

Pemodelan Spektrum Gelombang di Pantai Barat hingga Selatan Indonesia

David S. V. I Bangguna*, Aisyah Christine Zalukhu, Debora Laia,
Jhonson Andar Harianja

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Kristen Immanuel
Jl. Solo KM. 11, Kadirojo I, Purwomartani, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55571 Indonesia
Email: bangguna@gmail.com

Abstract

Modeling of Wave Spectrum on the Western to Southern Coasts of Indonesia

Wave spectrum modeling can describe the distribution of wave energy based on frequency and direction over a specific time period in the observed water area. Understanding the energy distribution from the wave spectrum is highly beneficial for designing structures that are stronger, more stable, and resistant to extreme ocean conditions. The aim of this research is to model the wave spectrum characteristics of the waters from the western to southern regions of Indonesia. The western coast of Sumatra Island to the southern coast of Papua Island was selected as the study area because these coastal regions are more exposed to wave propagation from the Indian Ocean, making them more vulnerable to wave impacts. The specific locations include Meulaboh Beach (West Aceh), Sorake (South Nias), Lais (North Bengkulu), Bunton (Cilacap), Jerman Beach (Bali), Walakiri (East Sumba), and Wendu (Merauke). The wave height analysis at the seven locations along the western to southern coasts of Indonesia shows that Walakiri Beach experiences higher wave heights compared to other locations, with wave heights of 4.8 m (West monsoon), 4.9 m (Transitional Season I), 5.7 m (East monsoon), and 4.3 m. During the Transitional Season II, the highest wave energy also occurs at Walakiri Beach. The wave energy values for the four consecutive seasons are: West monsoon (34.461 m²/Hz), Transitional Season I (35.911 m²/Hz), East monsoon (46.180 m²/Hz), and Transitional Season II (23.987 m²/Hz). The wave energy values are directly proportional to the wave heights—the higher the wave, the greater the energy it carries. This occurs because ocean waves are the result of accumulated wind energy that blows across the sea surface.

Keywords: western and southern coasts, wave spectrum, Indonesia

Abstrak

Pemodelan spektrum gelombang dapat menggambarkan distribusi energi gelombang berdasarkan frekuensi dan arah dalam jangka waktu tertentu pada daerah perairan yang diamati. Pemahaman penyebaran energi dari spektrum gelombang akan sangat membantu perancangan struktur yang lebih kuat, stabil, dan tahan terhadap kondisi laut ekstrem. Tujuan penelitian yaitu untuk memodelkan karakteristik spektrum gelombang dari perairan Barat hingga Selatan Indonesia. Pantai Barat pulau Sumatera hingga pantai Selatan pulau Papua dipilih untuk lokasi penelitian ini karena lokasi pantai ini lebih terbuka terhadap penjalaran gelombang dari Samudra Hindia, sehingga pantai lebih rentan terhadap gempuran gelombang. Lokasi tersebut yaitu pantai Meulaboh (Aceh Barat), Sorake (Nias Selatan), Lais (Bengkulu Utara), Bunton (Cilacap), Jerman (Bali), Walakiri (Sumba Timur), dan Wendu (Merauke). Hasil analisis tinggi gelombang pada tujuh lokasi di pantai Barat hingga Selatan Indonesia, menunjukkan bahwa tinggi gelombang di pantai Walakiri lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi pantai yang lainnya yaitu 4,8 m (musim Barat), 4,9 m (musim Peralihan I), 5,7 m (musim Timur) dan 4,3 m. Saat musim Peralihan 2, energi gelombang terbesar terjadi juga di pantai Walakiri. Untuk empat musim berturut-turut dari musim Barat (34,461 m²/hz), musim Peralihan 1 (35,911 m²/Hz), musim Timur

(46,180 m²/Hz), musim Peralihan 2 (23,987 m²/Hz). Nilai energi gelombang yang terjadi berbanding lurus dengan tinggi gelombangnya, semakin tinggi gelombang maka energi gelombangnya juga semakin besar, hal ini terjadi karena gelombang di laut merupakan hasil dari akumulasi energi angin yang berhembus di atas permukaan air laut.

Kata kunci : pantai barat dan selatan, spektrum gelombang, Indonesia

PENDAHULUAN

Pemodelan spektrum gelombang laut dapat memberikan pemahaman karakteristik gelombang laut, dibandingkan dengan pengukuran gelombang yang dilakukan secara langsung yang hanya memberikan informasi tinggi dan periode gelombang saja, dan dapat menggambarkan distribusi energi gelombang berdasarkan frekuensi dan arah dalam jangka waktu tertentu pada daerah perairan yang diamati. Hasil pemodelan ini sangat penting untuk data perancangan struktur pantai dan lepas pantai seperti dermaga, pemecah gelombang, platform minyak dan gas lepas pantai. Pemahaman penyebaran energi dari spektrum gelombang akan sangat membantu perancangan struktur yang lebih kuat, stabil, dan tahan terhadap kondisi laut ekstrem. Wilayah perairan di Selatan Indonesia memiliki karakteristik yang berbeda dengan bagian Utara. Perairan Selatan Indonesia yang langsung berhadapan dengan Samudera Hindia gelombangnya lebih besar dan kuat terlebih saat musim Timur. Sedangkan perairan Utara Indonesia gelombangnya lebih kecil karena terlindung dengan adanya daratan di bagian Utara (Asia), dan cocok untuk pelayaran dan budidaya perikanan. Melihat kondisi tersebut akan dilakukan pemodelan spektrum gelombang di perairan Selatan Indonesia untuk memberikan gambaran karakteristik gelombang yang dapat digunakan untuk perancangan struktur pantai nantinya.

