $\tilde{\tau}^{ij}$ adalah notasi Einstein dalam koordinat arah i dan j , dengan laju geser (S) didefinisikan dalam **Persamaan 8**:



$$\tilde{S}^{ij} = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\tilde{v}_i}{dx_j} + \frac{d\tilde{v}_j}{dx_i} \right) \quad (8)$$

dimana x merupakan posisi partikel. Formulasi ini didapatkan dari asumsi *eddy viscosity*, dengan menggunakan model Smagorinsky standar sebagai berikut:

$$\frac{\tilde{\tau}^{ij}}{\rho} = v_t \left(2\tilde{S}^{ij} - \frac{2}{3}\tilde{S}^{ij}\delta^{ij} \right) - \frac{2}{3}(C_L \Delta^2 \delta^{ij} |\tilde{S}^{ij}|^2) \quad (9)$$

$$\frac{\tilde{\tau}^{ij}}{\rho} = v_t \left(2\tilde{S}^{ij} - \frac{2}{3}\tilde{S}^{ij}\delta^{ij} \right) - \frac{2}{3}(C_L \Delta^2 \delta^{ij} |\tilde{S}^{ij}|^2) \quad (10)$$

pada **Persamaan 9** dan **Persamaan 10** diatas $v_t = (C_s \Delta)^2 |\tilde{S}^{ij}|$ merupakan koefisien *eddy viscosity*, dengan $C_s = 0.12$ merupakan konstanta Smagorinsky (Smagorinsky, 1963), dan $C = 0.0066$. Sedangkan Δ merupakan jarak antar partikel. $|\tilde{S}^{ij}| = \frac{1}{2}(\tilde{S}^{ij}\tilde{S}^{ij})^{1/2}$ adalah laju regangan lokal, dan δ^{ij} merupakan fungsi kronecker delta.

Untuk mengurangi fluktuasi didalam massa jenis, maka pada persamaan di atas diberi kekentalan difusi (D) yang diekspresikan dalam bentuk (Fourtakas et al., 2019):

$$D_a = 2\delta h c_s \sum_b (\rho_{ba}^T - \rho_{ab}^H) \frac{r_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} m_b}{r_{ab}^2 \rho_b} \quad (11)$$

dimana c_s adalah kecepatan suara, $\delta = 0.10$ merupakan koefisien yang mengontrol sistem difusi, T dan H masing-masing adalah komponen total dan hidrostatis dari kekentalan. Sementara, tekanan hidrostatis yang digunakan adalah:

$$\rho_{ab}^H = \rho_0 g z_{ab} \quad (12)$$

dimana z_{ab} adalah perbedaan posisi di z antara partikel a dan b .

Penggunaan delta-SPH untuk menghilangkan kebutuhan untuk normalisasi kemiringan densitas, yang dimana dapat mengurangi biaya komputasi (Antuono et al., 2012). Meskipun delta-SPH lebih umum dalam implementasi dalam beberapa masalah fisika, formulasi yang digunakan dalam penelitian ini dapat diterapkan secara akurat untuk menyelesaikan aliran yang didominasi oleh gravitasi (Fourtakas et al., 2019).

Karena DualSPHysics mengimplementasi formula SPH untuk menyelesaikan permasalahan fluida, maka untuk menghitung tekanan fluida (p) dari massa jenis, maka dibentuk **Persamaan 13** (Domínguez et al., 2022):

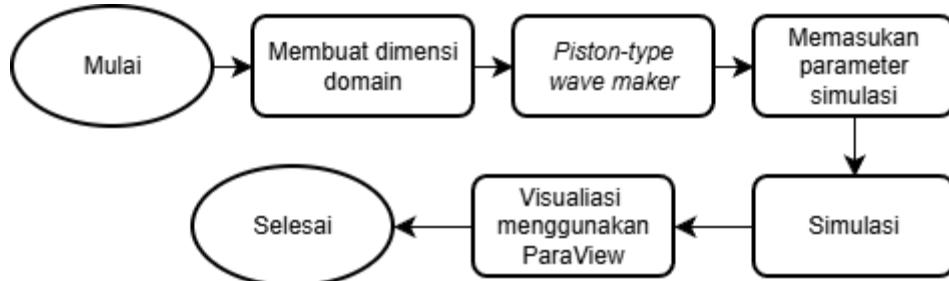
$$p = \frac{c_s^2 \rho_0}{\gamma_p} \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma_p} - 1 \right] \quad (13)$$

dimana ρ_0 adalah massa jenis fluida dan $\gamma_p = 7$ merupakan konstanta merupakan konstanta polytropic.

Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan *dualSPHysics* sebagai alat untuk mengimplementasikan

metode *smoothed particle hydrodynamics*. Simulasi dilakukan di *software* FreeCAD dengan macros designSPHysics didalamnya. Selanjutnya, untuk visualisasi secara dua dimensi akan dilakukan di Paraview. Berikut adalah tahapan yang harus dilakukan untuk simulasi di FreeCAD:



Gambar 1. Diagram alir penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

Pada pembahasan, dituliskan hasil-hasil apa saja yang diperoleh dalam penelitian. Dibahas dengan uraian yang komprehensif namun ringkas dan padu.

Parameter

Simulasi akan dilakukan di sebuah domain berbentuk balok dengan konfigurasi panjang 8080 mm, lebar 3274 mm, dan tinggi 500 mm, dimensi simulasi dipilih untuk menyesuaikan keadaan batimetri dan untuk mengurangi waktu komputasi. **Tabel 1** menunjukkan parameter *setup* pada dualSPHysics. Simulasi ini akan dilakukan selama 6 detik, dengan koefisien untuk *time-step* waktu simulasi adalah 0.025 untuk menghindari waktu komputasi yang terlalu lama. Total partikel yang dalam simulasi ini adalah 17451 partikel dengan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan simulasi adalah 4 jam 52 menit. Parameter yang dipilih merupakan parameter default untuk melakukan simulasi gelombang air laut seperti pada penelitian (Fourtakas et al., 2019).

Tabel 1. Parameter dualSPHysics

No.	Parameter	
1.	<i>Kernel Function</i>	<i>Wendland</i>
2.	<i>Time-step algorithm</i>	<i>Symplectic</i>
3.	<i>Viscosity treatment</i>	<i>Artificial viscosity</i>
4.	<i>Coefsound</i>	20
5.	<i>Particle size (m)</i>	0.015
6.	<i>Coefh</i>	1.2
7.	<i>CFL number</i>	0.2
8.	<i>Time simulation (s)</i>	6

Simulasi akan dilakukan secara dua dimensi, oleh karena itu koordinat 7.5626° bujur timur



dan 188.17578° lintang selatan akan dipilih untuk menggambarkan perairan sekitarnya, dengan asumsi perairan sekitar koordinat tersebut memiliki ketinggian gelombang yang sama, data yang digunakan adalah ketinggian gelombang (H_s) saat gelombang periode tertinggi dan terendah pada tanggal 1 Januari 2024 berikut.

Tabel 2. Data observasi BMKG gelombang air laut saat periode tertinggi

Waktu (detik)	H_s (m)
1	0.3112
2	0.3249
3	0.5190
4	0.5332
5	0.5526
6	0.5190

Tabel 3. Data observasi BMKG gelombang air laut saat periode terendah

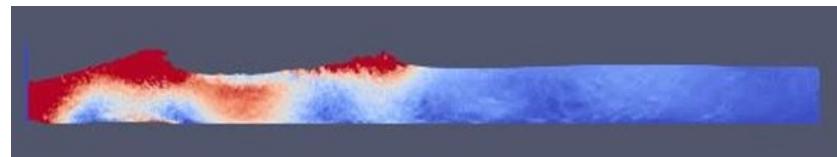
Waktu (detik)	H_s (m)
1	0.3280
2	0.3397
3	0.3195
4	0.5190
5	0.2847
6	0.2690

Simulasi saat gelombang tertinggi

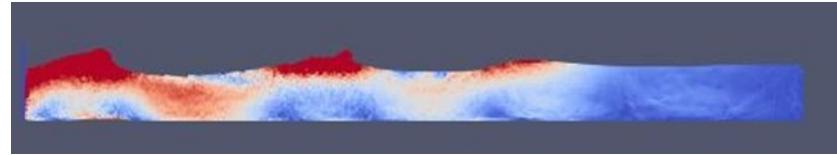
Hasil simulasi menggunakan *piston-type wave-maker* di koordinat 7.5626° bujur timur dan 188.17578° lintang selatan pada saat ketinggian gelombang mencapai ketinggian maksimal diberikan pada **Gambar 1** berikut.



