

Pengembangan *Nested* Modeling Resolusi Tinggi dan Efisien untuk Simulasi Hidrodinamika–Gelombang dengan Interaksi Arus–Gelombang di Perairan Utara Jawa

YOSEFHA BR SEBAYANG¹, NINING SARI NINGSIH²

¹Departemen Oseanografi, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²Kelompok Keahlian Oseanografi Terapan dan Lingkungan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Email: nsningsih@itb.ac.id

Article History: Submitted 31 Agustus 2026 Revised 27 September 2026 Accepted 29 September 2026

ABSTRAK

Penelitian ini mengembangkan prosedur teknis *nested modeling* untuk simulasi hidrodinamika dan gelombang dengan mempertahankan resolusi spasial tinggi, representasi swell pada open boundary, interaksi arus–gelombang (wave–current interaction), serta komputasi paralel berbasis Message Passing Interface (MPI). Pendekatan ini dirancang meningkatkan efisiensi komputasi dengan mengurangi Central Processing Unit (CPU) time dibandingkan simulasi single core. Kinerja model dievaluasi pada kondisi spring tide 9–12 Oktober 2025 di Perairan Utara Jawa melalui empat eksperimen (EXP1–EXP4). Hasil menunjukkan interaksi arus–gelombang memberikan pengaruh kecil terhadap elevasi muka air, tetapi lebih nyata pada kecepatan arus di J1 sebagai perairan dangkal. Karakteristik significant wave height (SWH) menunjukkan pola spasial serupa, dengan nilai lebih tinggi di laut lepas dan menurun menuju pesisir. EXP4 menghasilkan SWH lebih rendah dibandingkan EXP3, terutama di perairan dangkal. EXP4 merupakan konfigurasi paling komprehensif dalam merepresentasikan proses fisik. Prosedur ini berpotensi diterapkan pada domain lebih luas dan periode lebih panjang melalui MPI.

Kata kunci: Hidrodinamika, gelombang, wave–current interaction, nested modeling, Perairan Utara Jawa

ABSTRACT

This study develops a technical nested modeling procedure for hydrodynamic and wave simulations while maintaining high spatial resolution, swell representation at the open boundary, wave–current interaction, and parallel computing using Message Passing Interface (MPI). The approach is designed to improve computational efficiency by reducing Central Processing Unit (CPU) time compared with single-core simulations. Model performance was evaluated under spring tide conditions from 9–12 October 2025 in the northern waters of Java through four experiments (EXP1–EXP4). The results show that wave–current interaction has a small effect on water surface elevation but a more pronounced effect on current velocity at J1, representing shallow water. Significant wave height (SWH) exhibits similar spatial patterns, with higher values offshore and decreasing toward the coast. EXP4 produces lower SWH than EXP3, particularly in shallow water. EXP4 is the most comprehensive configuration for representing physical processes. The procedure has potential for application to larger domains and longer periods through MPI.

Keywords: hydrodynamics, waves, wave–current interaction, nested modeling, northern waters of Jawa

1. PENDAHULUAN

Interaksi arus dan gelombang laut (*wave–current interaction*) merupakan proses penting dalam dinamika perairan pesisir (Lin dkk., 2021). Arus laut dapat memengaruhi karakteristik gelombang, seperti tinggi, arah, dan panjang gelombang. Arus yang searah dengan penjalaran gelombang dapat meningkatkan panjang dan menurunkan tinggi gelombang, sedangkan arus yang berlawanan arah dapat meningkatkan tinggi gelombang (Zhang dkk., 2022). Sebaliknya, gelombang juga memengaruhi kondisi hidrodinamika melalui tegangan radiasi (*radiation stress*) yang dapat menyebabkan perubahan elevasi muka air (Ji dkk., 2018). Fenomena *wave–current interaction* ini dapat disimulasikan melalui pemodelan numerik secara *coupled*. Dalam penelitian ini, model *coupled* yang digunakan adalah *Advanced Circulation* (ADCIRC) dan *Simulating WAVes Nearshore* (SWAN). Dalam sistem *coupled* tersebut, ADCIRC digunakan untuk mensimulasikan elevasi muka air dan arus (Mo dkk., 2023; Yuk dkk., 2022). Sementara itu, SWAN merupakan model spektral gelombang generasi ketiga yang menghitung parameter gelombang berdasarkan persamaan kesetimbangan aksi (Booij dkk., 1999; Vijayan dkk., 2023).

Simulasi jangka panjang diperlukan untuk merepresentasikan variabilitas gelombang, termasuk variasi musiman dan kondisi ekstrem (Islek dkk., 2021; Wandres dkk., 2023). Di sisi lain, untuk memperoleh informasi yang lebih detail di daerah pesisir dengan batimetri yang kompleks, diperlukan resolusi spasial tinggi. Peningkatan resolusi tersebut dapat meningkatkan jumlah elemen dan beban komputasi. Oleh karena itu, *unstructured grid* digunakan untuk mengikuti bentuk garis pantai yang kompleks dengan resolusi spasial lebih tinggi di wilayah pesisir dan semakin rendah ke arah lepas pantai. Selain itu, untuk mendukung simulasi jangka panjang dengan resolusi tinggi tersebut, *Message Passing Interface* (MPI) digunakan untuk menjalankan simulasi untuk meningkatkan kecepatan komputasi.

Gelombang *swell* dari luar domain perlu direpresentasikan di *open boundary*. Untuk model *nested, child model* akan mendapatkan nilai di *open boundary* dari *parent model* dalam bentuk spektrum 2D (*two-dimensional wave spectrum*) (Tim SWAN, 2026). Namun, untuk *parent model* agar informasi *swell* tertangkap (*capture*), nilai *wave spectrum* di *open boundary* dihitung berdasarkan pendekatan *parametric directional parameters*, yaitu *significant wave height* (SWH), *mean wave period* (MWP), *mean wave direction* (MWD), dan *directional spreading* (DS). Keempat parameter tersebut dapat diperoleh dari data analisis ulang iklim global (*climate reanalysis*), seperti data analisis ulang iklim global (*climate reanalysis*) generasi kelima dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) *Reanalysis* v5 (ERA5). Penerapan pendekatan *parametric directional parameters* di *open boundary* menghadapi kendala teknis ketika SWAN dijalankan menggunakan *unstructured grid* dan MPI. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, SWAN perlu dikopel (*couple model*) dengan ADCIRC menggunakan *unstructured grid* dan MPI.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prosedur teknis bagaimana memodelkan dinamika gelombang di suatu kawasan pesisir dengan resolusi spasial tinggi (~500 m di daerah perairan dangkal dan ~100 m di dekat pantai) dengan tetap mempertahankan nilai *swell* di *open boundary*, serta penggunaan *unstructure grid* dan MPI. Prosedur pemodelan diawali dengan menjalankan SWAN *standalone* dengan menggunakan *structured grid* pada *parent model* berdasarkan pendekatan *parametric directional parameters* di batas terbuka untuk menghasilkan nilai spektrum 2D yang akan digunakan sebagai syarat batas terbuka di *child model*. Selanjutnya, domain *child model* dijalankan menggunakan ADCIRC-SWAN dengan *unstructured grid* dan MPI.