Penelitian spektrum gelombang yang telah dilakukan antara lain yaitu pemodelan spektrum gelombang berdasarkan gerakan kapal (Ferlita *et al.*, 2023; Nielsen, 2018; Nielsen & Dietz, 2020; Han *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2021), pemodelan spektrum gelombang untuk menganalisis jenis utama gelombang (yaitu gelombang angin, swell, atau laut campuran) dan proporsinya selama periode muson timur laut dan non-muson timur laut di perairan Utara Taiwan (Chao *et al.*, 2023), analisis spektrum gelombang tunggal (single-peaked) dan ganda (double-peaked) di Teluk Chancay, Peru, dan di lepas pantai Hambantota, Sri Lanka (Gao *et al.*, 2022), pemodelan spektrum gelombang dengan pendekatan statistik dan probabilitas (Portilla-Yandún, 2018; Panalaran & Suntoyo, 2023; Portilla-Yandun & Guachamin-Acero, 2023) analisis ketidakpastian dalam memperkirakan spektrum gelombang (Clarindo *et al.*, 2024; Nielsen *et al.*, 2024; Silva, 2015) pengukuran spektrum gelombang menggunakan data Envisat/ASAR dengan simulasi hindcasting (Li *et al.*, 2021), pemodelan spektrum gelombang menggunakan parameter spektrum JONSWAP (Lee *et al.*, 2022; Mazzaretto *et al.*, 2022; Sun *et al.*, 2023; Dhanistha *et al.*, 2024), analisis persamaan antara periode gelombang signifikan dengan parameter spektral gelombang (Chun & Suh, 2018), pemodelan spektrum gelombang dengan membandingkan model spektrum gelombang sebelumnya (Ryabkova *et al.*, 2019; Romero & Lubana, 2022). Penelitian bertujuan untuk memodelkan karakteristik spektrum gelombang dari pantai Barat hingga Selatan Indonesia.

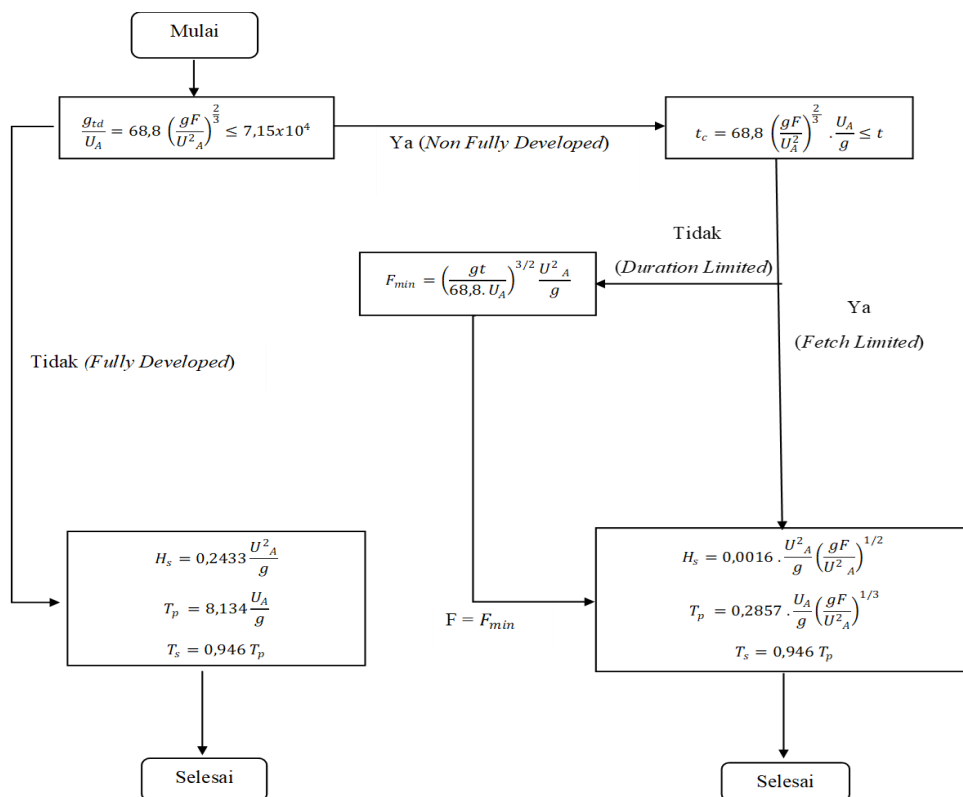
MATERI DAN METODE

Penelitian ini dilakukan di tujuh (7) pantai yang terletak di Barat hingga Selatan Indonesia seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Pemilihan lokasi didasarkan pada informasi kerusakan pantai, ketersediaan data penelitian dan kondisi geografis perairan serta lokasi pantai yang lebih terbuka terhadap penjalaran gelombang dari Samudra Hindia, sehingga pantai lebih rentan terhadap gempuran gelombang tinggi. Ketujuh pantai tersebut yaitu: 1) pantai Meulaboh yang berlokasi di Desa Suak Ribee, Kecamatan Johan Pahlawan, Kabupaten Aceh Barat, Aceh dengan koordinat: 4° 8'30,26 " N LU dan 96° 7'15,42" E BT, 2) pantai Sorake (Nias) yang berlokasi di Desa Botohilitano,