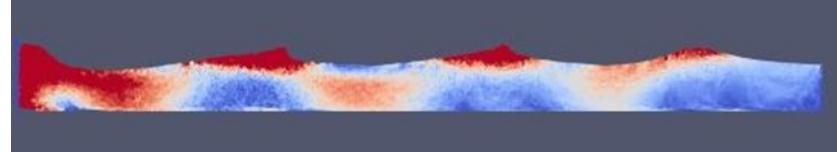
a) Hasil simulasi gelombang saat $t = 1$



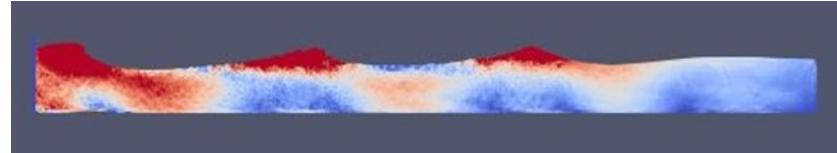
b) Hasil simulasi gelombang saat $t = 2$



c) Hasil simulasi gelombang saat $t = 3$



c) Hasil simulasi gelombang saat $t = 4$



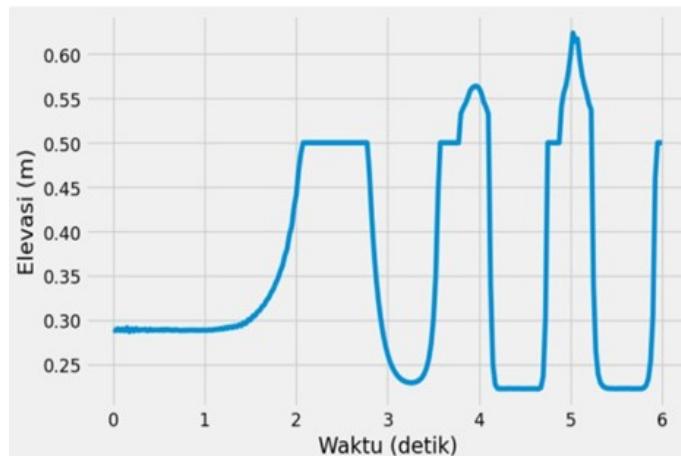
d) Hasil simulasi gelombang saat $t = 5$



e) Hasil simulasi gelombang saat $t = 6$

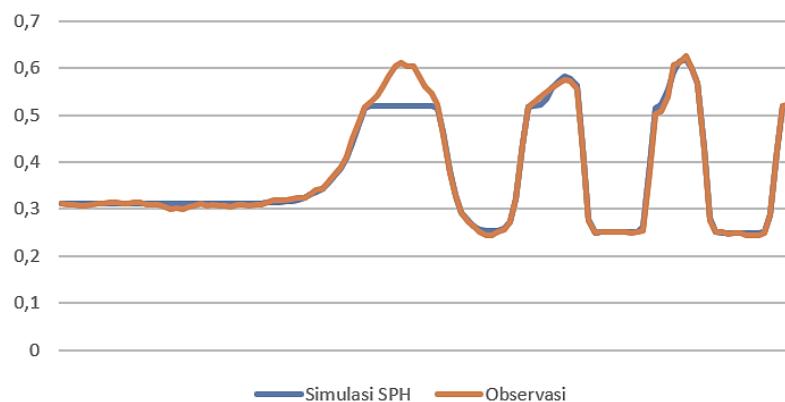
Gambar 1. Hasil simulasi gelombang air laut

