

Analisis Terjadinya Gelombang Tinggi Akibat Pola Pergerakan Angin Terkait Keselamatan Pelayaran di Perairan Utara Jawa Tengah

Ferancha Retika*, Denny Nugroho Sugianto dan Rikha Widiaratih

Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Jacub Rais, Tembalang, Semarang, Jawa Tengah 50275, Indonesia
Email: ferancharetika@alumni.undip.ac.id

Abstrak

Laut Jawa Utara merupakan jalur pelayaran yang penting untuk perekonomian, dan gelombang tinggi menimbulkan ancaman terhadap keselamatan pelayaran. Studi ini menganalisis hubungan antara pergerakan pola angin dan kejadian gelombang tinggi di Laut Jawa Utara, dengan fokus pada keselamatan navigasi. Penelitian ini menggunakan data angin dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Data ini digunakan untuk mengidentifikasi pola angin dominan yang berkontribusi terhadap kejadian gelombang tinggi. Metode yang digunakan adalah metode DNS untuk peramalan gelombang, metode Weibull dan Gumbel untuk peramalan gelombang tinggi 2-100 tahun yang akan datang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pola angin dari arah tenggara dan barat laut merupakan penyebab utama gelombang tinggi di Laut Jawa Utara. Gelombang tertinggi terjadi selama musim muson barat daya, dengan tinggi gelombang mencapai 2 meter. Peramalan gelombang periode ulang 2, 5, 10, 25, 50 dan 100 tahun menggunakan perhitungan Weibull lebih sesuai di Lokasi laut lepas dan pesisir seperti pada stasiun 4 didapatkan hasil berturut-turut adalah 2.11 m, 2.31 m, 2.5 m, 2.77 m, 3 m, dan 3.24 m. Sedangkan peramalan gelombang periode ulang Gumbel lebih sesuai digunakan di daerah pesisir seperti pada stasiun 3 didapatkan hasil secara berturut-turut adalah 1.51 m, 1.73 m, 1.87 m, 2.06 m, 2.20 m dan 2.33 m.

Kata kunci: Gelombang tinggi, Musim Monsunal, Weibull, Gumbel, Keselamatan Pelayaran

Abstract

Analysis of High Wave Occurrence due to Wind Pattern Movement related to Navigation Safety in the North Java Sea

The North Java Sea is an important shipping lane for the economy, and high waves pose a significant threat to the safety of maritime navigation. This study analyzes the relationship between wind pattern movements and high wave events in the North Java Sea, focusing on navigation safety. Using wind data from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), this study uses data to identify the dominant wind patterns that contribute to high wave events. The methods used are the DNS method for wave broadcasting, the Weibull and Gumbel methods for high wave broadcasting 2-100 years in the future. The results show that wind patterns from the southeast and northwest are the main causes of high waves in the North Java Sea. The highest waves occur during the southwest monsoon season, with wave heights reaching 2 meters. Wave forecasting with return periods of 2, 5, 10, 25, 50 and 100 years using Weibull calculations is more appropriate in open sea and coastal locations such as at station 4, the results obtained were respectively 2.11 m, 2.31 m, 2.5 m, 2.77 m, 3 m, and 3.24 m. While Gumbel repeat wave forecasting is more appropriate for use in coastal areas such as at station 3, the results obtained were respectively 1.51 m, 1.73 m, 1.87 m, 2.06 m, 2.20 m and 2.33 m.

Keywords: High wave, Monsoon Season, Weibull, Gumbel, Navigation Safety

PENDAHULUAN

Perairan Laut Jawa khususnya yang tersebar di wilayah utara Pulau Jawa antara Surabaya, Semarang, Banjarmasin dan Makassar merupakan jalur pelayaran yang padat. Sehingga keselamatan pelayaran menjadi aspek yang sangat penting. Kondisi angin, arus, pasang surut dan gelombang diperlukan untuk menganalisis sistem keamanan suatu pelayaran. Terjadinya gelombang tinggi hingga ekstrim berbahaya untuk transportasi laut seperti jatuhnya muatan kapal tanker akibat dihantam gelombang serta terhambatnya distribusi logistik (Pranita & Sari., 2020). Menurut Adibah & Isdianto (2020), gelombang ekstrim adalah gelombang *destructive* yang memiliki tinggi gelombang signifikan lebih dari 2 meter. Gelombang ini dikategorikan dalam gelombang *destructive* karena berpotensi merusak Kawasan pesisir seperti abrasi pantai dan masuk nya air laut ke daratan.

Frekuensi terjadinya gelombang tinggi di perairan Utara Jawa termasuk dalam kategori rendah jika dibandingkan dengan daerah rawan gelombang tinggi antar pulau lainnya (Laut Flores dan Laut Banda), akan tetapi gelombang tinggi yang terjadi dapat mencapai 2.6 meter (Kurniawan *et al.*, 2012). Penelitian mengenai prediksi gelombang tinggi telah banyak dilakukan. Penelitian (Risandi *et al.*, 2021) dilakukan dengan mengumpulkan data gelombang selama 10 tahun (2010-2020) yang diperoleh dari ERA 5. Pada penelitian tersebut dilakukan analisa statistik gelombang dengan menggunakan metode distribusi Gumbel. Penelitian (Setiyawan *et al.*, 2015) dilakukan di perairan Pantai Lembasada Kabupaten Donggala dengan menggunakan metode distribusi Weibull. Penelitian terkait ancaman gelombang ekstrim juga dilakukan oleh (Septian & Noverma, 2022) untuk mengetahui ancaman gelombang ekstrim yang kerap terjadi di wilayah pesisir Gresik, Jawa Timur dan Perbani *et al.*, 2021 di perairan Kepulauan Karimunjawa.

