



Analisis Integratif Metode *Hindcasting* dan Pengukuran Lapangan untuk Pemodelan Tinggi dan Periode Gelombang di Pantai Glagah

***David S.V.L Bangguna¹, Irnovia B. Pakpahan², Marthen M Tangkeallo², Henny Indriyani Abulebu², Elce Misba Bansambua², Yulisnawati Lawodi², Elizabeth Gabriela Antameng¹, Sandi Eka Kurnia Zebua¹**

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel, Yogyakarta

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Sintuwu Maroso, Poso

^{*}bangguna@gmail.com

Received: 13 Juni 2025 Revised: 24 November 2025 Accepted: 27 November 2025

Abstract

The hindcasting method uses past wind data to estimate wave height (H_s) and wave period (T_p). The study aims to compare the wave height and period of the Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB), Finite Water Depth (FWD), and Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) hindcasting methods with field measurement results. Wind data is sourced from NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer (DAV) v2.4.9 for 2015-2024. The analysis results show that the wave height of the JONSWAP method is greater than the SMB and FWD methods. The wave height and period of the SMB and FWD methods have almost the same values. The difference between the three hindcasting methods is because the parameters used to calculate the wave height and period are different, the SMB method only uses the effective fetch length parameter (F_{eff}), the FWD method uses the effective fetch parameter (F_{eff}) and water depth (d), while the JONSWAP method uses the effective fetch parameter (F_{eff}) and wind speed (U_A). The wind speed (U_A) parameter in the JONSWAP method has a very significant effect on wave height and period. For coastal structure planning, the JONSWAP method is more recommended, because the resulting wave height can function as a safety factor.

Keywords: *Hindcasting, field measurement, wave height, wave period*

Abstrak

Metode hindcasting menggunakan data angin di masa lampau untuk memperkirakan tinggi gelombang (H_s) dan periode gelombang (T_p). Penelitian ini bertujuan membandingkan tinggi dan periode gelombang metode hindcasting Sverdrup-Munk-Bretschneider (SMB), Finite Water Depth (FWD), dan Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) dengan hasil pengukuran di lapangan. Data angin bersumber dari NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER), Data Access Viewer (DAV) v2.4.9 tahun 2015-2024. Dari hasil analisis menunjukkan tinggi gelombang metode JONSWAP lebih besar dibandingkan dengan metode SMB dan FWD. Tinggi dan periode gelombang metode SMB dan FWD nilainya yang hampir sama. Perbedaan ketiga metode hindcasting karena parameter yang digunakan untuk menghitung tinggi dan periode gelombang berbeda, metode SMB hanya menggunakan parameter panjang fetch efektif (F_{eff}), metode FWD menggunakan parameter fetch efektif (F_{eff}) dan kedalaman perairan (d), sedangkan metode JONSWAP menggunakan parameter fetch efektif (F_{eff}) dan kecepatan angin (U_A). Parameter kecepatan angin (U_A) dalam metode JONSWAP memberikan pengaruh yang sangat signifikan terhadap tinggi dan periode gelombang. Untuk perencanaan struktur pantai, metode JONSWAP lebih direkomendasikan, karena tinggi gelombang yang dihasilkan dapat berfungsi sebagai faktor keamanan.

Kata kunci: *Hindcasting, lapangan, tinggi gelombang, periode gelombang*

Pendahuluan

Penjalaran gelombang dari pembangkitannya (*sea*) hingga penjalarannya ke daratan (*swell*) sangat dipengaruhi oleh energi angin yang berhembus diatas permukaan air (Kamphuis, 2000). Makin mendekati daratan tinggi gelombang dan kecepatan jalarnya akan berkurang seiring dengan kedalaman perairan yang semakin dangkal (Reeve *et al.*, 2011). Salah satu cara untuk menganalisis tinggi dan periode gelombang yaitu menggunakan metode *hindcasting*. Metode *hindcasting* adalah metode untuk memperkirakan tinggi gelombang (H_s) dan periode gelombang (T_p) dengan menggunakan data angin masa lampau (Santoso *et al.*, 2018).

Penelitian tentang pemodelan tinggi dan periode gelombang antara lain adalah memanfaatkan pendekatan *multi-product ensemble* untuk meningkatkan akurasi data (Morim, *et al.*, 2022; Bjorkqvist *et al.*, 2020; Santana *et al.*, 2024; Han *et al.*, 2024; Nugroho *et al.*, 2019; Osinski & Radtke, 2020). Metode *machine learning* dan *surrogate model* (Liu *et al.*, 2019; Park *et al.*, 2021; Bujak *et al.*, 2023; Pirhooshyaran & Snyder, 2020; Whistler *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024), serta kalibrasi berbasis *hindcasting* dan model numerik dengan resolusi tinggi (Becerra *et al.*, 2022; Bujan & Cox, 2020; Son & Do, 2021; Kalantari *et al.*, 2022; Raj *et al.*, 2023; Bagnasco *et al.*, 2025; Dodet *et al.*, 2022; Han *et al.*, 2024).