Simulasi gelombang dilakukan selama 6 detik, dengan tinggi perairan adalah 0,5 meter dengan ketinggian gelombang untuk *piston* 0,3102 meter, indikator warna mengidentifikasi kecepatan gelombang, semakin merah menandakan kecepatan gelombang semakin tinggi. Pada detik pertama, gelombang mulai terbentuk dari arah masuk yang ditandai dengan perubahan kecepatan partikel fluida secara signifikan di sekitar arah masuk gelombang. Pada detik kedua dan ketiga, gelombang utama mulai terbentuk menuju elevasi puncak maksimal gelombang yang tercapai diantara detik kedua dan ketiga, di mana kecepatan gelombang juga mencapai nilai maksimum. Setelah itu, gelombang mengalami penyebaran, sehingga terlihat penurunan elevasi ketinggian gelombang dan terdapat fluktuasi kecil antara detik keempat dan pada detik kelima gelombang kembali terbentuk menuju elevasi maksimal. Data elevasi puncak gelombang selama 6 detik waktu simulasi pada **Gambar 3** berikut.



Gambar 2. Elevasi puncak gelombang (m) terhadap waktu (detik)

Berdasarkan **Gambar 2**, puncak gelombang tertinggi terjadi di detik ke 5 dengan tinggi elevasi gelombang mencapai 0.6 meter. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dalam kurun waktu 5 detik, gelombang dengan ketinggian 0.3 meter akan mencapai puncak dengan ketinggian 0.6 meter.