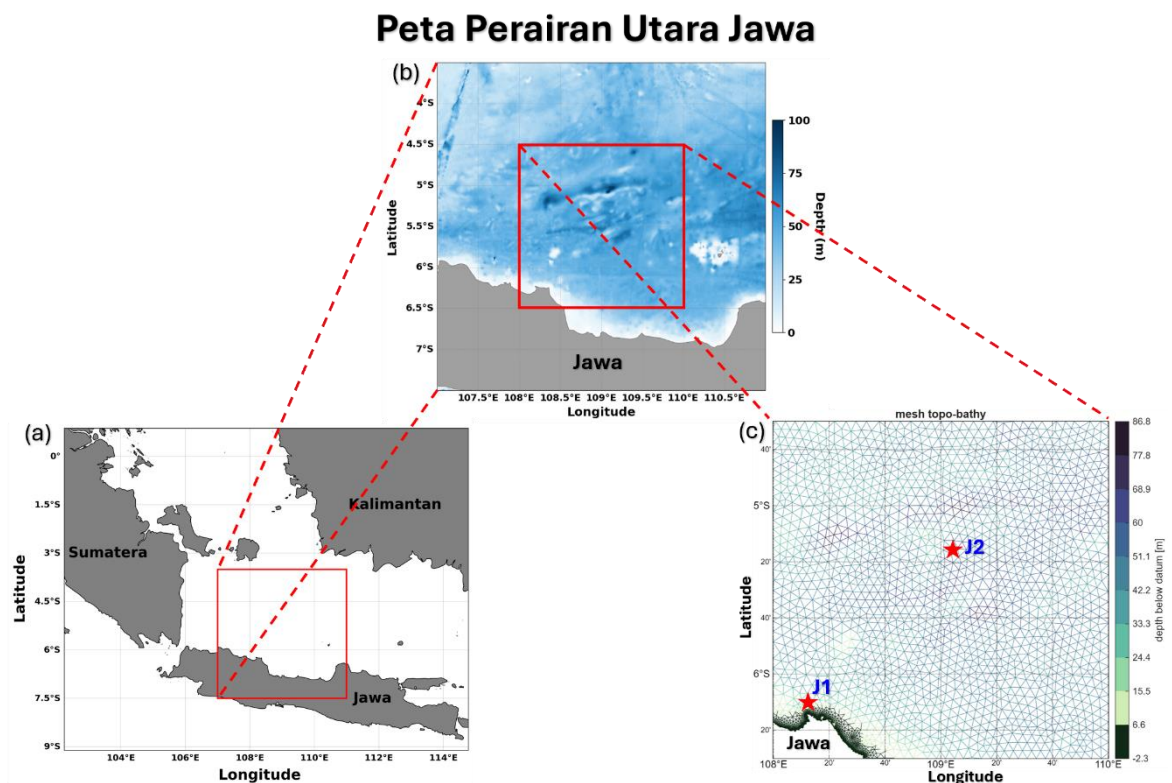
Metode ini diujicobakan untuk menganalisis karakteristik SWH, elevasi muka air, dan kecepatan arus di wilayah pesisir Perairan Utara Jawa pada bulan Oktober 2025. Perairan Utara Jawa merupakan perairan relatif semi tertutup yang dipengaruhi oleh sistem angin monsun (Pratama dkk., 2025) dan pasang surut, sehingga penerapan pemodelan *wave–current interaction* dengan resolusi spasial tinggi diperlukan untuk mendapatkan simulasi yang lebih representatif dengan kondisi alam. Beberapa penelitian telah mengkaji karakteristik gelombang di Laut Jawa dengan menggunakan model spektrum gelombang secara musiman dengan resolusi grid relatif kasar (11–13 km) dan tanpa memperhatikan pengaruh arus maupun interaksi antara keduanya (Sakina dkk., 2025; Dhanistha dkk., 2025; Adytia dkk., 2022; Rachmayani dkk., 2018), Studi pengaruh *wave–current interaction* secara *two-way coupling* di

Perairan Utara Jawa masih terbatas dan dalam hal ini untuk *one-way coupling* dengan memasukkan pengaruh gelombang terhadap arus telah dilakukan oleh Ningsih dkk. (2000) . Prosedur teknis *nested modeling* yang dikembangkan dalam penelitian ini diharapkan dapat diadopsi untuk simulasi model dengan domain yang lebih luas dan periode yang lebih panjang dengan tetap mempertahankan resolusi spasial yang tinggi, *swell* di *open boundary*, *wave-current interaction*, dan penggunaan MPI, sehingga *Central Processing Unit* (CPU) *time* relatif lebih cepat dibandingkan hanya menggunakan *single core* dalam suatu simulasi model.

2. METODOLOGI

2.1. Domain dan Data Input Model

Pemodelan pada penelitian ini menggunakan domain *parent* model dengan resolusi grid $0,0714^\circ \times 0,0714^\circ$ ($\sim 7,9$ km) mencakup wilayah $107,0$ – $111,0^\circ$ BT dan $3,5$ – $7,5^\circ$ LS (Gambar 1b). Sementara itu, domain *child* model difokuskan di Perairan Utara Jawa dengan resolusi grid 100 – 5000 m ($108,0$ – $110,0^\circ$ BT dan $4,5$ – $6,5^\circ$ LS) (Gambar 1c). Kedua domain tersebut digunakan untuk merepresentasikan kondisi perairan pada skala regional dan lokal dalam pemodelan.



Gambar 1. Ilustrasi Perairan Utara Jawa (a), Domain Parent Model (b), dan Domain Child Model (c) serta Lokasi Titik Verifikasi: J1 dan J2

Data gaya penggerak yang digunakan untuk menjalankan model adalah berupa komponen kecepatan angin (u_{10} dan v_{10}) serta *surface pressure* (sp) diperoleh dari ERA5 dengan resolusi spasial $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ dan interval waktu 1 jam. Data angin digunakan sebagai *forcing* pada model SWAN dan ADCIRC, sedangkan *surface pressure* hanya digunakan pada model hidrodinamika ADCIRC. Data pasang surut keluaran *Tidal Model Driver* (TMD) digunakan sebagai syarat batas terbuka pada model ADCIRC berupa amplitudo dan *phase lag* dari delapan komponen pasang surut (pasut), yaitu M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 dan Q1 dengan resolusi spasial $1/12^\circ$. Data batimetri diperoleh dari *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM15+) dengan resolusi spasial 15 arc-second (~ 463 m) (Tozer dkk., 2019).

Parameter syarat batas terbuka pada model SWAN untuk domain *parent* model diberikan berupa SWH, MWP, MWD, dan DS dengan resolusi $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ dan interval waktu 1 jam. Simulasi dijalankan menggunakan *time step* 30 menit untuk model SWAN dan 2 detik untuk ADCIRC dengan empat MPI

cores. Pada model ADCIRC koefisien Manning ditentukan berdasarkan kedalaman perairan, seperti diperlihatkan pada Tabel 1. Simulasi dilakukan selama 34 hari dengan periode *spin-up* selama tiga hari (28–30 September 2025) dan periode 1–31 Oktober 2025 untuk analisis.