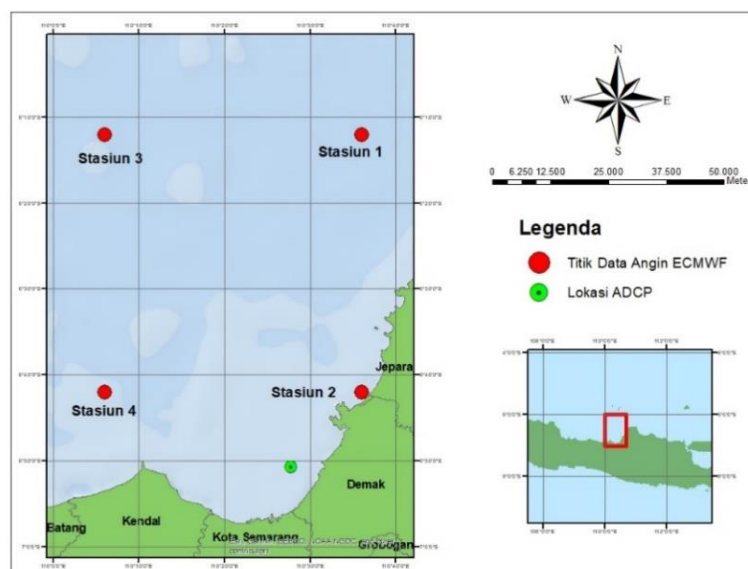
Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik gelombang, daerah berpotensi terjadi gelombang tinggi serta periode terjadinya gelombang tinggi yang mempengaruhi alur pelayaran di Perairan Utara Jawa. Sehingga meningkatkan keselamatan navigasi di Laut Jawa Utara dengan memberikan peringatan dini untuk kejadian gelombang tinggi dan dapat mengurangi resiko kecelakaan dengan memastikan perjalanan kapal yang aman.

MATERI DAN METODE

Penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder, pengambilan data lapangan, pengolahan data kemudian menganalisis hasil data. Data sekunder yang digunakan pada penelitian ini adalah data arah, kecepatan angin dan gelombang selama 15 tahun (Januari 2009 – Juni 2023) yang diperoleh melalui website ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu>). Data Batimetri Perairan Utara Jawa Tengah yang diperoleh melalui website Ina-Geoportal (<https://tanahair.indonesia.go.id/>). Data lapangan berupa tinggi gelombang menggunakan ADCP diambil di Pantai Glagah Wangi, Kecamatan Karangtengah, Kabupaten Demak pada tanggal 1-4 Juni 2023 berada pada koordinat $6^{\circ} 50.635'S$ dan $110^{\circ} 27.757'E$ di kedalaman 14 meter (Gambar 1). Data alur pelayaran Jawa Tengah yang diperoleh melalui website Kementerian Perhubungan Republik Indonesia (<https://sigita.dephub.go.id/>). Adapun batasan lokasi penelitian ini mencakup wilayah perairan utara Jawa Tengah dari Kendal hingga Jepara.

Data Angin

Data angin diolah menggunakan software ODV untuk mendapatkan kecepatan angin dan arah angin pada ketinggian 10 meter diatas permukaan laut. Penggunaan data yang panjang bertujuan untuk mengetahui karakteristik suatu gelombang laut yang lebih akurat (Sugianto, 2010). Data angin yang didapatkan dari ECMWF berupa komponen U dan V, selanjutnya di konversi menjadi menjadi kecepatan dan arah angina (Pratiwi *et al.*, 2023).



Gambar 1. Lokasi Penelitian di Perairan Utara Jawa Tengah

Peramalan Gelombang

Pengolahan data gelombang dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari gelombang dengan menghitung gelombang representatif atau gelombang signifikan (H_s). Gelombang representatif yang dihitung terdiri dari tinggi gelombang maksimum (H_{max}), tinggi gelombang signifikan (H_s), periode gelombang maksimum (T_{max}) dan periode gelombang signifikan (T_s) (Triatmodjo, 2012). Peramalan gelombang dihitung menggunakan metode DNS kemudian diverifikasi dengan tinggi gelombang laut pengamatan untuk mendapatkan perbandingan error relatif. Adapun persamaan metode DNS yang digunakan yaitu, (Sugianto *et al.*, 2017):

$$H_s = 0,00162U^2 + 0,0406U$$

$$T_s = 0,15U + 2,892$$

Dimana U merupakan kecepatan angin dengan satuan Knot, H_s adalah tinggi gelombang laut signifikan dan T_s adalah periode gelombang laut signifikan.

Verifikasi Ketelitian Data

Analisis ketelitian kedua data dilakukan untuk mengetahui apakah data gelombang hasil konversi angin yang telah diolah sesuai dengan data observasi. Adapun untuk mengetahui seberapa besar kesalahan antara data prediksi dengan data observasi dilakukan dengan menghitung nilai *Mean Relative Error* (MRE) (). Berikut adalah persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai MRE (Hutasuhut *et al.*, 2022):

$$RE = \frac{|x - c|}{x} \times 100\%$$

Sehingga diperoleh persamaan MRE sebagai berikut :

$$MRE = \sum_0^n \frac{RE}{n}$$

Dimana RE = Relative Error (%); MRE = Mean Relative Error (%); c = Data hasil simulasi; x = Data hasil lapangan; n = Jumlah lapang.