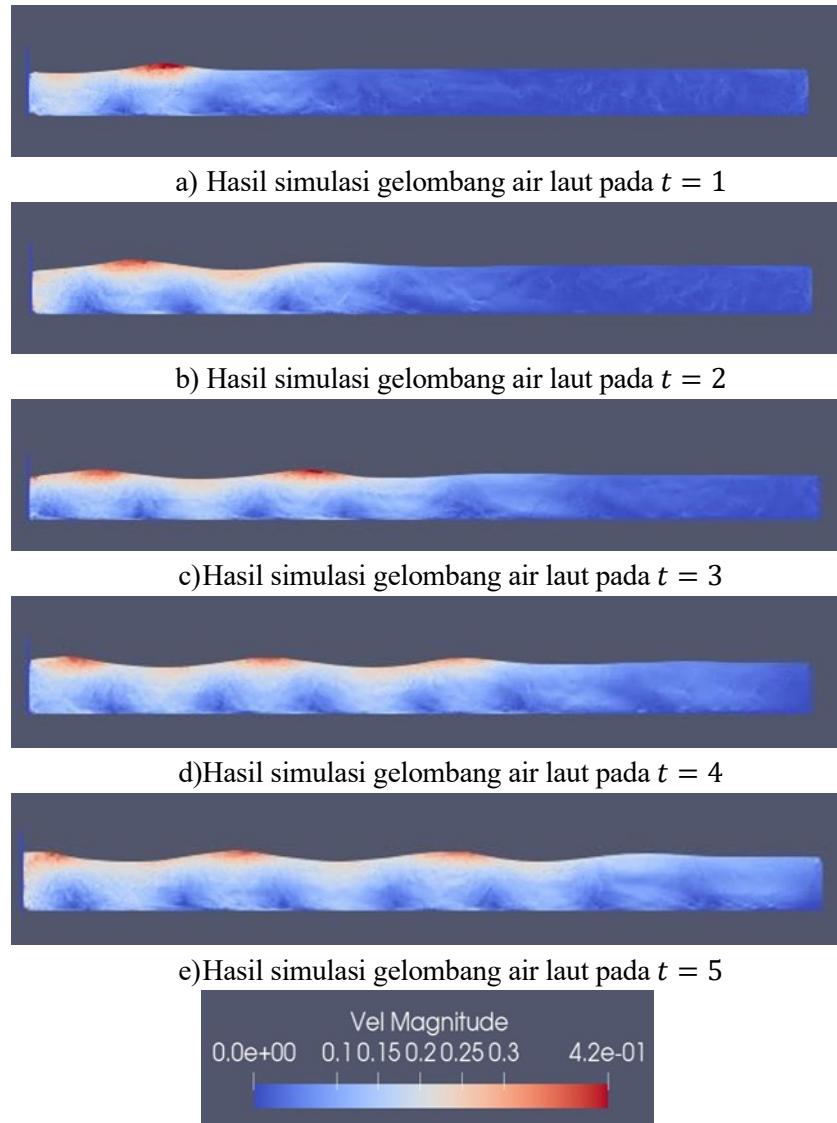


Gambar 3. Perbandingan elevasi antara data observasi dan data simulasi

Grafik pada **Gambar 3** menunjukkan validitas model simulasi yang sangat baik dalam mereplikasi data observasi elevasi air. Hasil statistik menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan nilai *Root Mean Squared Error* (RMSE) 0.0193, yang berarti rata-rata penyimpangan antara hasil simulasi dan data observasi hanya sebesar 1.93 cm. Keunggulan model ini semakin diperkuat oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.97973, yang mengindikasikan bahwa model mampu menjelaskan hampir 98% variabilitas data aktual atau observasi.

Simulasi saat gelombang terendah

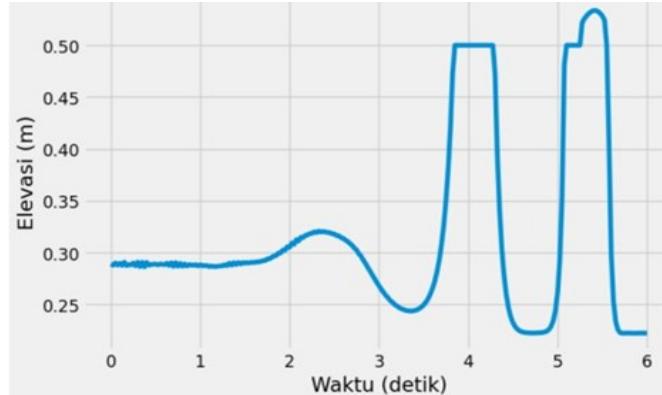
Hasil simulasi menggunakan *piston-type wave-maker* di koordinat 7.5626° bujur timur dan 188.17578° lintang selatan pada saat gelombang mencapai ketinggian minimal pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 4. Hasil simulasi gelombang air laut

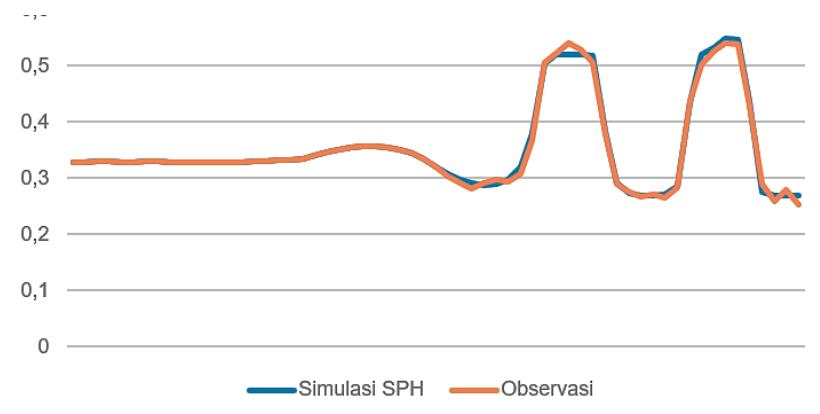
Simulasi gelombang dilakukan selama 6 detik, dengan tinggi perairan adalah 0,5 meter dengan ketinggian gelombang untuk piston 0,1074 meter, indikator warna menggambarkan kecepatan gelombang, semakin merah menandakan kecepatan gelombang semakin tinggi. Pada detik pertama, gelombang mulai terbentuk dari arah masuk yang ditandai dengan perubahan kecepatan partikel fluida signifikan di sekitar arah masuk gelombang. Pada detik kedua, gelombang kecil terbentuk lalu gelombang mengalami penyebaran dan kembali naik hingga ke elevasi puncak didetik ke-empat dan ke-lima. Data elevasi puncak gelombang selama 6 detik

waktu simulasi diberikan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Elevasi puncak gelombang (m) terhadap waktu (detik)

Berdasarkan **Gambar 5**, puncak gelombang tertinggi terjadi di antara detik ke 5,5 dengan tinggi elevasi gelombang mencapai 0.5 meter. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa dalam kurun waktu 5,5 detik, gelombang dengan ketinggian 0.1 meter akan mencapai puncak dengan ketinggian 0.5 meter.