Tabel 1. Konfigurasi dan Skenario Model

Spesifikasi Model			
No	Data	Model	
		SWAN	ADCIRC-SWAN
1	Domain	Parent model: $4^{\circ} \times 4^{\circ}$	Child model: $2^{\circ} \times 2^{\circ}$
2	Koordinat	107,0–111,0 °BT dan 3,5–7,5 °LS	108,0–110,0 °BT dan 4,5–6,5 °LS
3	Tipe grid	<i>Structured</i>	<i>Unstructured</i>
4	Resolusi grid	$0,0714^{\circ} \times 0,0714^{\circ}$ (~7,9 km)	100–5.000 m
5	Matriks	56×56	-
6	Node	-	9.470
7	Elemen	-	18.553
8	Manning	-	$d < 25 \rightarrow 0,03125$ $d = 25-50 \rightarrow 0,025$ $d > 50 \rightarrow 0,018$
9	<i>Open boundary conditions</i>	<i>Hybrid: wave spectrum berdasarkan parametric directional parameters (SWH, MWP, MWD, dan DS)</i>	Spektrum energi 2D (<i>file nested</i> dari domain <i>parent</i> model)
10	Waktu simulasi	28–30 September 2025 (<i>spin-up</i>) 1–31 Oktober 2025 (analisis)	
11	<i>Time step</i>	30 menit	ADCIRC: 2 detik; SWAN: 30 menit
12	<i>CPU Time</i>	23 menit 27 detik	48 menit 37 detik
13	<i>MPI Core</i>	4	

2.2. Desain Eksperimen Numerik

Empat konfigurasi eksperimen numerik digunakan untuk menganalisis *wave–current interaction*. EXP1 menggunakan model ADCIRC pada domain *child* model ($2^{\circ} \times 2^{\circ}$) dengan nilai pada syarat batas berupa amplitudo dan *phase lag*. EXP2 menggunakan ADCIRC-SWAN pada domain *child* model dengan menggunakan syarat batas spektrum 2D dari hasil simulasi SWAN domain *parent* model ($4^{\circ} \times 4^{\circ}$). EXP3 menggunakan konfigurasi yang sama dengan EXP2 dengan penambahan amplitudo dan *phase lag* pasang surut pada kondisi batas domain lokal, tetapi tidak mengaktifkan interaksi antara kedua model (*no wave–current interaction*). EXP4 menggunakan konfigurasi yang sama dengan EXP3 dan interaksi antara ADCIRC-SWAN diaktifkan (*with wave–current interaction*). Konfigurasi keempat eksperimen tersebut ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Konfigurasi Eksperimen Numerik

EXP	Domain Parent Model ($4^{\circ} \times 4^{\circ}$)		Domain Child Model ($2^{\circ} \times 2^{\circ}$)		Interaksi ADCIRC-SWAN
	Model	<i>Open Boundary Condition</i>	Model	<i>Open Boundary Condition</i>	
EXP1	-	-	ADCIRC	ADCIRC: Amplitudo dan <i>phase lag</i>	X
EXP2	SWAN	SWH, MWP, MWD, DS	ADCIRC-SWAN	SWAN: Spektrum 2D	X
EXP3	SWAN	SWH, MWP, MWD, DS	ADCIRC-SWAN	SWAN: Spektrum 2D ADCIRC: Amplitudo dan <i>phase lag</i>	X
EXP4	SWAN	SWH, MWP, MWD, DS	ADCIRC-SWAN	SWAN: Spektrum 2D ADCIRC: Amplitudo dan <i>phase lag</i>	✓

2.3. Coupled ADCIRC-SWAN

Model hidrodinamika ADCIRC versi 2D (*depth-integrated*) menyelesaikan persamaan *Generalized Wave Continuity Equation* (GWCE) untuk memperoleh elevasi muka air dan persamaan momentum

yang diintegrasikan terhadap kedalaman untuk menghitung kecepatan arus (Luettich & Westerink, 2004). Persamaan kontinuitas yang mendasari formulasi ADCIRC dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(UH)}{\partial x} + \frac{\partial(VH)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

sedangkan persamaan momentum dalam arah x dan y dituliskan sebagai:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial[\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{bx}}{H\rho_o} + \frac{M_x}{H} - \frac{D_x}{H} - \frac{B_x}{H} \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial[\zeta + P_s/g\rho_o - \alpha\eta]}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{H\rho_o} - \frac{\tau_{by}}{H\rho_o} + \frac{M_y}{H} - \frac{D_y}{H} - \frac{B_y}{H} \quad (3)$$

dengan H merupakan kedalaman total kolom air (m), t adalah waktu (s), x dan y adalah koordinat horizontal (m), U dan V masing-masing merupakan komponen kecepatan arus yang dirata-ratakan terhadap kedalaman dalam arah x dan y (m/s), ζ merupakan elevasi muka air (m), g adalah percepatan gravitasi (m/s²), dan f adalah parameter Coriolis (s⁻¹). P_s merupakan tekanan atmosfer di permukaan laut (Pa), ρ_o merupakan densitas referensi air laut (kg/m³), α adalah faktor elastisitas efektif bumi, dan η merupakan potensial pasut kesetimbangan (m). Komponen τ_{sx} dan τ_{sy} masing-masing merupakan tegangan geser permukaan dalam arah x dan y (N/m²), τ_{bx} dan τ_{by} masing-masing adalah komponen tegangan geser dasar dalam arah x dan y (N/m²), M_x dan M_y masing-masing merupakan gradien tegangan lateral dalam arah x dan y (m²/s²), D_x dan D_y masing-masing merupakan komponen dispersi momentum dalam arah x dan y (m²/s²), serta B_x dan B_y menyatakan gradien tekanan baroklinik terintegrasi secara vertikal (m²/s²).

Model SWAN menyelesaikan persamaan *action balance equation* untuk menghitung evolusi densitas aksi gelombang N dalam ruang geografis dan waktu (Tim SWAN, 2026). Persamaan tersebut dinyatakan sebagai:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(c_x N) + \frac{\partial}{\partial y}(c_y N) + \frac{\partial}{\partial \sigma}(c_\sigma N) + \frac{\partial}{\partial \theta}(c_\theta N) = \frac{S_{tot}}{\sigma} \quad (4)$$

dengan N merupakan densitas aksi gelombang (m² s/rad), t merupakan waktu (s), σ merupakan frekuensi radian intrinsik atau frekuensi relatif (rad/s), c_x dan c_y merupakan kecepatan propagasi energi gelombang di ruang geografis x dan y (m/s), c_σ merupakan kecepatan rambat dalam ruang frekuensi akibat *shoaling* (m/s), c_θ merupakan kecepatan rambat dalam ruang akibat refraksi (m/s), dan S_{tot} adalah *source/sink* yang mewakili semua proses fisik yang membangkitkan, mengurangi, atau mendistribusikan energi gelombang. Dalam simulasi model *coupled* ADCIRC-SWAN, kedua model saling bertukar informasi untuk memperhitungan interaksi gelombang dan arus. ADCIRC menyediakan informasi elevasi muka air dan arus kepada SWAN, sedangkan SWAN meneruskan informasi parameter gelombang melalui tegangan radiasi (*stress radiasi*) ke model ADCIRC.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