Penelitian-penelitian tersebut pada umumnya masih fokus pada pengembangan metode secara terpisah dan belum mengintegrasikan secara komprehensif hasil pemodelan *hindcasting* dengan pengukuran lapangan untuk meningkatkan akurasi dan estimasi tinggi dan periode gelombang pada lokasi spesifik yang memiliki karakteristik pesisir dinamis. Untuk itu, diperlukan analisis integratif antara model *hindcasting* dan data observasi lapangan guna menghasilkan model prediksi gelombang yang lebih representatif untuk kondisi nyata seperti di Pantai Glagah.

Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan tinggi dan periode gelombang menggunakan tiga metode *hindcasting* yaitu SMB (Sverdrup-Munk-Bretschneider), JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), dan FWD (*Finite Water Depth*), terhadap tinggi dan periode gelombang dari pengukuran di lapangan. Pemilihan ketiga metode *hindcasting* karena telah umum digunakan, juga memiliki perbedaan parameter dalam analisisnya. Metode SMB lebih sederhana, dengan *fetch* terbatas dan tidak memperhitungkan pengaruh kedalaman perairan. Metode JONSWAP panjang *fetch* tidak terbatas, lebih spesifik digunakan di perairan belahan bumi utara, dan tidak memperhitungkan

pengaruh kedalaman perairan. Untuk metode FWD memperhitungkan pengaruh kedalaman perairan serta kurang relevan untuk perairan dalam (Kamphuis, 2000); (Reeve *et al.*, 2011).

Metode Penelitian

Data kecepatan dan arah angin yang digunakan untuk penelitian berasal dari NASA *Prediction of Worldwide Energy Resources* (POWER) *Data Access Viewer* (DAV) v2.4.9 tahun 2013-2024. Data angin dapat diakses dengan memasukkan koordinat lokasi yang digunakan dalam penelitian 7°54'16.0" Lintang Selatan dan 110°3'0.7" Bujur Timur. Selanjutnya data angin tersebut dianalisis dengan WRPLOT.com untuk menggambarkan *windrose*. Data angin yang digunakan yaitu data angin per 3 jam yang meliputi kecepatan dan arah angin dari tahun 2015-2024. Untuk analisis kecepatan angin digunakan Persamaan 1 dan 2.

$$U_W = R_L \cdot U_L \quad (1)$$

$$U_A = 0,71 U_W^{1,23} \quad (2)$$

dengan U_L adalah kecepatan angin di darat, U_W adalah kecepatan angin di laut, R_L adalah hubungan kecepatan angin laut dan angin darat dan U_A adalah kecepatan angin terkoreksi.

Selanjutnya analisis panjang *fetch* efektif (F_{eff}) digunakan Persamaan 3.

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} \quad (3)$$

dengan F_{eff} adalah *fetch* efektif, X_i adalah panjang segmen *fetch* dan α adalah deviasi arah angin (6°). Dari data U_A dan F_{eff} selanjutnya digunakan untuk analisis tinggi dan periode gelombang menggunakan tiga persamaan empiris *hindcasting* berikut:

Tinggi dan periode gelombang metode SMB dianalisis menggunakan Persamaan 4 dan 5. (Reeve *et al.*, 2011).

$$H_s = 0,283 \tanh(0,0125 F_{eff}^{0,42}) \quad (4)$$

$$T_p = 7,54 \tanh(0,077 F_{eff}^{0,25}) \quad (5)$$

JONSWAP memberikan dua persamaan untuk menghitung tinggi dan periode gelombang signifikan. Pertama, jika panjang *fetch* berpengaruh maka digunakan Persamaan (6) dan (7), dan kedua, jika panjang *fetch* tidak berpengaruh maka digunakan Persamaan (8) dan (9). Dari hasil perhitungan tinggi dan periode gelombang dapat di analisis hubungan bilangan non dimensi antara tinggi gelombang, periode gelombang, panjang *fetch*, dan panjang *fetch* efektif menggunakan Persamaan (10), (11), dan (12) (Kamphuis, 2000) (Reeve *et al.*, 2011). Analisis tinggi dan periode gelombang dengan metode FWD menggunakan Persamaan 15 dan 16 (Kamphuis, 2000)