Gambar 6. Perbandingan elevasi antara data observasi dan data simulasi

Grafik pada **Gambar 6** menunjukkan validitas model simulasi yang sangat baik dalam mereplikasi data observasi elevasi air. Hasil statistik menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dengan nilai *Root Mean Squared Error* (RMSE) 0.0063, yang berarti rata-rata penyimpangan antara hasil simulasi dan data observasi hanya sebesar 6 mm. Keunggulan model ini semakin diperkuat oleh nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.9938, yang mengindikasikan bahwa model mampu menjelaskan hampir 99% variabilitas data aktual atau observasi.

Pembahasan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) di Selat Madura memiliki akurasi yang sangat tinggi. Kesesuaian pola antara elevasi output



simulasi SPH dan data observasi lapangan didukung oleh nilai koefisien determinasi (R^2) mencapai 0.9938. Hal ini sesuai dengan kemampuan SPH dalam menangani interaksi fluida yang kompleks melalui diskritisasi partikel kecil (Lo & Shao, 2002).

Keakuratan model yang ditunjukkan dengan nilai RMSE rendah (0.0063) membuktikan bahwa fungsi kernel yang digunakan dalam SPH berhasil menjaga stabilitas partikel dalam simulasi (Wendland, 1995). Validasi numerik yang kuat ini serupa dengan efektivitas kerangka kerja SPH dalam menginvestigasi interaksi gelombang laut yang telah diuji pada berbagai struktur terapung (Tafuni dkk., 2023).

Secara spesifik, keberhasilan model dalam menjelaskan 99% variansi data aktual di Selat Madura memberikan kontribusi penting sebagai eksplorasi awal pemodelan numerik di wilayah tersebut. Metode berbasis partikel ini memberikan hasil yang lebih halus dan presisi dalam menggambarkan pergerakan gelombang dibandingkan metode konvensional (Crespo dkk., 2011). Dengan tingkat reliabilitas yang tinggi, simulasi ini dapat digunakan sebagai dasar analisis hidrodinamika lebih lanjut untuk mendukung keselamatan pelayaran maupun perencanaan infrastruktur pantai di Selat Madura (Toding, 2024).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa metode *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) melalui perangkat lunak DualSPHysics berhasil diimplementasikan untuk simulasi dinamika gelombang air laut di Selat Madura dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Simulasi yang mengintegrasikan data harian BMKG melalui mekanisme *piston-type wave-maker* terbukti mampu mereplikasi pola fluktuasi elevasi air laut secara presisi. Hal ini dibuktikan melalui nilai validasi model yang menunjukkan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.0193 dan 0.0063, serta nilai koefisien determinasi (R^2) yang mencapai 0.97973 hingga 0.9938. Hasil statistik tersebut mengonfirmasi adanya hubungan linier yang sangat kuat antara tinggi gelombang input dan output simulasi, di mana model mampu menjelaskan hingga 99% variansi data aktual. Sebagai eksplorasi awal di perairan Selat Madura, metode SPH memiliki kekurangan pada biaya komputasi yang tinggi. Untuk melakukan simulasi gelombang selama 6 detik diperlukan waktu 4 jam 52 menit. Penelitian ini menunjukkan bahwa pengembangan metode berbasis partikel SPH sebagai instrumen numerik yang reliabel untuk memodelkan karakteristik hidrodinamika lokal perlu dilakukan. Sehingga dapat digunakan sebagai referensi ilmiah dalam analisis keselamatan pelayaran maupun perencanaan infrastruktur lepas pantai di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada UINSA yang telah memberi fasilitas sehingga karya ini bisa dibuat, serta terimakasih untuk Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Perak yang telah menerima penulis untuk belajar selama magang di sana.