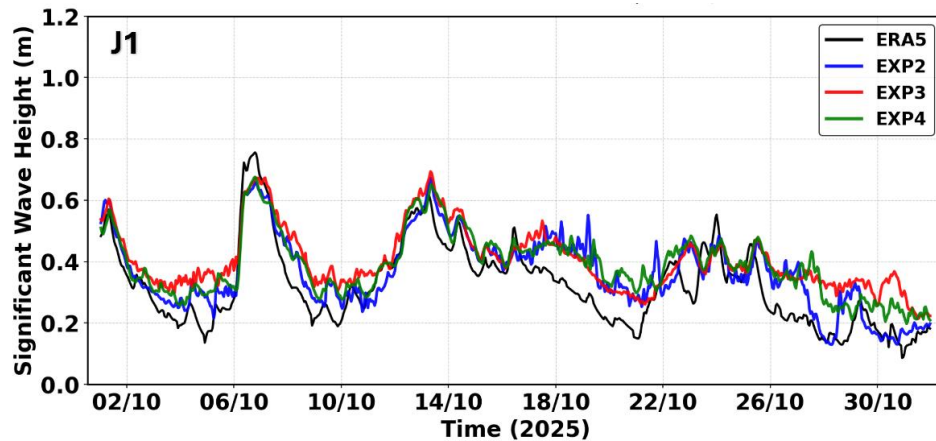
3.1. Hasil Verifikasi Model

Data TMD dan ERA5 digunakan untuk verifikasi hasil model. Verifikasi dilakukan di dua titik, yaitu J1 dan J2, seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Simulasi EXP2, EXP3, dan EXP4 dilakukan untuk membandingkan SWH antara hasil model dengan ERA5 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3. Sementara itu, EXP1, EXP2, dan EXP4 disimulasikan untuk membandingkan elevasi muka air dan kecepatan arus antara hasil model dengan TMD, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.

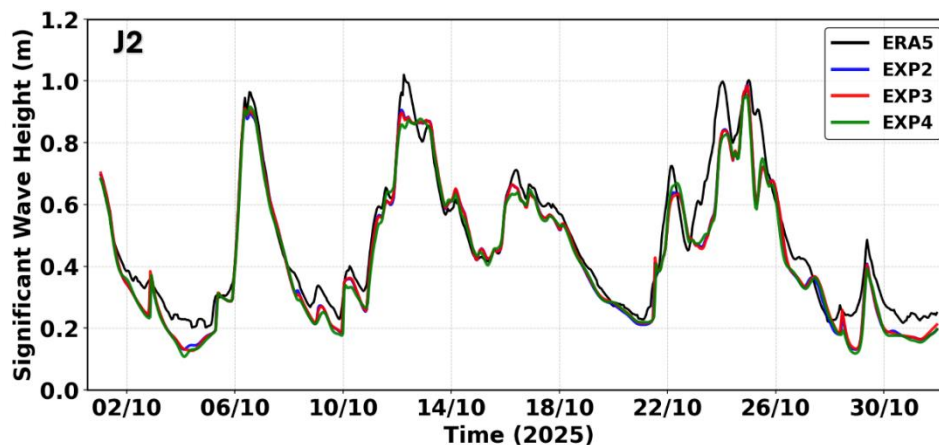
Tabel 3. Lokasi Titik Verifikasi

Lokasi	Bujur (°)	Lintang (°)	Kedalaman (m)
J1	108,207	-6,189	25,60
J2	109,079	-5,189	83,30

Berdasarkan informasi pada Tabel 4, EXP1 tidak memiliki nilai *Root Mean Square Deviation* (RMSD) dan *Correlation Coefficient* (CC) untuk parameter SWH karena hanya menjalankan ADCIRC. Sementara itu, untuk EXP2, EXP3, dan EXP4, nilai RMSD SWH di J1 berturut-turut sebesar (0,080; 0,105; 0,093) m, sedangkan di J2 relatif konsisten sebesar (0,068; 0,068; 0,073) m. Nilai CC menunjukkan kesesuaian yang tinggi untuk ketiga eksperimen, yaitu di J1 berturut-turut (0,866; 0,882; 0,887) dan di J2 (0,970; 0,968; 0,967).



Gambar 2. Perbandingan *Time Series* SWH (Tinggi Gelombang Signifikan) ERA5 dengan EXP2, EXP3, dan EXP4 di Lokasi J1. *Time* Menunjukkan Waktu Simulasi Tahun 2025.

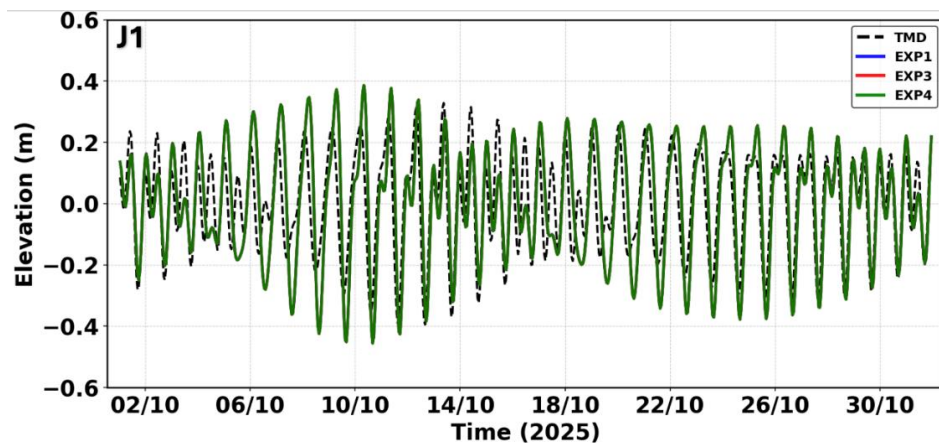


Gambar 3. Perbandingan *Time Series* SWH ERA5 dengan EXP2, EXP3, dan EXP4 di Lokasi J2

Nilai RMSD untuk elevasi muka air menunjukkan hasil yang baik dan konsisten, yaitu 0,130 m di J1 dan 0,100 m di J2 untuk EXP1, EXP3, dan EXP4. Pada komponen kecepatan arus arah-x, RMSD di J1 untuk EXP1, EXP3, dan EXP4 berturut-turut (0,118; 0,110; 0,110) m/s, sedangkan di J2 konsisten 0,057 m/s. Sementara itu, komponen kecepatan arus arah-y memiliki RMSD di J1 berturut-turut (0,029; 0,019; 0,019) m/s, sedangkan di J2 konsisten 0,059 m/s. Selanjutnya, nilai CC menunjukkan kesesuaian yang tinggi pada komponen kecepatan arus arah-x, yaitu di J1 untuk EXP1, EXP3, dan EXP4 berturut-turut (0,907; 0,909; 0,908), sedangkan di J2 konsisten 0,908. Sebaliknya, komponen kecepatan arus arah-y menunjukkan kesesuaian yang lebih rendah di J1, yaitu berturut-turut (0,294; 0,400; 0,415), dibandingkan dengan J2 yang konsisten 0,763. Hal ini dikarenakan lokasi J1 dekat dengan pesisir sehingga keterbatasan resolusi spasial data TMD dalam merepresentasikan variabilitas arus di wilayah pesisir dapat memengaruhi hasil verifikasi. Sementara itu, elevasi muka air memiliki nilai CC 0,721 di J1 dan 0,674 di J2 untuk EXP1, EXP3, dan EXP4 yang menunjukkan kesesuaian yang relatif baik dan konsisten.