Kecamatan Teluk Dalam, Kabupaten Nias Selatan, Sumatera Utara dengan koordinat: $0^{\circ} 34' 5,01''$ N LU dan $97^{\circ} 43' 48,12''$ E BT, 3) pantai Lais yang berlokasi di Desa Lais, Kecamatan Lais, Kabupaten Bengkulu Utara, Bengkulu dengan koordinat: $3^{\circ} 32' 28,43''$ S LS dan $102^{\circ} 3' 9,56''$ E BT, 4) pantai Buntan yang berlokasi di Desa Buton, Kecamatan Adipala, Kabupaten Cilacap, Jawa Tengah dengan koordinat: $7^{\circ} 41' 21,92''$ S LS dan $109^{\circ} 8' 44,91''$ E BT. 5) pantai Jerman yang berlokasi di Desa Wana Segara, Kecamatan Tuban, Kabupaten Kuta, Bali dengan koordinat: $8^{\circ} 44' 8,10''$ S LS dan $115^{\circ} 9' 44,87''$ E BT, 6) pantai Walakiri yang berlokasi di Desa Watumbaka, Kecamatan Pandawai, Kabupaten Sumba Timur, NTT dengan koordinat: $9^{\circ} 37' 43,25''$ S LS dan $120^{\circ} 25' 38,81''$ E BT, dan 7) pantai Wendu yang berlokasi di Desa Waninggap Naggo, Kecamatan Semangga, Kabupaten Merauke, Papua dengan koordinat: $8^{\circ} 26' 31,42''$ S LS dan $140^{\circ} 17' 45,79''$ E BT.



Gambar 1. Lokasi Penelitian



Gambar 2. Prosedur Tinggi dan Periode Gelombang JONSWAP

Analisis spektrum gelombang dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu: 1) data yang

digunakan diunduh dari *Ogimet. com.* dengan memasukkan kode *World Meteorological Organization (WMO)* sesuai dengan lokasi penelitian. Data angin harian yang digunakan yaitu setiap interval 3 jam selama 10 tahun (2014-2023) yang meliputi kecepatan dan arah angin, 2) analisa mawar angin untuk mendapatkan arah dan kecepatan angin dominan setiap musim, 3) analisis panjang *fetch* digunakan persamaan:

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha}$$

dengan F_{eff} adalah *fetch* efektif, X_i adalah panjang segmen *fetch*, dan α adalah deviasi arah angin dengan pertambahan sudut 60° , dan 4) analisis tinggi dan periode gelombang signifikan menggunakan metode *Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)* dengan prosedur ditunjukkan dalam Gambar 2 (Kamphuis, 2000; Reeve *et al.*, 2011).

Selanjutnya spektrum gelombang dimodelkan menggunakan program *Surface-water Modeling System (SMS)* dengan modul *ST-Wave*. Metode spektrum yang digunakan adalah metode *JONSWAP*, pemilihan metode ini karena spektrum ini yang paling umum digunakan dan memiliki puncak yang lebih tajam pada frekuensi tinggi dibandingkan spektrum lainnya (Nurhayati, 2018). Persamaan pemodelan spektrum gelombang menggunakan metode *JONSWAP* sebagai berikut (Reeve dkk., 2018), (Holthuijsen, 2015), (Hasselmann *et al.*, 1973; Kamphuis, 2000; Mazzaretto *et al.*, 2022).

$$S(f) = \frac{\alpha g^2}{(2\pi)^2 f^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{f_p}{f} \right)^4 \right] \gamma^q$$

$$\alpha = 0,076 \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{-0,22}$$

$$f_p = \frac{3,5 g}{U_{10}} \left(\frac{gF}{U_{10}^2} \right)^{-0,33}$$

$$q = \exp \left[-\frac{(f - f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & f \leq f_p \\ 0,09 & f > f_p \end{cases}$$