Periode Ulang Gelombang

Prediksi gelombang ekstrim dilakukan dalam beberapa periode yaitu dalam periode 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun dengan menggunakan metode Weibull dan Gumbel. Menurut Purwanto *et al.* (2020), kedua metode ini memiliki Langkah-langkah yang hampir sama yaitu sama-sama menghitung fungsi distribusi probabilitas. Yang menjadi pembeda antara keduanya adalah koefisien yang digunakan disesuaikan dengan metode Weibull. Biasanya penentuan gelombang dengan periode ulang selama T tahun yang artinya terdapat peluang terjadinya gelombang tertinggi sebanyak 1 kali dalam T tahun.

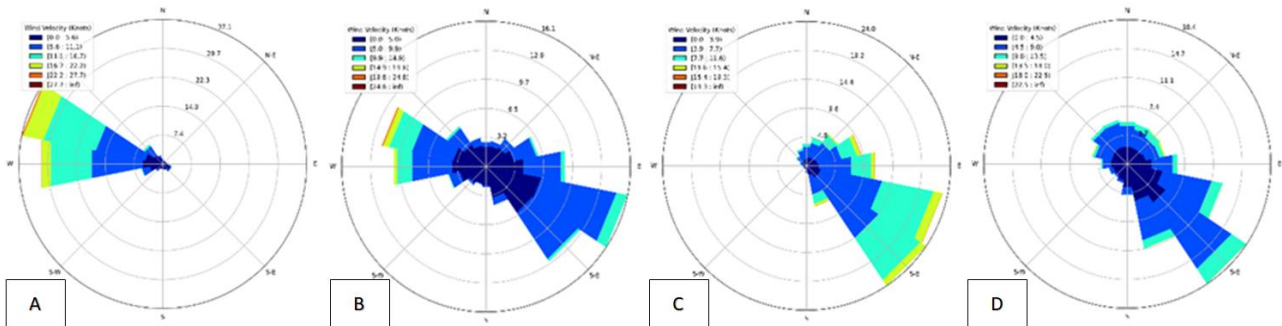
HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Angin

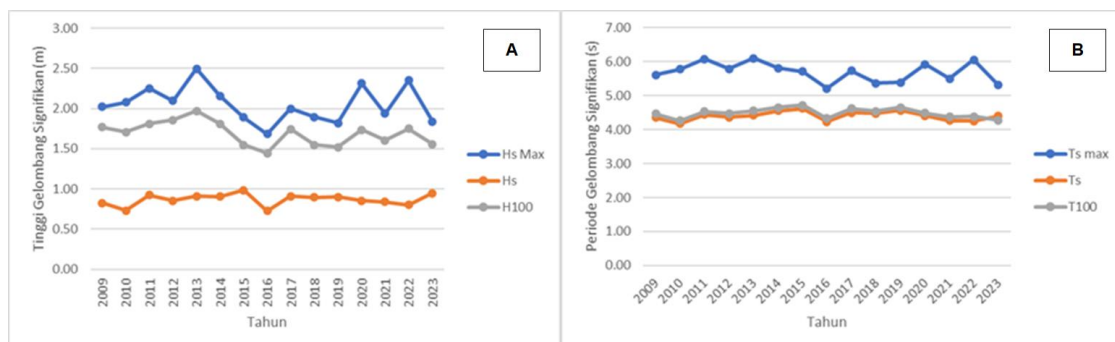
Karakteristik pola angin yang terjadi setiap musim selama periode 15 tahun (2009-2023) disajikan dalam grafik windrose dan panjang jarak dari tiupan angin di atas permukaan laut (*fetch*). Panjang *fetch* efektif berpengaruh dalam karakteristik gelombang yang dibangkitkan oleh angin (Hardjono, 2018). Pada musim barat karakteristik pola angin menunjukkan arah angin dominan berasal dari arah barat laut dengan rentang kecepatan angin berkisar antara 5,6-27,7 knots. Pada musim peralihan 1 karakteristik pola angin menunjukkan arah angin dominan Tenggara dengan kecepatan angin berkisar antara 5-24,8. Pada musim timur karakteristik pola angin menunjukkan arah angin dominan berada pada tenggara dengan rentang kecepatan angin berkisar antara 3,9-19,3 knots. Pada musim peralihan 2 arah angin dominan menuju Tenggara dengan rentang kecepatan 4,5-22,5 knots. Sehingga berdasarkan hasil pengolahan data angin dapat diketahui bahwa kecepatan angin tertinggi terjadi pada musim barat dengan kecepatan tertinggi mencapai 27,7 knots.

Tabel 1. Data Gelombang Signifikan Harian

Waktu	H_s (m)	T_s (s)
1 Juni 2023	0.14	5.7
2 Juni 2023	0.19	5.6
3 Juni 2023	0.17	5.9
4 Juni 2023	0.15	6.2



Gambar 2. Windrose : (A) Musim Barat, (B) Musim Peralihan 1, (C) Musim Timur, (D) Musim Peralihan 2 tahun 2009-2023



Gambar 3. Tinggi (A) dan Periode (B) Gelombang Signifikan Stasiun 1 (2009-2023) Menggunakan Metode DNS

Perhitungan panjang fetch efektif yang diperoleh sebesar 148.56 km pada musim barat sedangkan pada 3 musim lainnya yaitu musim peralihan 1, musim timur dan musim peralihan 2 memiliki panjang fetch efektif yang sama yaitu 65,62 km.