Tabel 4. Evaluasi Performa Model

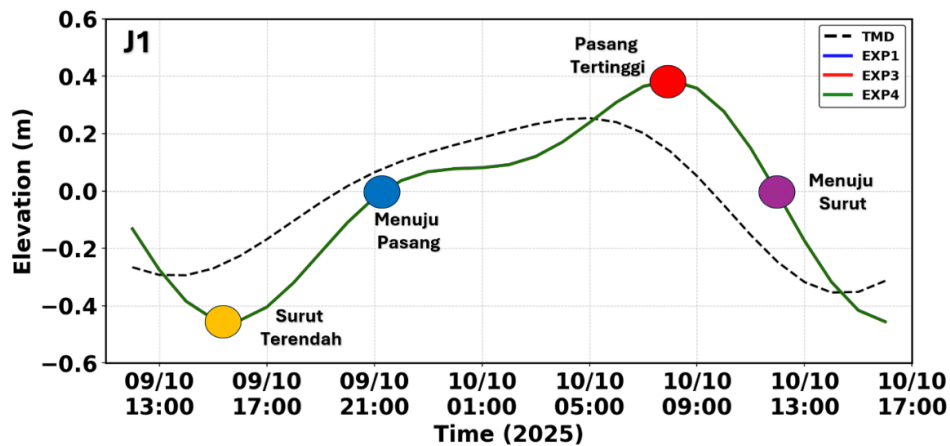
EXP	Lokasi	RMSD		CC	
		J1	J2	J1	J2
EXP1	SWH (m)	-	-	-	-
	Elevasi muka air (m)	0,130	0,100	0,721	0,674
	Kecepatan arus arah-x (m/s)	0,118	0,057	0,907	0,908
	Kecepatan arus arah-y (m/s)	0,029	0,059	0,294	0,763
EXP2	SWH (m)	0,080	0,068	0,866	0,970
	Elevasi muka air (m)	-	-	-	-
	Kecepatan arus arah-x (m/s)	-	-	-	-
	Kecepatan arus arah-y (m/s)	-	-	-	-
EXP3	SWH (m)	0,105	0,068	0,882	0,968
	Elevasi muka air (m)	0,130	0,100	0,721	0,674
	Kecepatan arus arah-x (m/s)	0,110	0,057	0,909	0,908
	Kecepatan arus arah-y (m/s)	0,019	0,059	0,400	0,763
EXP4	SWH (m)	0,093	0,073	0,887	0,967
	Elevasi muka air (m)	0,130	0,100	0,721	0,674
	Kecepatan arus arah-x (m/s)	0,110	0,057	0,908	0,908
	Kecepatan arus arah-y (m/s)	0,019	0,059	0,415	0,763

Gambar 4. Perbandingan *Time Series Elevation* (Elevasi Muka Air) TMD dengan EXP1, EXP3, dan EXP4 di Lokasi J1

Keterbatasan resolusi spasial data TMD yang lebih kasar dibandingkan resolusi model yang lebih tinggi menjadikan hasil model dipandang lebih representatif dalam menggambarkan kondisi hidrodinamika, khususnya di lokasi J1. Berdasarkan nilai RMSD dan CC elevasi muka air maupun kecepatan arus, EXP1, EXP3, dan EXP4 menunjukkan akurasi yang baik. Namun, karena tidak tersedia data observasi lapangan yang dapat digunakan sebagai pembandingan langsung, performa relatif masing-masing eksperimen belum dapat diverifikasi secara pasti. Secara keseluruhan, EXP4 dapat dikatakan sebagai konfigurasi paling baik dan komprehensif dalam merepresentasikan proses fisik karena telah mempertimbangkan interaksi arus–gelombang.

3.2. Karakteristik Elevasi Muka Air dan Kecepatan Arus

Analisis elevasi muka air dilakukan pada kondisi *spring tide*, yakni 09–10 Oktober 2025 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Hasil simulasi EXP1, EXP3, dan EXP4 terlebih dahulu dianalisis secara harmonik menggunakan T-Tide. Selanjutnya, hasil masing-masing eksperimen dibandingkan dengan data elevasi muka air dan kecepatan arus TMD.



Gambar 5. Perbandingan *Time Series Elevation Model* TMD dengan EXP1, EXP3, dan EXP4 pada 09–10 Oktober 2025

Perbandingan hasil ketiga eksperimen menunjukkan bahwa interaksi arus dan gelombang memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap elevasi muka air, baik di J1 maupun J2 (Tabel 5). Pada J1, nilai elevasi hampir sama antara EXP1, EXP3, dan EXP4 di seluruh kondisi pasut, yaitu pada kondisi surut terendah (-0,445; -0,446; -0,446) m, menuju pasang (-0,024; -0,023; -0,023) m, pasang tertinggi (0,385; 0,386; 0,386) m, dan menuju surut (-0,009; -0,010; -0,010) m. Pola serupa terlihat di J2, dengan nilai yang konsisten di ketiga eksperimen pada seluruh kondisi pasut, yaitu surut terendah (-0,316 m), menuju pasang (0,069 m), pasang tertinggi (0,236 m), dan menuju surut (-0,052 m). Hal ini menunjukkan bahwa nilai elevasi muka air pada EXP3 dan EXP4 relatif mendekati EXP1, dengan perbedaan nilai yang sangat kecil pada seluruh kondisi pasut.