dengan F adalah panjang *fetch* (km), f adalah frekwensi gelombang (Hz), f_p adalah frekuensi gelombang maksimum (Hz), γ adalah parameter peningkatan puncak (3,3), dan $S(f)$ adalah kepadatan spektrum *JONSWAP* (m^2/Hz)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis arah angin dominan bertujuan untuk mengetahui arah angin yang paling berpengaruh dalam pembangkitan gelombang. Arah dominan ini sering dimanfaatkan dalam perencanaan bangunan pelindung pantai seperti penentuan letak lokasi pemecah gelombang. Analisis ini dilakukan dalam dua tahap yaitu analisis mawar angin dan analisis panjang *fetch* (Mazzaretto *et al.*, 2022; Banggana *et al.*, 2025; Shin *et al.*, 2021). Analisis mawar angin digunakan untuk mempermudah dalam mengetahui arah angin dominan setiap musim, sedangkan analisis panjang *fetch* berfungsi sebagai penentu daerah gelombang dibentuk dan menggambarkan jarak yang dilalui angin untuk menciptakan gelombang di atas permukaan laut. Dari hasil kedua analisis tersebut, diambil arah angin dengan persentase distribusi kecepatan angin terbesar dengan panjang *fetch* > 0 km. Rekapitulasi hasil analisis arah angin dominan dan panjang *fetch* efektif untuk ke tujuh lokasi di wilayah pantai Barat hingga Selatan Indonesia dapat dilihat pada Tabel 1. Arah angin dominan tidak hanya ditentukan oleh angin musim. Pada saat musim Barat arah angin dominan tidak semua berasal dari Barat untuk semua lokasi pantai, hal yang sama juga

terjadi untuk musim Timur. Kondisi ini terjadi karena interaksi yang kompleks antara pola angin global (angin Muson), geografi lokal, pengaruh dinamika laut dan atmosfer di wilayah tersebut (Charbonneau & Dohner, 2021). Dengan menggunakan data Tabel 1 selanjutnya dilakukan analisis tinggi dan periode gelombang untuk memprediksi karakteristik gelombang di tujuh lokasi pantai berdasarkan data angin, arah angin dominan dan panjang *fetch* yang telah dianalisis sebelumnya. Analisis ini bertujuan untuk memperoleh karakteristik gelombang yaitu tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang yang digunakan sebagai input data analisis spektrum gelombang (Young, 2017). Tabel 2 berikut ini rekapitulasi hasil peramalan gelombang menggunakan metode JONSWAP pada tujuh lokasi penelitian untuk tiap musim.

Tabel 2 menunjukkan tinggi gelombang terbesar terjadi di pantai Walakiri yaitu 4,8 m (musim Barat), 4,9 m (musim Peralihan I), 5,7 m (musim Timur) dan 4,3 m untuk musim Peralihan 2. Dengan menggunakan data dari Tabel 2 di atas dilakukan analisis spektrum gelombang pada tujuh lokasi pantai di pantai Barat hingga Selatan Indonesia untuk setiap musim menggunakan *software* SMS dengan input data tinggi gelombang signifikan (H_s), periode puncak gelombang (T_p), dan arah datang angin (θ). Hasil analisis spektrum gelombang untuk seluruh pantai dengan empat musim yang berbeda dapat dilihat dalam Tabel 3 di bawah. Spektrum gelombang diilustrasikan dalam bentuk gambar grafik spektrum polar dua dimensi, grafik tersebut menggambarkan energi gelombang dan arah penjarangannya. Tabel 3 bahwa energi gelombang terbesar terjadi di pantai Walakiri untuk semua musim. Pada musim Barat, tinggi gelombang terbesar terjadi di pantai Walakiri (Tabel 2) sedangkan tinggi gelombang terkecil terjadi pada pantai Sorake. Hal ini berbanding lurus dengan energi gelombang yang dihasilkan (Zalukhu *et al.*, 2024), di pantai Walakiri energi gelombang yaitu 34,461 m^2/Hz dengan frekuensi 0,13 Hz (Gambar 3).