$$H_s = \frac{U_A^2 \times 0,0016 \left(\frac{g F_{eff}}{U_A^2} \right)^{1/2}}{g} \quad (6)$$

$$T_p = \frac{U_A \times 0,286 \left(\frac{g F_{eff}}{U_A^2} \right)^{1/3}}{g} \quad (7)$$

$$H_s = \frac{0,243 U_A^2}{g} \quad (8)$$

$$T_p = \frac{8,13 U_A}{g} \quad (9)$$

$$H_s^* = H_s \frac{g}{U_A^2} \quad (10)$$

$$T_p^* = T_s \frac{g}{U_A} \quad (11)$$

$$F^* = F_{eff} \frac{g}{U_A^2} \quad (12)$$

$$t^* = 71.500 \quad (13)$$

$$F_{eff}^* = \left(\frac{t^*}{68,8} \right)^{3/2} \quad (14)$$

$$H_s = 0,24 \left\{ \frac{\tanh[0,49 d^{0,75}] \cdot 0,0031 F_{eff}^{0,57}}{\tanh[0,49 d^{0,75}]} \right\}^{0,87} \quad (15)$$

$$T_p = 7,54 \left\{ \frac{\tanh[0,33 d] \cdot 0,00052 F_{eff}^{0,73}}{\tanh[0,33 d]} \right\}^{0,37} \quad (16)$$

dengan H_s adalah tinggi gelombang signifikan, T_p adalah periode puncak gelombang, H_s^* adalah bilangan non dimensi tinggi gelombang, T_p^* adalah bilangan non dimensi periode gelombang, F^* adalah bilangan non dimensi $fetch$ efektif, F_{eff} adalah panjang $fetch$ efektif, g adalah percepatan gravitasi, dan d adalah kedalaman perairan

Hasil analisis H_s dan T_p menggunakan tiga metode *hindcasting* selanjutnya dibandingkan dengan pengukuran H_s dan T_p di lapangan. Pengukuran di lapangan dilaksanakan secara manual dengan pengamatan bak ukur yang dipasang 6 – 7 m tegak lurus pantai Glagah, Kulonprogo dari tanggal 18 Maret 2024 – 30 Maret 2024 pada koordinat 7°54'16.0" Lintang Selatan dan 110°3'0.7" Bujur Timur yang ditunjukkan dalam Gambar 1.

Hasil dan Pembahasan

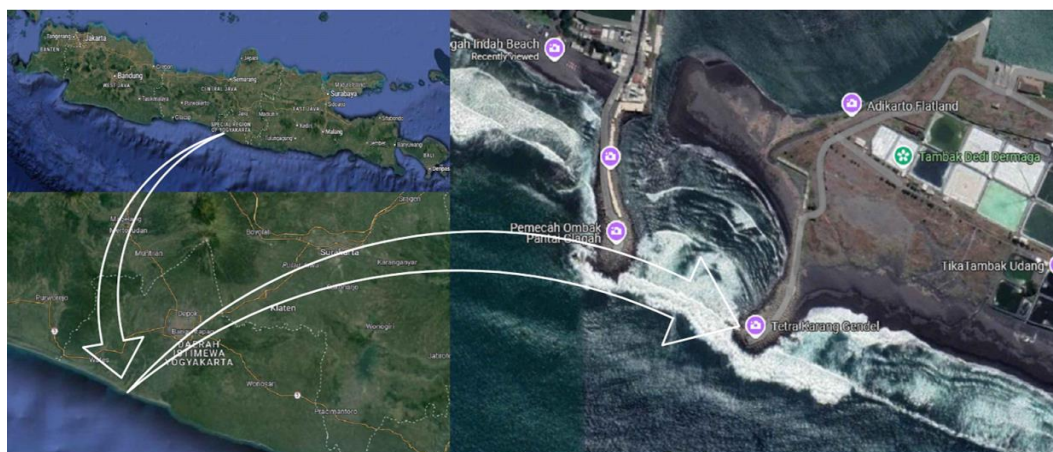
Windrose hasil WRPLOT.com diberikan dalam empat musim (Gambar 2). Saat musim Barat, arah angin dominan berasal dari Barat tetapi saat musim Peralihan 1, musim Timur, dan musim Peralihan 2 arah angin dominan berasal dari Tenggara. Kondisi ini terjadi karena kombinasi faktor global (monsun, angin pasat), regional (tekanan udara di Australia dan Samudra Hindia), dan lokal (geografi pantai selatan) (Tjasyono, 2012).