Gelombang Lapangan

Data gelombang lapangan diambil pada saat musim peralihan 1 (April-Mei-Juni). Pergerakan angin musiman masa musim peralihan lebih kecil sehingga gelombang yang dibangkitkan juga lebih kecil (Wardhani *et al.*, 2021).

Peramalan Gelombang

Pengolahan data gelombang hasil dari konversi angin selama 15 tahun (2009-2023) di Perairan Utara Jawa Tengah menunjukkan tinggi gelombang signifikan yang beragam. Stasiun 1 terletak di perairan lepas memiliki ketinggian gelombang signifikan 0,7–1 meter dan periode gelombang 4-5 detik. Adapun tinggi gelombang maksimum pada stasiun ini berkisar antara 1,5 – 2,5 meter dengan periode gelombang 5-6 detik.

Stasiun 2 terletak di dekat pesisir pantai Jepara memiliki ketinggian gelombang signifikan 0,4–0,7 meter dan periode gelombang 3,9-4,3 detik. Adapun tinggi gelombang maksimum pada stasiun ini berkisar antara 1,1 – 1,97 meter dengan periode gelombang 5-6,1 detik.

Stasiun 3 terletak di perairan lepas memiliki ketinggian gelombang signifikan 0,7–1 meter dan periode gelombang 4-4.5 detik. Adapun tinggi gelombang maksimum pada stasiun ini berkisar antara 1,7-2,6 meter dengan periode gelombang 5-6,3 detik.

Stasiun 4 terletak sedikit lebih jauh dari pesisir pantai Kendal memiliki ketinggian gelombang signifikan 0,5–0,8 meter dan periode gelombang 3,9-4,3 detik. Adapun tinggi gelombang maksimum pada stasiun ini berkisar antara 1,4 – 2,2 meter dengan periode gelombang 5,1-6,3 detik.

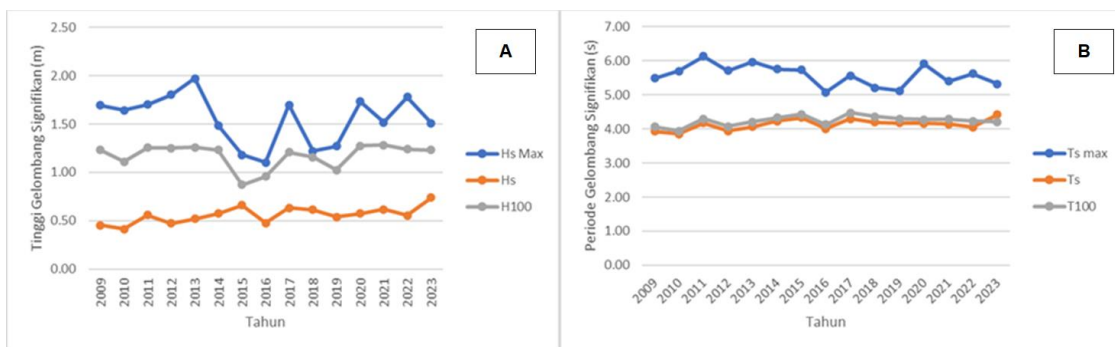
Dari hasil pengolahan data tersebut dapat dilihat stasiun 2 yang terletak di daerah pesisir memiliki perolehan tinggi gelombang yang paling kecil dibandingkan dengan stasiun 1, 3 dan 4. Umumnya tinggi gelombang pada pesisir pantai memang lebih kecil dibandingkan dengan tinggi gelombang yang jauh dari pesisir pantai. Pendangkalan kedalaman laut menyebabkan gelombang tersebut pecah, dimana gelombang

terjadi saat mendekati pesisir pantai (Purnama *et al.*, 2023). Stasiun 1 dan 3 merupakan stasiun yang terletak jauh dari pesisir pantai yang dilewati oleh 4 alur pelayaran. Dari ke-empat stasiun penelitian, stasiun 3 merupakan stasiun dengan tinggi gelombang tertinggi. Lokasinya yang berada di laut lepas memungkinkan gelombang terbentuk dengan sempurna (Vironita *et al.*, 2010).

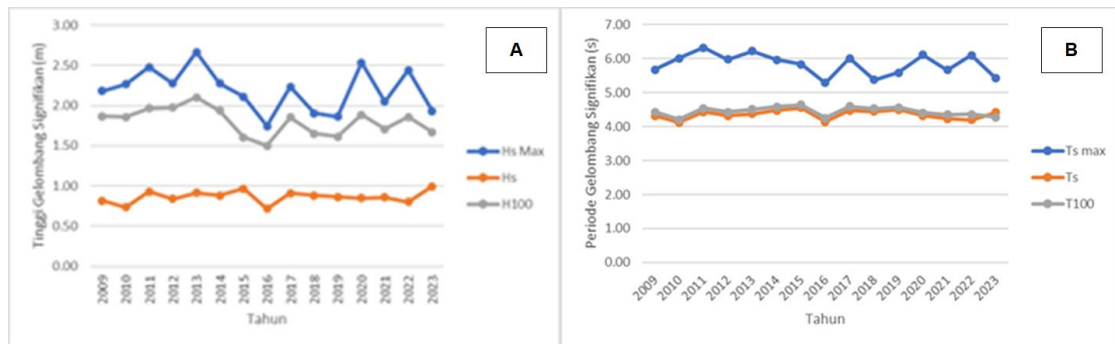
Verifikasi Ketelitian Data

Analisis ketelitian kedua data antara data lapangan dengan data prediksi gelombang konversi kecepatan angin menunjukkan persentase 24% dan 41% untuk tinggi dan periode gelombang (Tabel 2). Analisis ketelitian data antara data peramalan gelombang menggunakan metode DNS dengan data gelombang satelit pada stasiun 1-4 dapat dilihat pada tabel 3.