Tabel 1. Rekapitulasi Arah Angin Dominan dan F_{eff}

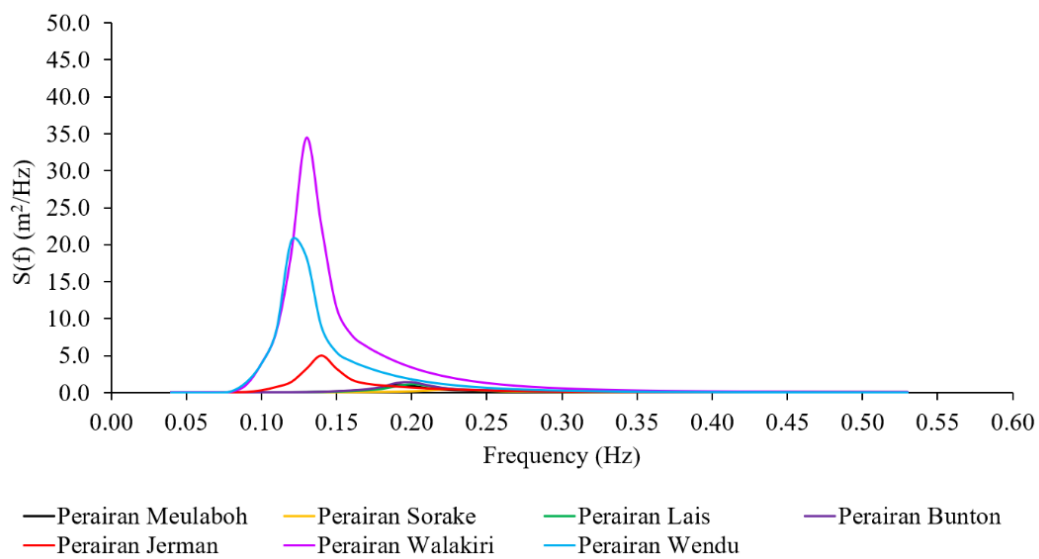
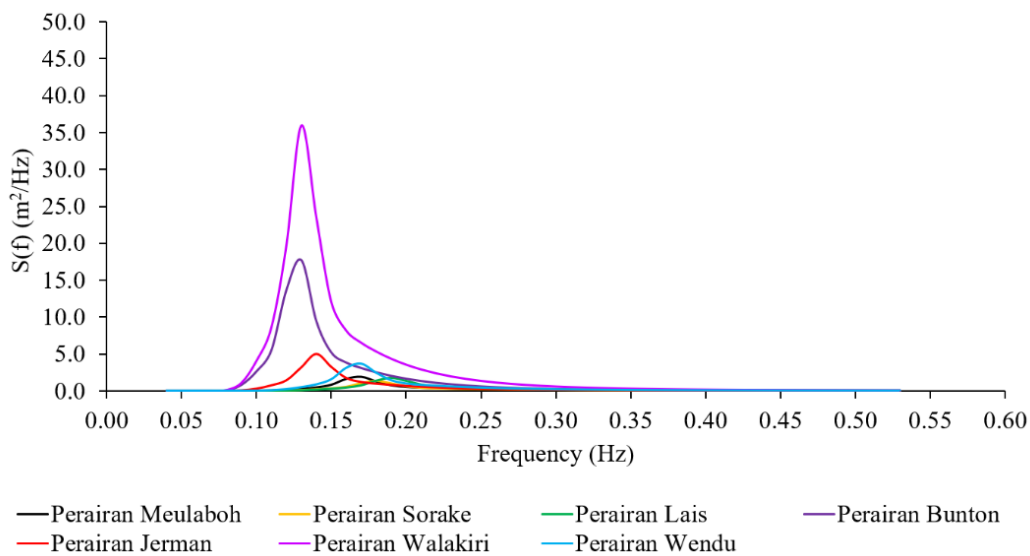
Lokasi Pantai	Musim Barat		Musim Peralihan I		Musim Timur		Musim Peralihan II	
	Arah	F_{eff} (km)	Arah	F_{eff} (km)	Arah	F_{eff} (km)	Arah	F_{eff} (km)
Meulaboh	BD	497,93	BD	497,93	B	673,26	B	673,26
Sorake	S	248,22	S	248,22	S	248,22	S	248,22
Lais	B	126,10	B	126,10	S	242,47	S	242,47
Bunton	B	58,90	TG	1065,14	TG	1065,14	TG	1065,14
Jerman	B	176,65	B	176,65	B	176,65	B	176,65
Walakiri	TL	39,51	TL	39,51	TL	39,51	TL	39,51
Wendu	B	398,30	TG	226,39	TG	226,39	TG	226,39

Tabel 2. Rekapitulasi Tinggi dan Periode Gelombang

Lokasi Pantai	Musim Barat		Musim Peralihan 1		Musim Timur		Musim Peralihan 2	
	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)	H_s (m)	T_p (s)
Meulaboh	1	5,2	1,3	6	3,7	8	1,4	6
Sorake	0,7	4,4	1,1	5,6	1,3	6	0,7	4,4
Lais	1,1	5	1,3	5,3	2,5	8,3	2,5	8,3
Bunton	1,2	5,1	3,5	7,9	3,8	8,1	2,1	7,6
Jerman	1,9	7,2	1,9	7,2	1,3	6	1,3	6
Walakiri	4,8	7,7	4,9	7,7	5,7	8,1	4,3	7,4
Wendu	3,8	8,1	1,8	6	3,8	8,1	1,5	6,4

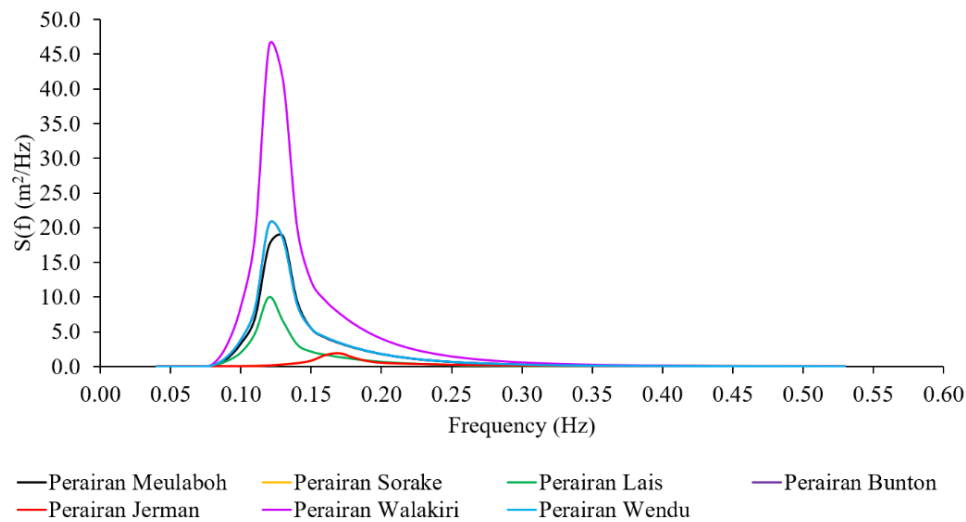
Tabel 3. Hasil Analisis spektrum gelombang