DAFTAR PUSTAKA

- Adami, S., Hu, X. Y., & Adams, N. A. (2012). A generalized wall boundary condition for smoothed particle hydrodynamics. *Journal of Computational Physics*, 231(21), 7057–7075. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2012.05.005>
- Adriat, R., Muhardi, Rsiko, & Ramat, M. F. (2024). Karakteristik Gelombang Laut di Perairan Pantai Samudera Indah Kabupaten Bengkayang Kalimantan Barat. *MANFISH : Marine, Environment, Adn Fisheries*, 5. <https://doi.org/https://doi.org/10.31573/manfish.v5i1.725>
- Ahmad, A. L., Nurisman, N., Achiari, H., & Setiawati, E. (2022). Kajian Karakteristik Gelombang di Kecamatan Bumi Waras, Lampung. *Marlin*, 3(1), 55. <https://doi.org/10.15578/marlin.v3.i1.2022.55-66>
- Altomare, C., Scandura, P., Cáceres, I., A. D. A. van der, & Viccione, G. (2023). Large-scale wave breaking over a barred beach: SPH numerical simulation and comparison with experiments. *Coastal Engineering*, 185, 104362. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2023.104362>
- Antuono, M., Colagrossi, A., & Marrone, S. (2012). Numerical diffusive terms in weakly-compressible SPH schemes. *Computer Physics Communications*, 183(12), 2570–2580. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.07.006>
- Dalrymple, R. A., & Rogers, B. D. (2006). Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering*, 53(2–3), 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.10.004>
- Domínguez, J. M., Fourtakas, G., Altomare, C., Canelas, R. B., Tafuni, A., García-Feal, O., Martínez-Estévez, I., Mokos, A., Vacondio, R., Crespo, A. J. C., Rogers, B. D., Stansby, P. K., & Gómez-Gesteira, M. (2022). DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems. *Computational Particle Mechanics*, 9(5), 867–895. <https://doi.org/10.1007/s40571-021-00404-2>
- Dumatubun, I. A. P. P., Widodo Setiyo Pranowo, Aida Sartimbul, Johar Setiyadi, Syarifah Hikmah Julinda Sari, & Fahreza Okta Setyawan. (2024). Karakteristik Arus Permukaan Laut pada Selat Madura. *Jurnal Chart Datum*, 10(1), 1–10. <https://doi.org/10.37875/chartdatum.v10i1.325>
- Fernando, Z., & Mailoa, E. (2024). Implementasi Time Series Dalam Prediksi Jumlah Keberangkatan Penumpang di Pelabuhan Tanjung Perak. *Jutisi: Jurnal Ilmiah Teknik Informatika Dan Sistem Informasi*. www.bps.go.id
- Fourtakas, G., Dominguez, J. M., Vacondio, R., & Rogers, B. D. (2019). Local uniform stencil (LUST) boundary condition for arbitrary 3-D boundaries in parallel smoothed particle hydrodynamics (SPH) models. *Computers & Fluids*, 190, 346–361. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2019.06.009>
- Haiyqal, S. V., Ismanto, A., Indrayanti, E., & Andrianto, R. (2023). Karakteristik Tinggi Gelombang Laut pada saat Periode Normal, El Niño dan La Niña di Selat Makassar. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(1), 190–202. <https://doi.org/10.14710/jkt.v26i1.17003>