Analisis gelombang Metode SMB

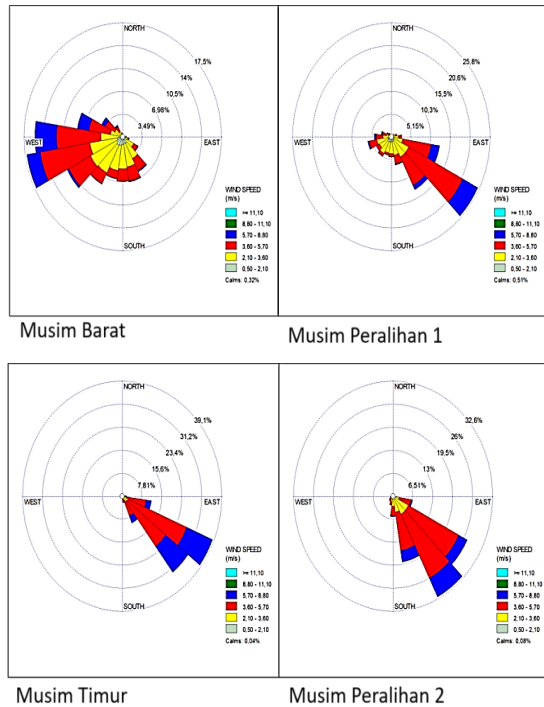
Hasil analisis tinggi dan periode gelombang metode SMB digunakan persamaan (4) dan (5). Bilangan non dimensi untuk $fetch$, tinggi dan periode gelombang digunakan Persamaan (10), (11), dan (12). Rekapitulasi hasil analisis tinggi dan periode gelombang, serta hubungan bilangan non dimensi dengan metode SMB disajikan dalam Tabel 1 dan Gambar 3.

Analisis gelombang Metode JONSWAP

Langkah pertama pada metode JONSWAP adalah menghitung nilai F^* . Apabila $F^* < F_{eff}^*$, maka gelombang berdasarkan panjang $fetch$ dan digunakan Persamaan (6) dan (7). Jika $F^* > F_{eff}^*$, maka gelombang berdasarkan durasinya. Analisis selanjutnya digunakan nilai terkecil dari F^* dan F_{eff}^* . Cek nilai $fetch$ berikut ini.



Gambar 1. Lokasi penelitian



Tabel 2. Rekapitulasi tinggi dan periode gelombang metode JONSWAP

Musim	JONSWAP (<i>Joint North Sea Wave Project</i>)						
	U_A m/detik	F_{eff} m	H_s m	T_p detik	F^*	H_s^*	T_p^*
Barat	7,0	500,0	2,5	9,5	325,8	0,9	19,7
	8,2	500,0	2,6	9,5	178,5	0,7	16,1
	8,1	500,0	2,4	9,3	257,8	0,8	18,2
Peralihan 1	7,4	500,0	2,7	9,6	359,0	1,0	20,3
	6,8	500,0	2,1	9,0	311,7	0,9	19,4
	8,5	294,3	2,3	8,5	127,3	0,6	14,4
Timur	8,8	294,3	2,4	8,5	105,0	0,5	13,5
	9,1	294,3	2,5	8,6	57,1	0,4	11,0
	8,9	294,3	2,5	8,6	50,1	0,4	10,5
Peralihan 2	8,4	294,3	2,3	8,4	59,9	0,4	11,2
	8,3	500,0	2,5	9,4	103,6	0,5	13,4
	7,0	500,0	2,1	8,9	265,8	0,8	18,4

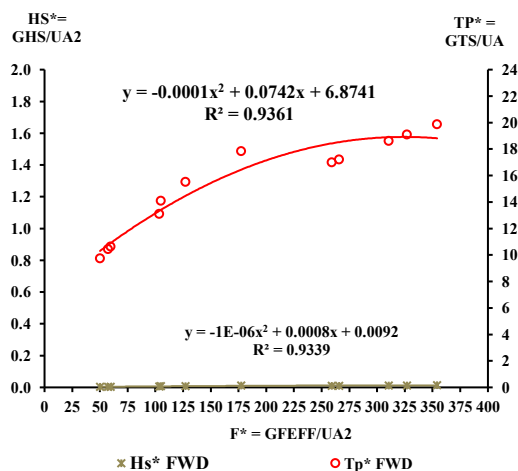
Analisis gelombang Metode FWD

Tinggi dan periode gelombang dengan Metode FWD dihitung menggunakan Persamaan (15) dan (16) dengan kedalaman perairan 17 m (Rafandi *et al.*, 2013). Tinggi dan periode gelombang adalah sebagai berikut.