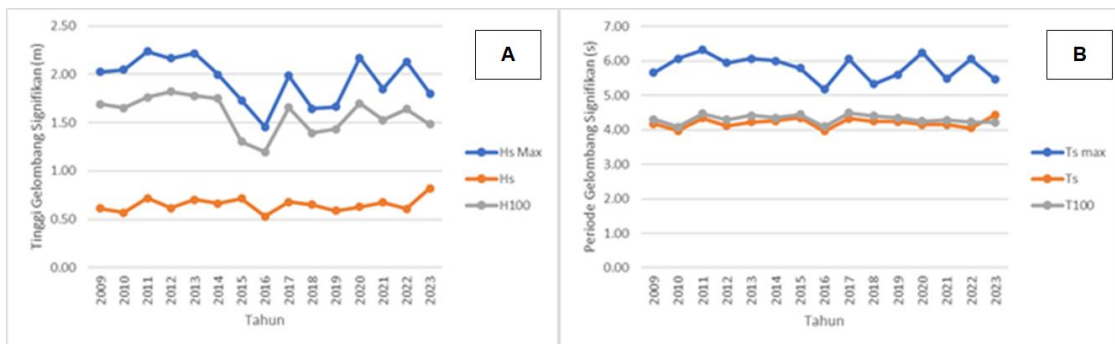
Analisis ketelitian data antara data peramalan periode gelombang menggunakan metode Sugianto dengan data gelombang satelit pada stasiun 1-4 dapat dilihat pada tabel 4. Nilai MRE yang didapatkan dari peramalan tinggi dan periode gelombang dengan metode Sugianto dengan ADCP untuk tinggi gelombang



Gambar 4. Tinggi (A) dan Periode (B) Gelombang Signifikan Stasiun 2 (2009-2023) Menggunakan Metode DNS



Gambar 5. Tinggi (A) dan Periode (B) Gelombang Signifikan Stasiun 3 (2009-2023) Menggunakan Metode DNS



Gambar 6. Tinggi (A) dan Periode (B) Gelombang Signifikan Stasiun 4 (2009-2023) Menggunakan Metode DNS

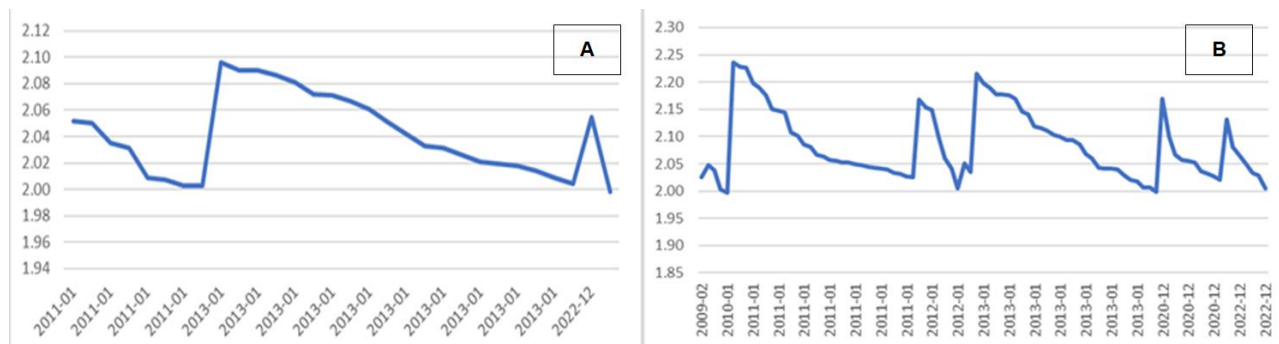
signifikan adalah 24% dan untuk periode gelombang 41%. Sementara validasi data peramalan tinggi dan periode gelombang menggunakan metode Sugianto dengan data satelit Copernicus pada stasiun 1 untuk tinggi gelombang signifikan adalah 15% dan untuk periode gelombang 11%. Pada stasiun 2 untuk tinggi gelombang signifikan adalah 31% dan untuk periode gelombang 5%. Pada stasiun 3 untuk tinggi gelombang signifikan adalah 20% dan untuk periode gelombang 7%. Pada stasiun 4 untuk tinggi gelombang signifikan adalah 17% dan untuk periode gelombang 6%. Menurut Hutasuhut *et al.* (2022), nilai MRE yang kurang dari 30% memiliki indeks kesalahan yang rendah. Dengan indeks kesalahan yang rendah data tersebut dapat digunakan sebagai data peramalan gelombang karena nilai error tidak melebihi 50% (Putra *et al.*, 2021).