- Hu, X. Y., & Adams, N. A. (2006). A multi-phase SPH method for macroscopic and mesoscopic flows. *Journal of Computational Physics*, 213(2), 844–861. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2005.09.001>
- Hwang, Y. K., Bolander, J. E., Lim, Y. M., & Hong, J.-W. (2021). Coupling of SPH and Voronoi-cell lattice models for simulating fluid–structure interaction. *Computational Particle Mechanics*, 8(4), 813–823. <https://doi.org/10.1007/s40571-020-00371-0>
- Hwang, Y. K., Jin, S., Hong, J. W., & Sohn, I. (2024). An offline coupling approach for efficient SPH simulations of long-distance tsunami events using wave source boundary condition. *Advances in Engineering Software*, 192. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2024.103632>
- Khasanah, U. (2019). *Implementasi Metode Volume Hingga Pada Gelombang Air Laut di Perairan Selat Sunda*. Universitas Islam Negeri Sunan Ampel Surabaya.
- Liu, G. R., & Liu, M. B. (2003). *Smoothed Particle Hydrodynamics*. WORLD SCIENTIFIC. <https://doi.org/10.1142/5340>
- Nadir, M., Anshari, A. I., & Jafar, I. (2021). Analisis Karakteristik Gelombang dan Pasang Surut Pasca Penambangan Pasir Laut di Perairan Kabupaten Takalar. *Prosiding Semnas Politani Pangkep*, 2.
- PT PELNI (Persero). (2025, May 17). *PELNI Layani Lebih Dari 5 Juta Penumpang Sepanjang Tahun 2024*. <Https://Www.Pelni.Co.Id/Pelni-Layani-Lebih-Dari-5-Juta-Penumpang-Sepanjang-Tahun-2024>. PT PELNI (Persero)
- PT Terminal Petikemas Surabaya (TPS). (2024). *Visi PT Terminal Petikemas Surabaya*. <Https://Www.Tps.Co.Id/Profil/Visi>.
- Purwanto, E., Dasion, A. G. R., & Ayu, M. D. (2024). Jerata Disrupsi:Habitus dan Resiliensi Nelayan Dalam Menghadapi Perubahan Iklim di Desa Pasongsongan, Sumenep Madura. *Seminar Nasional Sosiologi: SeNSosio*, 5, No1.
- Ravizqi, A. D. (2023). *Analisa Risiko Tabrakan Kapal Pada Platform di Perairan Selat Madura*. Institut Teknologi Sepuluh November.
- Salis, N., Hu, X., Luo, M., Reali, A., & Manenti, S. (2024). 3D SPH analysis of focused waves interacting with a floating structure. *Applied Ocean Research*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.103885>
- Sitompul, G. S., Kurniawan, E., & Febrianto, T. (2023). *Karakteristik Gelombang Air Laut Berdasarkan Data Angin Permusim di Perairan Bunguran Timur, Natuna*. Universitas Maritim Raja Ali Haji.
- Smagorinsky, J. (1963). General Circulation Experiments With The Primitive Equations. *Monthly Weather Review*, 91(3), 99–164. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1963\)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2)
- Sumarsono, Nurhadi, & Yuana, B. R. (2017). Studi Kecelakaan Kapal Pada Alur Pelayaran Barat Selat Madura Tanjung Perak Surabaya. *Jurnal Keilmuan Dan Aplikasi Teknik*, 18(Desember), 215–234.
- Tagliafierro, B., Karimirad, M., Altomare, C., Göteman, M., Martínez-Estévez, I., Capasso, S., Domínguez, J. M., Viccione, G., Gómez-Gesteira, M., & Crespo, A. J. C. (2023).
-



- Numerical validations and investigation of a semi-submersible floating offshore wind turbine platform interacting with ocean waves using an SPH framework. *Applied Ocean Research*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2023.103757>
- Toding, A. (2024). *Analisis Olah Gerak AHT HAMZA Saat Towing di Alur Pelayaran Persian Gulf*. Politeknik Ilmu Pelayaran .
- Wendland, H. (1995). Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree. *Advances in Computational Mathematics*, 4(1), 389–396. <https://doi.org/10.1007/BF02123482>
- Y.M. Lo, E., & Shao, S. (2002). Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible SPH method. *Applied Ocean Research*, 24(5), 275–286. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(03\)00002-6](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(03)00002-6)
- Zuhriyah, A., Triajie, H., Tripatmasari, M., Widodo, S., & Putera, A. J. (2025). Introduksi Teknologi Penangkapan Ikan dan Radio Komunikasi pada Nelayan Kecil di Kabupaten Sampang, Jawa Timur. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat : Abdimas Galuh*, 7, No 1. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.25157/ag.v7i1.16342>