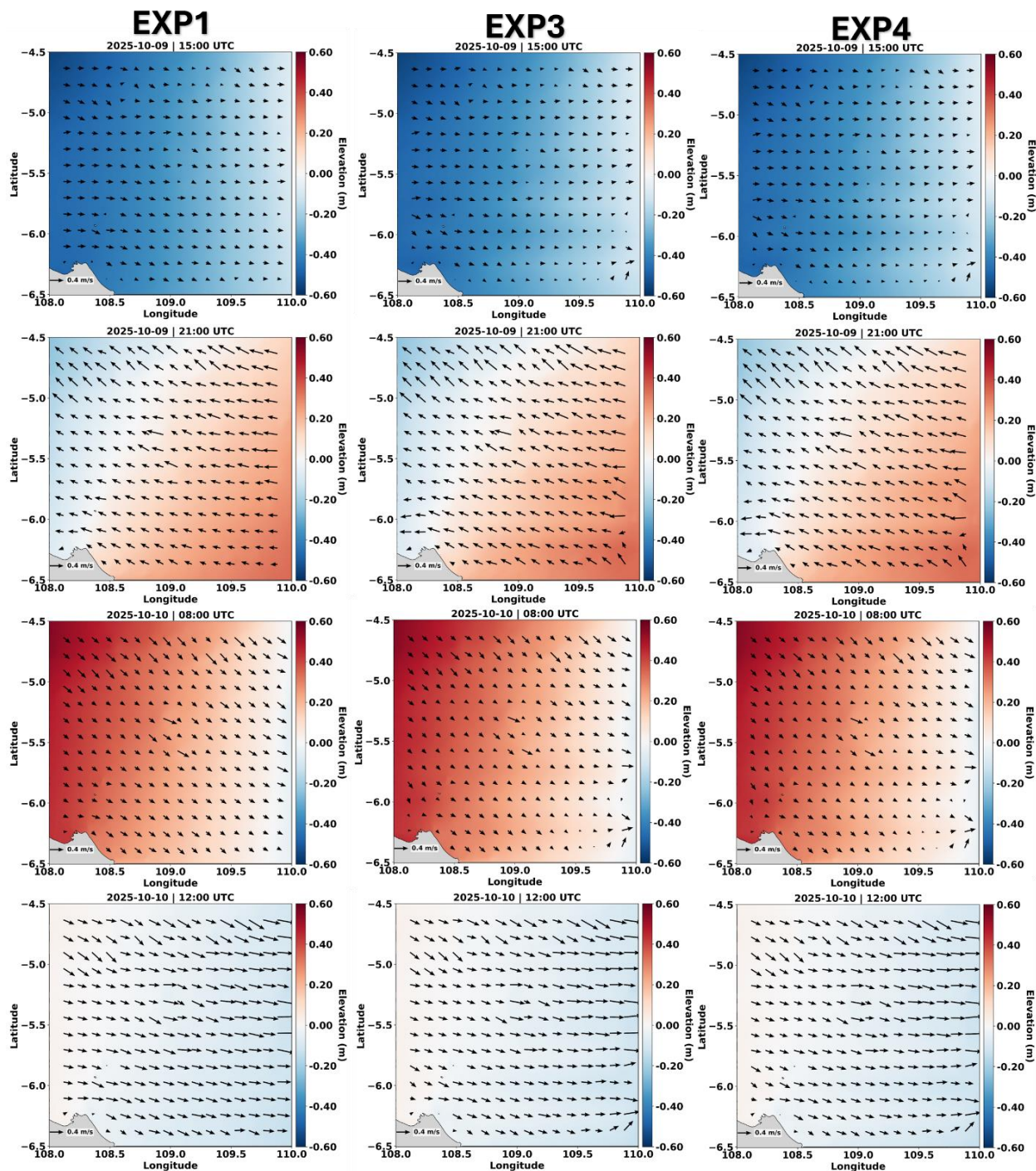
Tabel 5. Perbandingan Elevasi Muka Air dan Kecepatan Arus pada Empat Kondisi Pasut

Kondisi pasut		Elevasi Muka Air (m)		Kecepatan Arus (m/s)	
		J1	J2	J1	J2
Surut Terendah 09/10/2025 15:00	EXP1	-0,445	-0,316	0,123	0,154
	EXP3	-0,446	-0,316	0,117	0,154
	EXP4	-0,446	-0,316	0,117	0,154
Menuju Pasang 09/10/2025 21:00	EXP1	-0,024	0,069	0,278	0,226
	EXP3	-0,023	0,069	0,270	0,226
	EXP4	-0,023	0,069	0,270	0,226
Pasang Tertinggi 10/10/2025 08:00	EXP1	0,385	0,236	0,213	0,154
	EXP3	0,386	0,236	0,194	0,154
	EXP4	0,386	0,236	0,194	0,154
Menuju Surut 10/10/2025 12:00	EXP1	-0,009	-0,052	0,253	0,274
	EXP3	-0,010	-0,052	0,248	0,274
	EXP4	-0,010	-0,052	0,248	0,274

Sementara itu, magnitudo kecepatan arus menunjukkan perbedaan nilai yang kecil antara EXP1, EXP3, dan EXP4 di J1, sedangkan di J2 relatif tidak berubah pada seluruh kondisi pasut. Pada J1, kecepatan arus EXP1, EXP3, dan EXP4 berturut-turut pada kondisi surut terendah (0,123; 0,117; 0,117) m/s, menuju pasang (0,278; 0,270; 0,270) m/s, pasang tertinggi (0,213; 0,194; 0,194) m/s, dan menuju surut (0,253; 0,248; 0,248) m/s. Sementara itu, nilai di J2 konsisten di seluruh kondisi pasut, yaitu surut terendah (0,154 m/s), menuju pasang (0,226 m/s), pasang tertinggi (0,154 m/s), dan menuju surut (0,274 m/s).

Distribusi spasial elevasi muka air dan kecepatan arus pada Gambar 6 menunjukkan pola arah arus yang relatif serupa untuk ketiga eksperimen. Namun perbedaan magnitudo arus antar-eksperimen lebih terlihat di J1 dibandingkan J2. Hal ini sejalan dengan Song dkk. (2020) yang menyatakan bahwa interaksi arus dan gelombang memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap karakteristik arus di wilayah pesisir dibandingkan perairan lepas pantai. Sementara itu, penambahan interaksi arus-

gelombang pada EXP4 hanya memberikan perubahan kecil terhadap magnitudo arus dibandingkan EXP3, baik di daerah pesisir maupun lepas pantai.

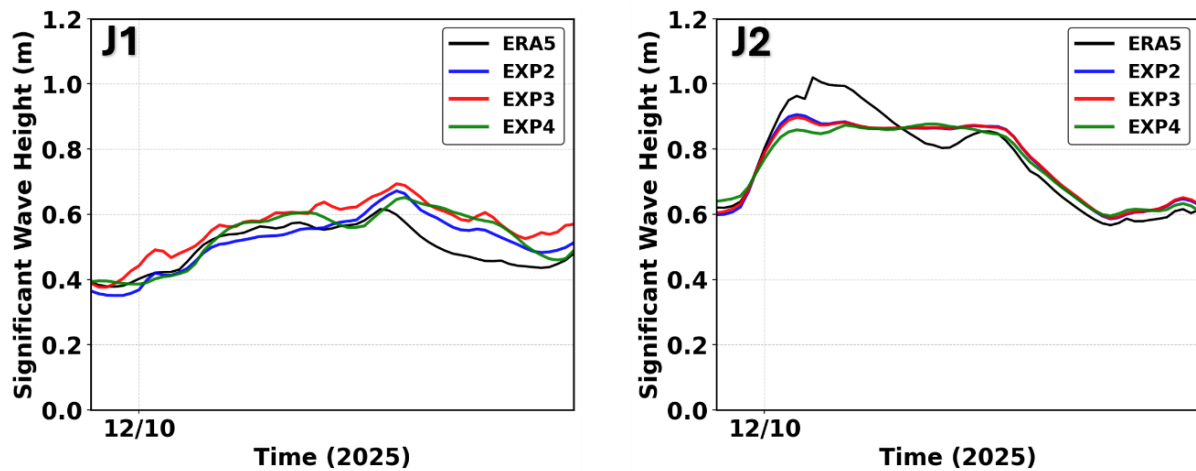


Gambar 6. Perbandingan Spasial *Elevation* dan Kecepatan Arus pada EXP1, EXP3, dan EXP4