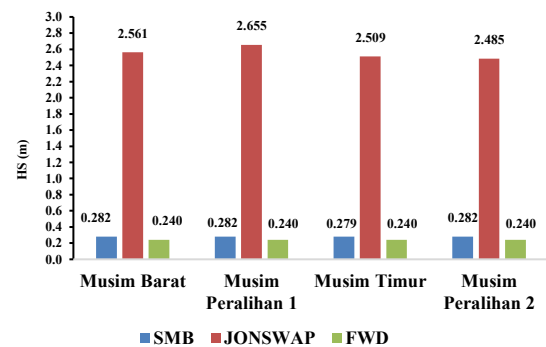
$$H_s = 0,24 \left\{ \frac{\tanh[0,49 \cdot 15,6^{0,75}] \cdot 0,87}{\tanh \left[\frac{0,0031 \cdot 500^{0,57}}{\tanh[0,49 \cdot 15,6^{0,75}]} \right]} \right\} = 0,034 \text{ m}$$

$$T_p = 7,54 \left\{ \frac{\tanh[0,33 \cdot 15,6] \cdot 0,37}{\tanh \left[\frac{0,00052 \cdot 500^{0,73}}{\tanh[0,33 \cdot 15,6]} \right]} \right\} = 2,461 \text{ m}$$

Rekapitulasi hasil analisis tinggi dan periode gelombang, serta hubungan bilangan non dimensi disajikan dalam Tabel 3 dan Gambar 5. Rekapitulasi tinggi dan periode gelombang maksimum ke empat musim menggunakan metode *hindcasting* dan hasil pengukuran lapangan dapat dilihat dalam Tabel 4, Gambar 6 dan 7.

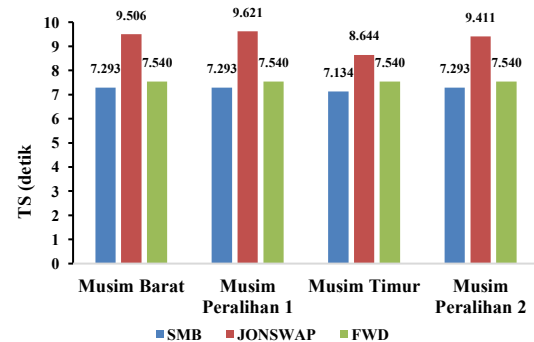


Gambar 5. Hubungan bilangan non dimensi fetch, H_s dan T_p metode FWD



Gambar 6. Rekapitulasi tinggi gelombang maksimum tiap musim

Hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi dan periode gelombang metode JONSWAP berbeda dengan metode SMB dan FWD untuk tiap musim, perbedaan ini cukup signifikan, dan hasil analisis ini sejalan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Poulos *et al.*, (2025) dan Etemad-Shahidi *et al.*, (2009) yang membandingkan tinggi dan periode gelombang menggunakan metode SMB dan JONSWAP. Perbedaan hasil analisis ini karena dalam metode JONSWAP parameter kecepatan angin (U_A) diperhitungkan, sedangkan metode SMB dan FWD tidak.



Gambar 7. Rekapitulasi periode gelombang maksimum tiap musim

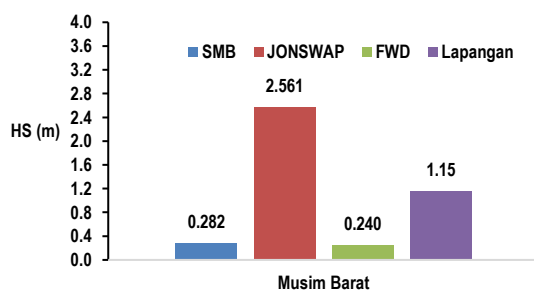
Tabel 3. Rekapitulasi tinggi dan periode gelombang metode FWD

Musim	FWD (<i>Finite Water Depth</i>)							
	U_A m/detik	F_{eff} m	d m	H_s m	T_P detik	F^*	H_s^*	T_P^*
Barat	7,0	500,0	17,0	0,24	7,54	327,09	0,157	19,10
	8,2	500,0	17,0	0,24	7,54	177,42	0,137	17,84
	8,1	500,0	17,0	0,24	7,54	259,18	0,124	17,00
Peralihan 1	7,3	500,0	17,0	0,24	7,54	354,14	0,170	19,88
	6,8	500,0	17,0	0,24	7,54	310,77	0,149	18,62
	8,5	294,3	17,0	0,24	7,54	127,26	0,104	15,53
Timur	8,7	294,3	17,0	0,24	7,54	104,98	0,086	14,10
	9,0	294,3	17,0	0,24	7,54	57,46	0,047	10,43
	8,9	294,3	17,0	0,24	7,54	50,09	0,041	9,74
Peralihan 2	8,4	294,3	17,0	0,24	7,54	59,72	0,049	10,64
	8,3	500,0	17,0	0,24	7,54	103,63	0,074	13,11
	7,0	500,0	17,0	0,24	7,54	265,83	0,128	17,22