Tabel 2. Hasil Validasi Data Peramalan Tinggi dan Periode Gelombang Metode DNS dengan ADCP

Tangg al	Hs (m)		RE	Ts (s)		RE
	ADCP	Prediksi		ADCP	Prediksi	
1	0,14	0,18	0,31	5,7	3,55	0,38
2	0,19	0,13	0,31	5,6	3,40	0,39
3	0,17	0,15	0,14	5,9	3,45	0,41
4	0,15	0,12	0,19	6,2	3,37	0,46
MRE			0,24	MRE		0,41

Tabel 3. Hasil Validasi Data Peramalan Tinggi Gelombang Metode DNS dengan Data Satelit

Tahu n	Hs (m)			Hs (m)			Hs (m)			Hs (m)		
	Satel it	St.1	RE	Satel it	St.2	RE	Satel it	St.3	RE	Satel it	St.4	RE
2009	2,02	1,77	0,12	1,65	1,07	0,35	2,18	1,85	0,15	2,03	1,69	0,17
2010	2,08	1,71	0,18	1,64	0,95	0,42	2,27	1,67	0,26	2,05	1,49	0,27
2011	2,25	1,92	0,15	1,70	1,20	0,30	2,48	1,94	0,22	2,24	1,88	0,16
2012	2,10	1,76	0,16	1,76	1,26	0,29	2,28	1,72	0,24	2,17	1,98	0,08
2013	2,50	2,23	0,11	1,97	1,34	0,32	2,66	2,25	0,16	2,22	1,93	0,13
2014	2,16	1,85	0,14	1,49	1,06	0,29	2,28	1,94	0,15	2,00	1,64	0,18
2015	1,89	1,44	0,24	1,18	0,77	0,34	2,11	1,70	0,20	1,73	1,30	0,25
2016	1,69	1,65	0,02	1,10	0,78	0,29	1,75	1,53	0,12	1,46	1,28	0,12
2017	2,00	1,49	0,25	1,70	1,25	0,26	2,24	1,59	0,29	1,87	1,58	0,15
2018	1,89	1,86	0,02	1,22	0,93	0,24	1,91	1,70	0,11	1,65	1,44	0,13
2019	1,82	1,55	0,15	1,27	0,84	0,34	1,86	1,42	0,24	1,66	1,45	0,13
2020	2,31	1,91	0,18	1,61	1,12	0,31	2,54	1,89	0,26	2,06	1,45	0,29
2021	1,94	1,71	0,12	1,52	0,99	0,35	2,05	1,68	0,18	1,85	1,69	0,08
2022	2,35	1,81	0,23	1,78	1,27	0,29	2,44	1,70	0,30	2,13	1,54	0,28
2023	1,84	1,56	0,15	1,51	1,02	0,33	1,93	1,58	0,18	1,80	1,52	0,16
MRE			0,15			0,31			0,20			0,17



Gambar 7. Frekuensi Tinggi Gelombang (a) Stasiun 2 dan (b) Stasiun 4 lebih dari 2 meter (2009-2023)

Tabel 4. Hasil Validasi Data Peramalan Periode Gelombang Metode Sugianto dengan Data Satelit

Tahun	Ts (m)		RE	Ts (m)		RE	Ts (m)		RE	Ts (m)		RE
	Satelit	St.1		Satelit	St.2		Satelit	St.3		Satelit	St.4	
2009	5,54	6,33	0,14	5,48	5,31	0,03	5,68	6,43	0,13	5,65	6,22	0,10
2010	5,78	6,25	0,08	5,70	5,11	0,10	6,01	6,20	0,03	6,07	5,95	0,02
2011	6,08	6,52	0,07	6,14	5,51	0,10	6,33	6,54	0,03	6,31	6,47	0,03
2012	5,79	6,32	0,09	5,67	5,61	0,01	5,99	6,26	0,05	5,95	6,60	0,11
2013	6,10	6,90	0,13	5,97	5,73	0,04	6,22	6,92	0,11	6,07	6,53	0,08
2014	5,81	6,43	0,11	5,76	5,29	0,08	5,97	6,55	0,10	6,00	6,16	0,03
2015	5,71	5,87	0,03	5,74	4,80	0,16	5,84	6,23	0,07	5,79	5,67	0,02
2016	5,21	6,17	0,18	5,07	4,82	0,05	5,29	5,42	0,02	5,17	5,64	0,09
2017	5,74	5,95	0,04	5,57	5,60	0,01	6,02	6,09	0,01	5,77	6,08	0,05
2018	5,37	6,44	0,20	5,21	5,08	0,02	5,38	6,23	0,16	5,32	5,87	0,10
2019	5,39	6,03	0,12	5,12	4,92	0,04	5,59	5,85	0,05	5,61	5,88	0,05
2020	5,92	6,50	0,10	5,39	5,39	0,00	6,12	6,48	0,06	6,24	5,89	0,06
2021	5,50	6,25	0,14	5,40	5,18	0,04	5,66	6,21	0,10	5,49	6,22	0,13
2022	6,05	6,38	0,05	5,62	5,62	0,00	6,10	6,24	0,02	6,05	6,02	0,01
2023	5,31	6,05	0,14	5,33	5,22	0,02	5,43	6,07	0,12	5,46	5,98	0,10
MRE			0,11			0,05			0,07			0,06

Peramalan Periode Ulang

Gelombang tinggi hingga ekstrim adalah gelombang perusak yang dapat dikategorikan memiliki ketinggian mencapai 2 meter atau lebih (Adibah & Isdianto, 2020). Pada stasiun 2 intensitas kemunculan tinggi gelombang lebih dari 2 meter terjadi sebanyak 29 kali pada tahun 2011, 2013 dan 2022. Adapun tinggi gelombang maksimum tersebut berkisar 2-2,05 meter dengan periode gelombang 5-6,1 detik. Pada stasiun 4 intensitas kemunculan tinggi gelombang lebih dari 2 meter terjadi sebanyak 87 kali pada tahun 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2020 dan 2022. Adapun tinggi gelombang maksimum tersebut berkisar 2-2,22 meter dengan periode gelombang 5-6,3 detik.