3.3. Karakteristik SWH

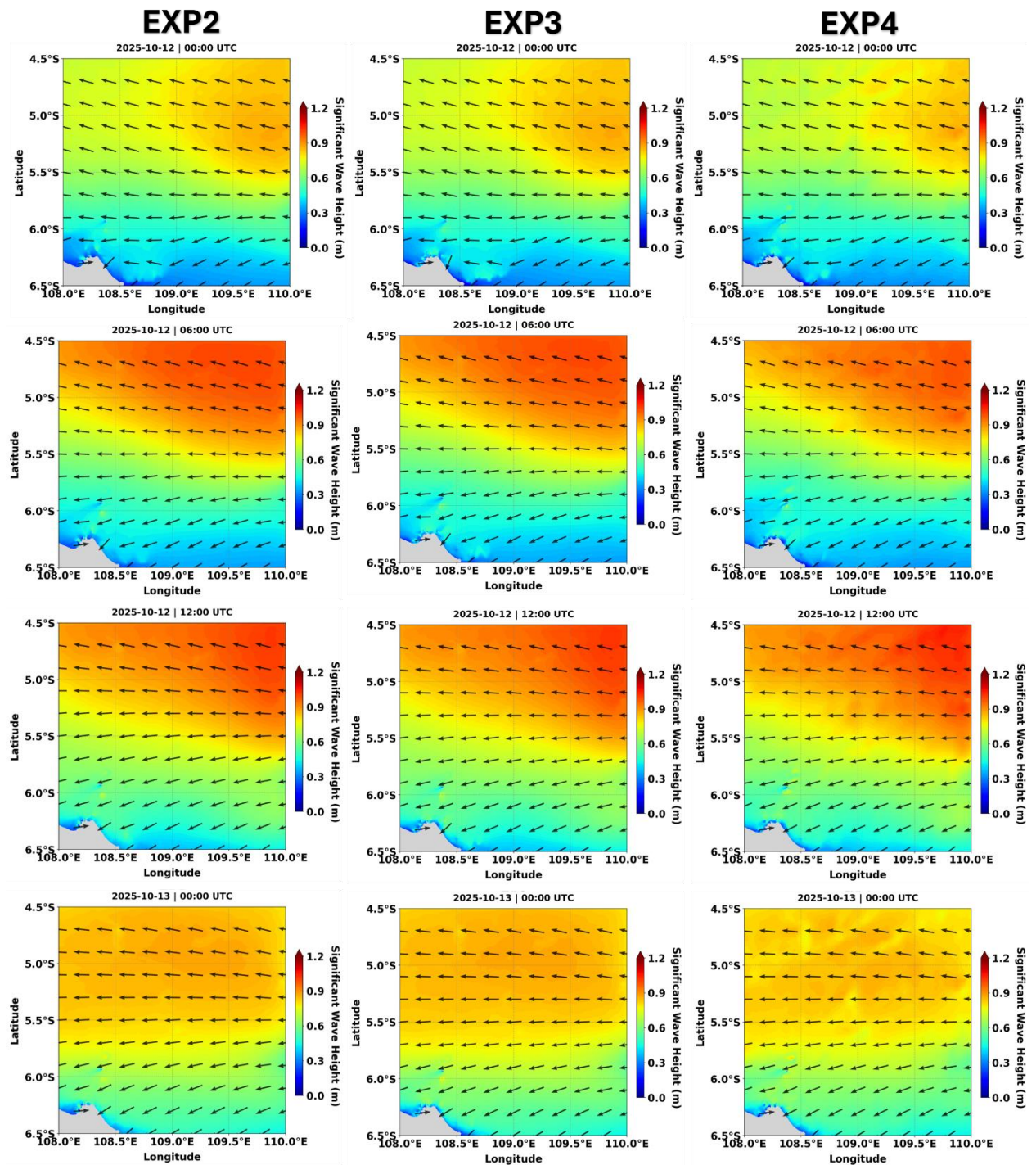
Secara spasial distribusi SWH pada seluruh eksperimen menunjukkan pola yang relatif konsisten menuju ke arah barat pada bulan Oktober. Nilai SWH cenderung lebih tinggi di bagian utara domain dan semakin rendah menuju wilayah pesisir di bagian selatan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8. Pada 12 Oktober 2025, peningkatan SWH terjadi pada pukul 06:00–12:00 UTC, terutama di bagian utara hingga timur laut domain, sedangkan wilayah dekat pantai menunjukkan nilai SWH yang lebih

rendah. Pada 13 Oktober 2025 pukul 00:00 UTC, SWH kembali menurun secara spasial. Pola ini menunjukkan bahwa nilai SWH cenderung lebih tinggi di perairan yang lebih dalam dan semakin rendah menuju wilayah pesisir yang dangkal. Selain itu, secara spasial EXP3 cenderung memiliki nilai SWH yang lebih tinggi dibandingkan EXP2 dan EXP4 pada sebagian besar domain. Hasil ini menunjukkan bahwa perbedaan konfigurasi eksperimen menghasilkan perubahan pada distribusi spasial SWH.



Gambar 7. Perbandingan *Time Series* SWH ERA5 dengan EXP2, EXP3, dan EXP4 pada 12 Oktober 2025

Untuk membuktikan nilai SWH pada EXP3 tersebut lebih besar maka dilihat secara temporal pola SWH pada J1 dan J2 selama periode 12 Oktober 2025 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Pada lokasi J1, EXP2 yang tidak mempertimbangkan arus dan elevasi muka air menunjukkan pola yang lebih halus dengan nilai SWH cenderung lebih tinggi dibandingkan ERA5. Penambahan arus dan elevasi muka air tetapi tidak ada interaksi dengan gelombang pada EXP3 menyebabkan fluktuasi serta menghasilkan nilai SWH yang lebih tinggi dibandingkan ERA5 dan EXP2. Sementara itu, EXP4 yang menerapkan konfigurasi *fully coupled* menunjukkan nilai SWH cenderung lebih rendah dibandingkan EXP3, tetapi lebih tinggi dibandingkan EXP2 dan ERA5. Perbedaan respon antara EXP2, EXP3, dan EXP4 ini menunjukkan bahwa penerapan interaksi arus dan gelombang memberikan perubahan yang lebih terlihat terhadap karakteristik SWH di J1. Sementara itu, pada J2 yang merepresentasikan perairan dalam, EXP2 dan EXP3, EXP4 menghasilkan pola yang lebih halus dan hampir serupa selama periode pengamatan, tetapi EXP4 cenderung menghasilkan nilai SWH yang sedikit lebih rendah. Penentuan skenario mana yang menghasilkan nilai SWH yang paling baik tidak dapat dilakukan secara kuantitatif dalam penelitian ini. Hal ini dikarenakan tidak tersedianya data observasi atau data lapangan sebagai pembanding untuk verifikasi. Meskipun demikian, EXP4 merupakan konfigurasi yang paling representatif secara fisis karena telah memasukkan arus dan elevasi muka air serta interaksinya terhadap gelombang, sehingga dinamika SWH yang dihasilkan diasumsikan lebih mendekati proses fisis yang sesungguhnya dibandingkan EXP2 dan EXP3.



Gambar 8. Perbandingan Spasial SWH EXP2, EXP3, dan EXP4 pada 12 Oktober 2025

4. KESIMPULAN

Pada penelitian ini telah dikembangkan prosedur teknis *nested* modeling yang mengintegrasikan resolusi spasial tinggi, representasi swell pada open boundary, wave–current interaction, serta komputasi paralel berbasis MPI. Integrasi tersebut memungkinkan simulasi dilakukan dengan CPU time yang relatif lebih efisien dibandingkan dengan simulasi yang hanya menggunakan single core. Pada kondisi spring tide tanggal 9–12 Oktober 2025, interaksi arus–gelombang memberikan pengaruh yang relatif kecil terhadap elevasi muka air, tetapi menghasilkan perubahan yang lebih nyata pada kecepatan arus, khususnya di

J1, yaitu kecepatan arus pada EXP1 dibandingkan dengan EXP3 dan EXP4 masing-masing berubah dari 0,123 menjadi 0,117 m/s pada saat surut terendah, dari 0,278 menjadi 0,270 m/s saat menuju pasang, dari 0,213 menjadi 0,194 m/s pada saat pasang tertinggi, dan dari 0,253 menjadi 0,248 m/s saat menuju surut. Sementara itu, di J2, kecepatan arus relatif konsisten pada keempat kondisi pasut, masing-masing sebesar 0,154, 0,226, 0,154, dan 0,274 m/s.