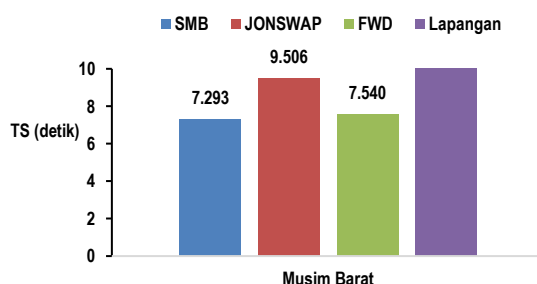
Tabel 4. Rekapitulasi tinggi dan periode gelombang tiap musim

Musim	H_s (m)				T_p (detik)			
	SMB	JONSWAP	FWD	Lapangan	SMB	JONSWAP	FWD	Lapangan
Barat	0,282	2,561	0,240		7,293	9,506	7,540	
Peralihan 1	0,282	2,655	0,240	1,15	7,293	9,621	7,540	10,53
Timur	0,279	2,509	0,240		7,134	8,644	7,540	
Peralihan 2	0,282	2,485	0,240		7,293	9,411	7,540	

Tinggi dan periode gelombang metode SMB dan FWD memberikan hasil yang hampir sama. Pengukuran tinggi dan periode gelombang di lokasi penelitian dilakukan juga secara manual menggunakan bak ukur untuk membandingkan hasilnya dengan metode *hindcasting* yang ada. Hasil pengukuran ditunjukkan dalam Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Perbandingan tinggi gelombang hasil pengukuran lapangan



Gambar 9. Perbandingan periode gelombang hasil pengukuran lapangan

Regresi data tinggi dan periode gelombang metode JONSWAP lebih stabil (Gambar 4) dibandingkan dengan metode SMB dan FWD. Hal ini terjadi karena metode JONSWAP dapat digunakan untuk *fetch* yang tidak terbatas (panjang). Sedangkan metode SMB dan FWD lebih cocok untuk panjang *fetch* terbatas (Reeve *et al.*, 2011; Hasselmann *et al.*, 1973; Kamphuis, 2000). Untuk lokasi penelitian di pantai Glagah yang terbuka langsung dengan samudera Hindia, lebih tepat bila digunakan metode JONSWAP untuk perhitungan tinggi dan periode gelombangnya.

Kesimpulan

Dari hasil analisis integratif metode *hindcasting* menunjukkan bahwa tinggi dan periode gelombang metode JONSWAP lebih besar dibandingkan dengan metode SMB dan FWD. Metode SMB dan FWD memberikan nilai tinggi dan periode gelombang yang hampir sama. Perbedaan ketiga metode *hindcasting* karena parameter yang digunakan berbeda. Metode SMB hanya menggunakan parameter panjang *fetch* efektif (F_{eff}), metode FWD menggunakan parameter *fetch* efektif (F_{eff}) dan kedalaman perairan (d), sedangkan metode JONSWAP menggunakan parameter *fetch* efektif (F_{eff}) dan kecepatan angin (U_A). Parameter kecepatan angin (U_A) dalam metode JONSWAP memberikan pengaruh yang sangat signifikan. Untuk perencanaan struktur pantai di selatan perairan Indonesia yang berhadapan langsung dengan Samudera Hindia, metode JONSWAP lebih

direkomendasikan, dengan nilai tinggi gelombang yang cukup besar yang dapat berfungsi sebagai faktor keamanan.