Lokasi Pantai	Musim Barat		Musim Peralihan 1		Musim Timur		Musim Peralihan 2	
	E (m ² /Hz)	f (Hz)	E (m ² /Hz)	f (Hz)	E (m ² /Hz)	f (Hz)	E (m ² /Hz)	f (Hz)
Meulaboh	1,002	0,19	1,917	0,17	17,748	0,13	2,223	0,17
Sorake	0,424	0,23	1,32	0,18	1,917	0,17	0,424	0,23
Lais	1,191	0,2	1,754	0,19	20,034	0,23	10,034	0,12
Bunton	1,398	0,2	17,746	0,13	20,524	0,12	6,38	0,13
Jerman	5,032	0,14	5,032	0,14	1,917	0,17	1,917	0,17
Walakiri	34,461	0,13	35,911	0,13	46,18	0,12	23,987	0,14
Wendu	20,524	0,12	3,675	0,17	20,524	0,12	2,679	0,16

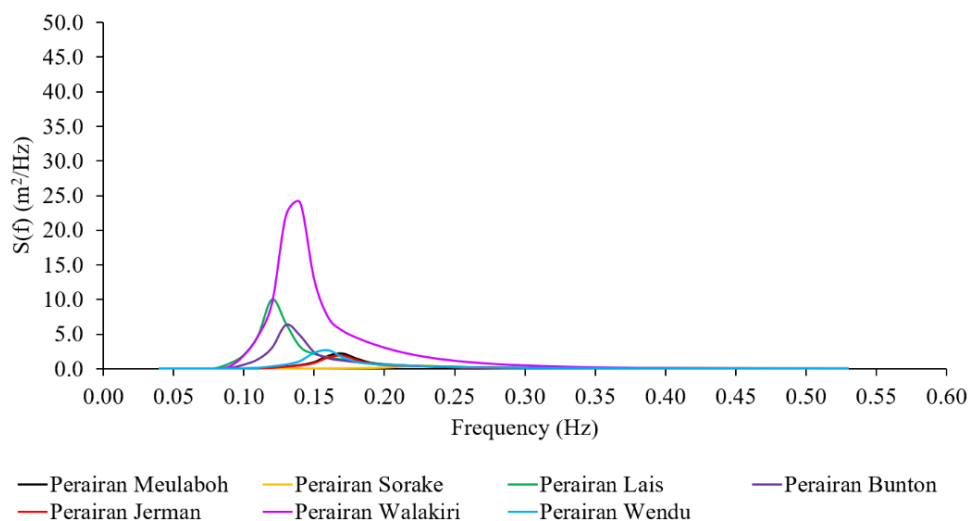
**Gambar 3.** Spektrum Gelombang Musim Barat**Gambar 4.** Spektrum Gelombang Musim Peralihan 1

Musim Peralihan 1 di pantai Walakiri energi gelombangnya terbesar yaitu 35,911 m^2/Hz dengan frekuensi 0,13 Hz (Gambar 4), juga pada saat musim Barat dan musim Peralihan 1, pantai Walakiri tinggi gelombang juga terbesar dibandingkan dengan pantai yang lain pada musim yang sama. Di pantai Walakiri periode gelombang terbesar terjadi saat musim Timur tidak terjadi saat musim Barat dan musim Peralihan 1 (Tabel 2). Kondisi ini menunjukkan bahwa periode gelombang tidak memberikan pengaruh terhadap besarnya energi gelombang yang terjadi tetapi tinggi gelombangnya, karena gelombang di laut merupakan hasil dari akumulasi energi angin yang berhembus di atas permukaan air laut (Lee *et al.*, 2022).

Saat musim Timur, tinggi gelombang terbesar terjadi di pantai Walakiri (Tabel 2), periode gelombang yang terjadi hampir sama sekitar 8 detik sampai 8,3 detik di semua pantai, kecuali pantai Jerman dan Sorake, periode gelombang yang terjadi lebih pendek yaitu 6 detik. Energi gelombang terbesar terjadi di pantai Walakiri sebesar 46,180 m^2/Hz dengan frekuensi 0,12 Hz (Gambar 5). Apabila dihubungkan dengan hasil analisis peramalan gelombang, tinggi gelombang terbesar juga terjadi pada pantai ini (Abdulkadir *et al.*, 2019).