Untuk SWH, seluruh skenario menunjukkan pola spasial yang relatif serupa, dengan nilai yang lebih tinggi di laut lepas dan menurun ke arah perairan dekat pantai. Secara temporal, EXP2 menghasilkan variasi SWH yang relatif lebih halus, sedangkan penambahan variasi elevasi muka air dan arus pada EXP3 menghasilkan fluktuasi SWH yang lebih besar serta nilai yang cenderung lebih tinggi. Pada EXP4, penerapan wave–current interaction menyebabkan SWH cenderung lebih rendah dibandingkan EXP3. Perbedaan respons tersebut lebih nyata di J1, yang merepresentasikan perairan dangkal, dibandingkan J2 yang mewakili perairan yang lebih dalam. Karena penelitian ini tidak menggunakan data observasi lapangan sebagai pembanding, penentuan skenario mana yang paling akurat tidak dapat dilakukan secara kuantitatif. Meskipun demikian, EXP4 dinilai sebagai konfigurasi yang paling representatif secara fisis karena telah mengakomodasi interaksi arus dan gelombang secara menyeluruh, sehingga direkomendasikan sebagai pendekatan yang lebih sesuai untuk kajian dinamika gelombang di wilayah dengan pengaruh arus yang signifikan.

Secara keseluruhan, prosedur teknis *nested* modeling yang dikembangkan dalam penelitian ini menunjukkan potensi untuk diterapkan pada simulasi dengan cakupan domain yang lebih luas dan periode simulasi yang lebih panjang. Pendekatan tersebut memungkinkan resolusi spasial tinggi tetap dipertahankan, sekaligus mempertimbangkan propagasi *swell* dari *open boundary*, *wave–current interaction*, dan komputasi paralel berbasis MPI untuk meningkatkan efisiensi komputasi. Dengan demikian, pendekatan ini dapat menjadi dasar pengembangan simulasi hidrodinamika–gelombang yang lebih kompleks dan efisien untuk kebutuhan penelitian maupun aplikasi operasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) atas dukungannya dalam melakukan penelitian ini melalui Program EQUITY (Nomor Kontrak 4298/B3/DT.03.08/2025).

DAFTAR RUJUKAN

- Adytia, D., Saepudin, D., Pudjaprasetya, S. R., Husrin, S., & Sopaheluwakan, A. (2022). A Deep Learning Approach for Wave Forecasting Based on a Spatially Correlated Wind Feature, with a Case Study in the Java Sea, Indonesia. *Fluids*, 7(1), 39.
- Booij, N., Ris, R. C., & Holthuijsen, L. H. (1999). A Third-Generation Wave Model for Coastal Regions: 1. Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4).
- Dhanistha, W. L., Suntoyo, Rosyid, D. M., & Akbar, R. (2024). Design of Wave Spectrum in the Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1298, 012028.
- Islek, F., Yuksel, Y., Sahin, C., & Guner, H. A. A. (2021). Long-Term Analysis of Extreme Wave Characteristics Based on the SWAN Hindcasts Over the Black Sea Using Two Different Wind Fields. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 94, 101165.
- Ji, C., Zhang, Q., & Wu, Y. (2018). An Empirical Formula for Maximum Wave Setup Based on A Coupled Wave-Current Model. *Ocean Engineering*, 147, 215–226.
- Lin, S., Sheng, J., Ohashi, K., & Song, Q. (2021). Wave-Current Interactions During Hurricanes Earl and Igor in the Northwest Atlantic. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2021JC017609.
- Luettich, R., & Westerink, J. (2004). Formulation and Numerical Implementation of the 2D/3D ADCIRC Finite Element Model Version 44.XX. University of North Carolina at Chapel Hill.
- Mo, D., Wang, N., Hu, P., & Hou, Y. (2023). The Interaction between Storm Surge and Concomitant Waves in Shandong Peninsula. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(9), 1759.

- Ningsih, N. S., Yamashita, T., & Aouf, L. (2000). Three-Dimensional Simulation of Water Circulation in the Java Sea: Influence of Wind Waves on Surface and Bottom Stresses. *Natural Hazards*, 21, 145–171.
- Pratama, B. R., Pranowo, W. S., & Prasita, V. D. (2025). Analisis Karakteristik Arus pada Beberapa Kedalaman di Laut Jawa Sepanjang Tahun 2024. *Jurnal Chart Datum*, 11(1), 53–62.
- Rachmayani, R., Ningsih, N. S., Ramadhan, H., & Nurfitri, S. (2018). Analysis of Ocean Wave Characteristic in Western Indonesian Seas Using Wave Spectrum model. *MATEC Web of Conferences*, 147, 05001.
- Sakina, S. L., Ningsih, N. S., & Prayogi, A. (2025). Investigating Wave Characteristics in the Java Sea and Potential Influencing Factors: A Case Study of Coastal Flooding Along the Northern Coast of Semarang City, Indonesia (May 23, 2022). *Anthropocene Coasts*, 8(1), 44.
- Song, H., Kuang, C., Wang, X. H., & Ma, Z. (2020). Wave-Current Interactions During Extreme Weather Conditions in Southwest of Bohai Bay, China. *Ocean Engineering*, 216, 108068.
- The SWAN Team. (2026). SWAN User Manual: SWAN Cycle III version 41.51. Retrieved from https://swanmodel.sourceforge.io/online_doc/swanuse/swanuse.html.
- Tozer, B., Sandwell, D. T., Smith, W. H. F., Olson, C., Beale, J. R., & Wessel, P. (2019). Global Bathymetry and Topography at 15 Arc Sec: SRTM15+. *Earth and Space Science*, 6, 1847–1864.
- Vijayan, L., Huang, W., Ma, M., Ozguven, E., Ghorbanzadeh, M., Yang, J., & Yang, Z. (2023). Improving the Accuracy of Hurricane Wave Modeling in Gulf of Mexico with Dynamically-Coupled SWAN and ADCIRC. *Ocean Engineering*, 274, 114044.
- Wandres, M., Espejo, A., & Damlamian, H. (2023). Wave Climate Variability and Trends in Tuvalu Based on a 44-Year High-Resolution Wave Hindcast. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 128, e2022JC019523.
- Yuk, J.-H., Kang, J.-S., & Myung, H. (2022). Applicability Study of a Global Numerical Weather Prediction Model MPAS to Storm Surges and Waves in the South Coast of Korea. *Atmosphere*, 13, 591.
- Zhang, X., Simons, R., Zheng, J., & Zhang, C. (2022). A Review of The State of Research on Wave-Current Interaction in Nearshore Areas. *Ocean Engineering*, 243, 110202.