Daftar Pustaka

- Abbasi, M. R. (2019). Evaluating semi-empirical wave forecasting method CEM in the Strait of Hormuz. *International Journal of Coastal and Offshore Engineering*, 3(3), 43–46. <https://doi.org/10.29252/ijcoe.3.3.43>
- Adytia, D., Saepudin, D., Tarwidi, D., Pudjaprasetya, S. R., Husrin, S., Sopaheluwakan, A., & Prasetya, G. (2023). Modelling of Deep Learning-Based Downscaling for Wave Forecasting in Coastal Area. *Water*, 15(1), 1–19. <https://doi.org/10.3390/w15010204>
- Bagnasco, T., Stocchino, A., Vousedoukas, M. I., & Wang, J. (2025). A two-way coupled wave–current high resolution hindcast for the South China Sea. *Applied Ocean Research*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2025.104672>
- Becerra, D., Quezada, M., Díaz, H. (2022). A deep water and nearshore wave height calibration of the ECOWAVESHindcasting database. *Latin American Journal of Aquatic Research*, 50(4), 573–595. <https://doi.org/10.3856/vol50-issue4-fulltext-2811>
- Bjorkqvist, J. V., Rikka, S., Alari, V., Männik, A., Tuomi, L., & Pettersson, H. (2020). Wave height return periods from combined measurement-model data: A Baltic Sea case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(12), 3593–3609. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-3593-2020>
- Bujak, D., Carević, D., Bogovac, T., & Kulić, T. (2023). Hindcast of Significant Wave Heights in Sheltered Basins Using Machine Learning and the Copernicus Database. *Nase More*, 70(2), 103–114. <https://doi.org/10.17818/NM/2023/2.5>
- Bujan, N., & Cox, R. (2020). Maximal Heights of Nearshore Storm Waves and Resultant Onshore Flow Velocities. *Frontiers in Marine Science*, 7(June). <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00309>
- Cerezo-Andreo, F., López-Castejón, F. J., Ramallo-Asensio, S. F., & Gilabert-Cervera, J. (2020). Wave Hindcasting and Anchoring Activities in Ancient Harbours: The Impact of Coastal Dynamics on Ancient Carthago Nova (Cartagena, Spain). *Journal of Maritime Archaeology*, 15(2), 209–237. <https://doi.org/10.1007/s11457-020-09259-9>
- Chen, C., Lin, H., Guan, D., Cai, F., Wang, Q., & Liu, Q. (2024). Enhancing typhoon wave hindcasting with random forests and BP neural networks in the SWAN model. *Frontiers in Marine Science*, 11(September), 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1472047>
- Chun, H., & Suh, K. D. (2019). Empirical formulas for estimating maximum wave height and period in numerical wave hindcasting model. *Ocean Engineering*, 193(October), 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106608>
- Dodet, G., Abdalla, S., Alday, M., Accensi, M., Bidlot, J., & Ardhuin, F. (2022). Error Characterization of Significant Wave Heights in Multidecadal Satellite Altimeter Product, Model Hindcast, and In Situ Measurements Using the Triple Collocation Technique. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(7), 887–901. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-21-0179.1>
- Etemad-Shahidi, S. A., Kazeminezhad, M. H., & Mousavi, S. J. (2009). On The Prediction of Wave Parameters Using Simplified Methods. *Journal of Coastal Research*, 505–509.
- Fujimoto, W., Ishibashi, K., & Zhu, T. (2024). Analyzing AIS and wave hindcast data for global wave scatter diagrams with seasonality. *Ocean Engineering*, 314(P1), 119647. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.119647>
- Fujimoto, W., Miratsu, R., Ishibashi, K., & Zhu, T. (2022). Estimation and Use of Wave Information for Ship Monitoring. *ClassNK Technical Journal*, 6(1), 79–92.
- Han, W., Lee, K., & Lee, S. (2024). Wave Analysis Method for Offshore Wind Power Design Suitable for Ulsan Area. *New & Renewable Energy*, 20(2), 2–16. <https://doi.org/10.7849/ksnre.2024.0011>
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D. E., Enke, K., Ewing, J. ., Gienapp, H., Hasselmann, D. E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D. J., Richter, K., Sell, W., & H. W. (1973). *Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Ddecay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)* (Issue July 2015). Deutsches Hydrographisches Institut.
- Kalantari, H., Lari, K., Arasteh, A. M., & Azad, M. T. (2022). Wave Hindcasting in the Southeastern Coast of Iran. *Marine Technology Society Journal*, 56(1), 83–97. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.56.1.4>
- Kamphuis, J. W. (2000). *Introduction To Coastal Engineering And Management*.
- Liu, T., Zhang, Y., Qi, L., Dong, J., Lv, M., & Wen, Q. (2019). WaveNet: Learning to predict wave