Gambar 5. Spektrum Gelombang Musim Timur



Gambar 6. Spektrum Gelombang Musim Peralihan 2

Saat musim Peralihan 2 energi gelombang terbesar juga terjadi di pantai Walakiri sebesar 23,987 m²/Hz dengan frekuensi 0,14 Hz seperti ditunjukkan Gambar 6. Dari hasil analisis spektrum gelombang untuk ketujuh lokasi pantai menunjukkan bahwa makin tinggi gelombang maka energi gelombangnya juga semakin besar. Kondisi ini terjadi karena gelombang saat penjalarannya mempunyai energi sebagai penggerakannya, dengan adanya pengaruh *shoaling* (pendangkalan) saat penjalarannya ke daratan maka tinggi gelombang akan bertambah serta energinya juga akan bertambah tetapi kecepatan jalarnya akan berkurang, dan bila terdapat penghalang di depannya saat penjalarannya maka akan mengakibatkan kerusakan yang besar pada penghalang seperti penjalaran tsunami ke daratan (Sugianto *et al.*, 2017; Bangguna *et al.*, 2024; Favaretto *et al.*, 2022).

KESIMPULAN

Hasil analisis tinggi gelombang pada tujuh lokasi di pantai Barat hingga Selatan Indonesia, menunjukkan bahwa tinggi gelombang di pantai Walakiri lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi pantai yang lainnya yaitu 4,8 m (musim Barat), 4,9 m (musim Peralihan I), 5,7 m (musim Timur) dan 4,3 m. Saat musim Peralihan 2, energi gelombang terbesar terjadi juga di pantai Walakiri. untuk empat musim berturut-turut dari musim Barat (34,461 m²/hz), musim Peralihan 1 (35,911 m²/Hz), musim Timur (46,180 m²/Hz), musim Peralihan 2 (23,987 m²/Hz). Nilai energi gelombang yang terjadi berbanding lurus dengan tinggi gelombangnya, semakin tinggi gelombang maka energi gelombangnya juga semakin besar, hal ini terjadi karena gelombang di laut merupakan hasil dari akumulasi energi angin yang berhembus di atas permukaan air laut.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdulkadir, M.Z., Prasetyawan, I.B., Sugianto, D.N., & Anugroho, A. (2019). Analisis Spektrum Gelombang di Perairan Pulau Panjang. *Indonesian Journal of Oceanography*, 01, 6–11.
- Bangguna, D.S.V.L., Marthen M. Tangkeallo, Ebelhart O. Pandoyu, Pujiono, Orva E. Wuon, & Irnovia B.P. (2024). Simulasi Surge Tsunami dengan Metode Dam Break Menggunakan Reservoir Terbatas. *Jurnal Teknik Sipil*, 31 (2), 157–162. doi: 10.5614/jts.2024.31.2.5
- Bangguna, D.S.V.L., Pakpahan, I.B., Pandoyu, E.O., Abulebu, H.I., Bansambua, E.M., & Lamusu, R. (2025). Application of JONSWAP Method for Analyzing Wave Height and Period on the Coastal of Poso , Tomini Bay , Poso Regency. *Potensi*, 27(1), 6–11.
- Chao, W.T., Lin, T.C., Hu, K.C., & Hsu, T.W. (2023). Analysis of Unidirectional Wave Spectral Characteristics in the Northeastern Waters of Taiwan. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2–25. doi: 10.3390/jmse11122285
- Charbonneau, B.R., & Dohner, S.M. (2021). Microscale and Mesoscale Aeolian Processes of Sandy Coastal Foredunes from Background to Extreme Conditions. *Remote Sensing*, 13(4488), 1–23.
- Chen, X., Okada, T., Kawamura, Y., & Mitsuyuki, T. (2021). Estimation of directional wave spectra and hull structural responses based on measured hull data on 14,000 TEU large container ships. *Marine Structures*, 80, 103087. doi: 10.1016/j.marstruc.2021.103087
- Chun, H., & Suh, K.D. (2018). Estimation of significant wave period from wave spectrum. *Ocean Engineering*, 163, 609–616. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.06.043
- Clarindo, G., Campos, R.M., & Guedes Soares, C. (2024). Uncertainty of Wave Spectral Shape and Parameters Associated with the Spectral Estimation. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(9), 1666. doi:10.3390/jmse12091666
- 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(1), 012028. doi:10.1088/1755-1315/1298/1/012028
- Favaretto, C., Martinelli, L., Vigneron, E.M.P., & Ruol, P. (2022). Wave Hindcast in Enclosed Basins : Comparison among SWAN, STWAVE and CMS-Wave Models. *Water*, 14(1087), 1–20.
- Ferlita, A.L., Qi, Y., Di Nardo, E., Mewes, S., El Moctar, O., & Ciaramella, A. (2023). Prediction of Wave Energy Spectrum Based on Ship Motions Using a Data-Driven Approach. *CEUR Workshop Proceedings*, 3606, 1–9.