Pada stasiun 1 intensitas kemunculan tinggi gelombang lebih dari 2 meter terjadi sebanyak 115 kali pada tahun 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2020 dan 2022. Adapun tinggi gelombang maksimum tersebut berkisar 2-2,5 meter dengan periode gelombang 5-6,3 detik. Pada stasiun 3 intensitas kemunculan tinggi gelombang lebih dari 2 meter terjadi sebanyak 224 kali pada tahun 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2017, 2020 dan 2022. Adapun tinggi gelombang maksimum tersebut berkisar 2-2,6 meter dengan periode gelombang 5-6,1 detik. Intensitas kemunculan gelombang tinggi ini sesuai dengan pola angin. Menurut Wicaksana *et al.* (2015), puncak gelombang tinggi di Laut Jawa terjadi pada musim barat dimana tinggi gelombang signifikan di Laut Jawa tetap. Sehingga berdasarkan hasil peramalan gelombang, tinggi gelombang signifikan yang mencapai 2,5 meter berbahaya untuk kapal nelayan dan kapal tongkang.

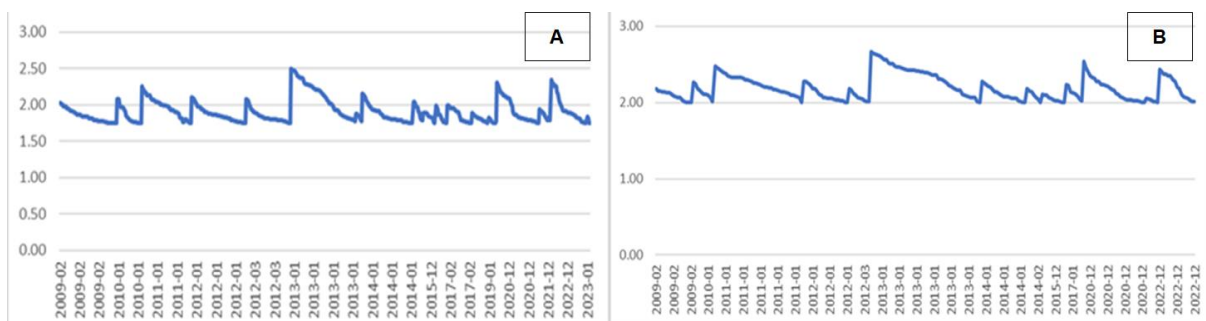
Analisis terjadinya gelombang ekstrim dilakukan dengan melakukan peramalan gelombang periode ulang 2, 5, 10, 25, 50 dan 100 tahun menggunakan metode Weibull dan Gumbel. Pada stasiun 2 dari kedua perhitungan peramalan periode ulang tersebut dapat dilihat bahwa kemungkinan terjadinya gelombang setinggi 2 meter adalah pada periode pengulangan 25 tahun. Pada stasiun 4 kemungkinan terjadinya gelombang setinggi 2 meter adalah pada periode pengulangan 5 tahun. Pada stasiun 1 dan 3 kemungkinan terjadinya gelombang setinggi 2 meter adalah pada periode pengulangan 2 tahun.

Pada perhitungan kedua nya tinggi gelombang perhitungan Weibull memiliki rentang probabilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan perhitungan Gumbel. Namun hasil dari peramalan periode ulang, hasil dari perhitungan Gumbel lebih tinggi dibandingkan dengan Weibull. Hasil peramalan tinggi gelombang periode kala ulang yang diperoleh semakin meningkat sesuai pertambahan tahun. Hal ini dikarenakan peningkatan tinggi gelombang signifikan periode ulang dipengaruhi oleh jumlah kejadian gelombang dan periode ulang (Purwanto *et al.*, 2020). Selain itu kemungkinan untuk gelombang signifikan disamai atau dilampaui satu kali dalam T tahun (periode ulang) dipengaruhi oleh panjang data atau jumlah data yang tersedia (Setiyawan *et al.*, 2015).