- height and period from accelerometer data using convolutional neural network. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 369(1), 1–9. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/369/1/012001>
- Morim, J., Erikson, L. H., Hemer, M., Young, I., Wang, X., Mori, N., Shimura, T., Stopa, J., Trenham, C., Mentaschi, L., Gulev, S., Sharmar, V. D., Brichenno, L., Wolf, J., Aarnes, O., Perez, J., Bidlot, J., Semedo, A., Reguero, B., & Wahl, T. (2022). A global ensemble of ocean wave climate statistics from contemporary wave reanalysis and hindcasts. *Scientific Data*, 9(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01459-3>
- Nugroho, O. E., Moniaga, B., Suciatty, F., Chrysanti, A., Harlan, D., & Syahrial Badri Kusuma, M. (2019). Comparative Study on Wave Hindcasting Using Wind Downscaling Data at Bojong Salawe Beach. *MATEC Web of Conferences*, 270(February), 04024. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201927004024>
- Osinski, R. D., & Radtke, H. (2020). Ensemble hindcasting of wind and wave conditions with WRF and WAVEWATCH III® driven by ERA5. *Ocean Science*, 16(2), 355–371. <https://doi.org/10.5194/os-16-355-2020>
- Park, S. B., Shin, S. Y., Jung, K. H., & Lee, B. G. (2021). Prediction of Significant Wave Height in Korea Strait Using Machine Learning. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(5), 336–346. <https://doi.org/10.26748/ksoe.2021.021>
- Pirhooshyaran, M., & Snyder, L. V. (2020). Forecasting, hindcasting and feature selection of ocean waves via recurrent and sequence-to-sequence networks. *Ocean Engineering*, 207, 1–42. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107424>
- Poulos, S. E., Lesioti, S., & Karditsa, A. (2025). Insights to Estimate the Largest 1/3, 1/10, and 1/100 of Offshore Wave Heights and Periods Under Fetch-Limited Conditions in the Central Aegean Sea. *Water (Switzerland)*, 17(10). <https://doi.org/10.3390/w17101499>
- Rafandi, T., Widada, S., & Atmodjo, W. (2013). Analisis Refraksi dan Efek Pendangkalan (Shoaling) Gelombang terhadap penambahan Panjang Pemecah Gelombang pada Mulut Pelabuhan Tanjung Adikarta Glagah Yogyakarta. *Journal of Oceanography*, 2(2), 189–197.
- Raj, A., Kumar, B. P., Remya, P. G., Sreejith, M., & Nair, T. M. B. (2023). Assessment of the forecasting potential of WAVEWATCH III model under different Indian Ocean wave conditions. *Journal of Earth System Science*, 132(1). <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02045-w>
- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2011). *Coastal Engineering Processes, Theory And Design Practice*.
- Santana, R., Gorman, R., Lane, E., Moore, S., Bosserelle, C., Reeve, G., & Rautenbach, C. (2024). Wave forecast investigations on downscaling, source terms, and tides for Aotearoa New Zealand. *Geoscientific Model Development*, 18(15), 4877–4898. <https://doi.org/10.5194/gmd-18-4877-2025>
- Santoso, K., Putra, I. D. N. N., & Dharma, I. G. B. S. (2018). Studi Hindcasting Dalam Menentukan Karakteristik Gelombang dan Klasifikasi Zona Surf Di Pantai Uluwatu, Bali. *Journal of Marine and Aquatic Sciences*, 5(1), 119. <https://doi.org/10.24843/jmas.2019.v05.i01.p15>
- Smith, G. A., Hemer, M., Greenslade, D., Trenham, C., Zieger, S., & Durrant, T. (2021). Global Wave Hindcast with Australian and Pacific Island Focus: From Past to Present. *Geoscience Data Journal*, 8(1), 24–33. <https://doi.org/10.1002/gdj3.104>
- Son, B., & Do, K. (2021). Optimization of SWAN Wave Model to Improve the Accuracy of Winter Storm Wave Prediction in the East Sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 35(4), 273–286. <https://doi.org/10.26748/ksoe.2021.019>
- Tjasyono, B. (2012). *Meteorologi Indonesia Volume I, Karakteristik dan Sirkulasi Atmosfer. In Meteorologi Indonesia Volume I: Vol. I.*
- Viitak, M., Avilez-Valente, P., Bio, A., Bastos, L., & Iglesias, I. (2021). Evaluating wind datasets for wave hindcasting in the NW Iberian Peninsula coast. *Journal of Operational Oceanography*, 14(2), 152–165. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2020.1738121>
- Whistler, S., Ashton, I. G. C., Pillai, A. C., & Quartly, G. D. (2024). Enhancing Offshore Wind Farm Met-Ocean Data Accessibility: a Machine Learning Approach With Satellite-Derived Wave Measurements in the Celtic Sea. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 7, 1–7. <https://doi.org/10.1115/OMAE2024-127479>
- Wurjanto, A., Mukhti, J. A., & Wirasti, H. Della. (2021). Extreme significant wave height map of Indonesia based on SEAFINE and ERA5 database. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 53(1), 1–13. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2021.53.1.10>