- Gao, X., Ma, X., Ma, Y., Huang, X., Zheng, Z., & Dong, G. (2022). Spectral Characteristics of Swell-Dominated Seas with In Situ Measurements in the Coastal Seas of Peru and Sri Lanka. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 39(6), 755–770. doi: 10.1175/JTECH-D-21-0143.1
- Han, P., Li, G., Skjong, S., & Zhang, H. (2022). Directional wave spectrum estimation with ship motion responses using adversarial networks. *Marine Structures*, 83, 103159. doi: 10.1016/j.marstruc.2022.103159
- 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., & Walden, H. (1973). Measurements of Wind-Wave Growth and Swell Decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) (Issue July 2015). Deutsches Hydrographisches Institut.
- Holthuijsen, L.H. (2015). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge university press.
- Kamphuis, J.W. (2000). *Introduction To Coastal Engineering And Management*. (Vol. 48). World Scientific.
- Lee, U.J., Jeong, W.M., & Cho, H.Y. (2022). Estimation and Analysis of JONSWAP Spectrum Parameter Using Observed Data around Korean Coast. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(5), 578. doi: 10.3390/jmse10050578
- Li, H., Stopa, J. E., Mouche, A., Zhang, B., He, Y., & Chapron, B. (2021). Assessment of ocean wave spectrum using global Envisat/ASAR data and hindcast simulation. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112614. doi: 10.1016/j.rse.2021.112614
- Mazzaretto, O. M., Menéndez, M., & Lobeto, H. (2022). A Global Evaluation Of The JONSWAP Spectra Suitability On Coastal Areas. *Ocean Engineering*, 266(P2), 112756. doi: 10.1016/j.oceaneng.2022.112756
- Nielsen, U.D. (2018). Deriving the absolute wave spectrum from an encountered distribution of wave energy spectral densities. *Ocean Engineering*, 165, 194–208. doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.046
- Nielsen, U.D., & Dietz, J. (2020). Ocean wave spectrum estimation using measured vessel motions from an in-service container ship. *Marine Structures*, 69, 102682. doi: 10.1016/j.marstruc.2019.102682
- Nielsen, U.D., Iwase, K., Mounet, R.E.G., & Storhaug, G. (2024). Uncertainty-associated directional wave spectrum estimation from wave-induced ship responses using Machine Learning methods. *Ocean Engineering*, 313(P3), 119543. doi:10.1016/j.oceaneng.2024.119543
- Nurhayati, I. (2018). Simulasi Numeris Perubahan Morfologi Pantai dengan Menggunakan Modul Cms-Flow di Pantai Nusa Dua, Bali. Repository Universitas Brawijaya. p1-12
- Panalaran, S., & Suntoyo. (2023). Study of Wave Parameters in the West side of Java Sea using Wave Spectral Analysis and Zero Up-Crossing Methods. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1198(1), 012034. doi: 10.1088/1755-1315/1198/1/012034
- Portilla-Yandún, J. (2018). The Global Signature of Ocean Wave Spectra. *Geophysical Research Letters*, 45(1), 267–276. doi: 10.1002/2017GL076431
- Portilla-Yandun, J., & Guachamin-Acero, W. (2023). Wave Spectral Analysis for designing Wave Energy Converters. *Proceedings of the European Wave and Tidal Energy Conference*, 15(October), 175. doi: 10.36688/ewtec-2023-175
- Reeve, D., Chadwick, A., & Fleming, C. (2011). *Coastal Engineering Processes, Theory And Design Practice*. Crc Press.
- Reeve, Dominic Chadwick, Andrew Fleming, C. (2018). *Coastal Engineering Processes, Theory and Design Practice*. CRC Press.
- Romero, L., & Lubana, K. (2022). On the Bimodality of the Wind-Wave Spectrum: Mean Square Slopes and Azimuthal Overlap Integral. *Journal of Physical Oceanography*, 52(7), 1549–1562. doi: 10.1175/JPO-D-21-0299.1
- Ryabkova, M., Karaev, V., Guo, J., & Titchenko, Y. (2019). A Review of Wave Spectrum Models as Applied to the Problem of Radar Probing of the Sea Surface. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(10), 7104–7134. doi: 10.1029/2018JC014804
- Shin, Y., Cifuentes-Lorenzen, A., Strobel, M. M. H., & O'Donnell, J. (2021). Waves in Western Long Island Sound A Fetch-Limited Coastal Basin.pdf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1–17.
- Silva, M.T. (2015). Ocean Surface Wave Spectrum. *Physical Oceanography*, p1-6 doi:

10.13140/RG.2.1.1001.4164

- Sugianto, D.N., Zainuri, M., Darari, A., Suripin, S.D., & Yuwono, N. (2017). Wave Height Forecasting Using Measurement Wind Speed Distribution Equation In Java Sea, Indonesia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 8(5), 604–619.
- Sun, L., Yang, X. Q., Bu, S. X., Zheng, W.T., Ma, Y.X., & Jiao, Z.L. (2023). Analysis of FPSO Motion Response under Different Wave Spectra. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(7), 1467. doi: 10.3390/jmse11071467
- Young, I.R. (2017). Regular, Irregular Waves and the Wave Spectrum. *Spectrum*, 1(2), 1–8. doi: 10.1002/9781118476406.emoe078
- Zalukhu, A.C., Laia, D., & Bangguna, D.S.V.L. (2024). Pemodelan Spektrum Gelombang di Perairan Ujung Barat dan Timur Indonesia Menggunakan SMS-ST Wave. *Seminar Nasional Teknik Sipil 2024*, 233–237.