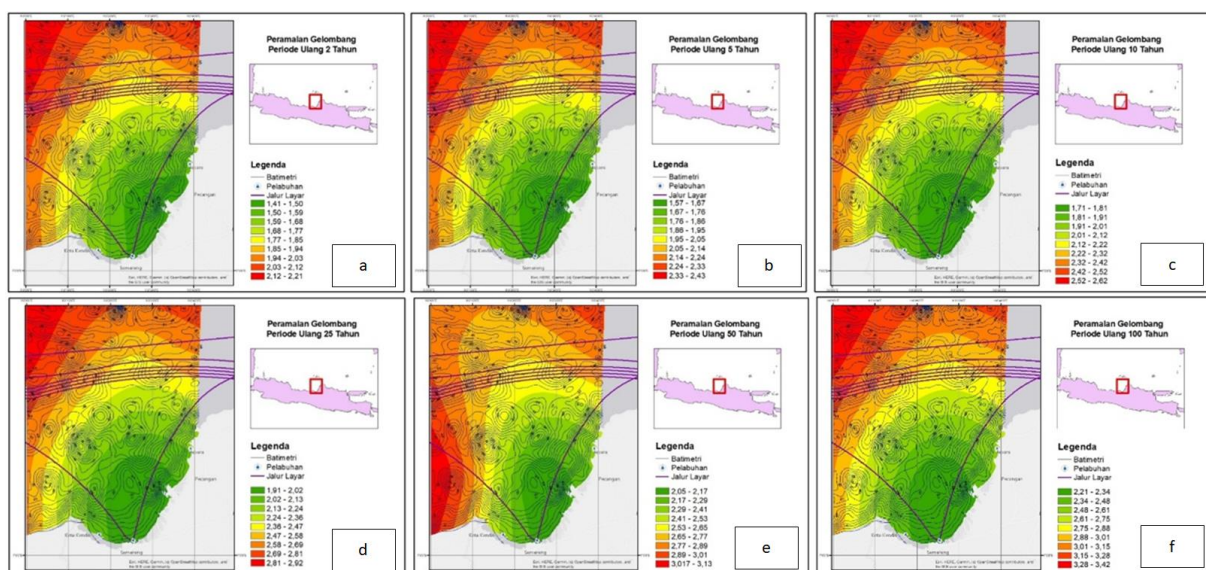
Peta sebaran gelombang tinggi dengan menggunakan kedua perhitungan menunjukkan bahwa frekuensi terjadinya gelombang lebih dari 2 meter lebih sering terjadi di perairan lepas dengan kedalaman laut yang cukup dalam (stasiun 1 dan 3). Hal ini dikarenakan di lautan lepas gelombang memungkinkan untuk terbentuk sempurna tanpa dipengaruhi oleh panjang fetch dan lamanya angin bertiup (Vironita *et al.*, 2010). Namun intensitas kejadian gelombang tinggi yang juga selaras dengan pola angin musiman membuktikan bahwa gelombang tinggi di perairan utara Jawa Tengah sebagian besar dibangkitkan oleh angin. Sedangkan pada stasiun 2 yang terletak di pesisir frekuensi terjadinya gelombang lebih dari 2 meter jarang terjadi. Hal ini dikarenakan gelombang mengalami pendangkalan kedalaman laut menyebabkan gelombang tersebut pecah yang mana pecah nya gelombang terjadi ketika gelombang mendekati pesisir pantai (Purnama *et al.*, 2023).

Tabel 5. Tinggi Gelombang Periode Ulang 100 tahunan Metode Weibull dan Metode Gumbel

Periode Ulang (tahun)	Hsr		Hsr				Hsr			
	(Weibull)	(Gumbel)	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
2	1.97	1.46	2.11	1.87	2.02	1.51	2.16	1.91		
5	2.16	1.64	2.31	2.03	2.23	1.73	2.40	2.11		
10	2.32	1.81	2.50	2.18	2.37	1.87	2.56	2.25		
25	2.57	2.05	2.77	2.39	2.54	2.06	2.76	2.42		
50	2.77	2.25	3.00	2.57	2.67	2.20	2.92	2.55		
100	2.99	2.47	3.24	2.76	2.80	2.33	3.07	2.67		



Gambar 8. Frekuensi Tinggi Gelombang (a) Stasiun 1 dan (b) Stasiun 3 lebih dari 2 meter (2009-2023)



Gambar 9. Peta Peramalan Gelombang Periode Ulang 2 tahun (a), 5 tahun (b), 10 tahun (c), 25 tahun (d), 50 tahun (e), 100 Tahun (f) dengan Metode Weibull

Perairan Utara Jawa Tengah juga termasuk dalam pelayaran tersibuk. Pada perairan ini terdapat 5 alur pelayaran yang melaluinya serta terdapat 2 alur pelayaran yang menghubungkan Pelabuhan Tanjung Emas dengan Pelabuhan Tanjung Priok dan Pelabuhan Tanjung Perak. Pelabuhan Tanjung Emas merupakan Pelabuhan yang memiliki peran penting dalam pertukaran arus barang logistik, bongkar muat kapal, dimana 47% arus muatan barang Jawa Tengah melalui Pelabuhan Tanjung Emas (Agni *et al.*, 2019). Selain itu Pelabuhan ini juga merupakan Pelabuhan nasional yang digunakan dalam menerima dan memberangkatkan kapal penumpang, serta menerima penyebrangan (Supriadi *et al.*, 2014).

KESIMPULAN

Karakteristik gelombang di Perairan Utara Jawa Tengah memiliki tinggi gelombang signifikan berkisar antara 0.4-1 meter dengan periode gelombang 3.9-5 detik. Gelombang tinggi lebih sering terjadi pada bulan Januari dan Desember yang merupakan periode angin Musim Barat. Peramalan gelombang periode ulang 2, 5, 10, 25, 50 dan 100 tahun menggunakan perhitungan Weibull lebih sesuai pada lokasi di laut lepas dan pesisir seperti pada stasiun 4 didapatkan hasil berturut-turut menggunakan metode Weibull berturut-turut adalah 2.11 m, 2.31 m, 2.5 m, 2.77 m, 3 m, dan 3.24 m. Sedangkan peramalan gelombang periode ulang menggunakan metode Gumbel lebih sesuai digunakan di daerah pesisir seperti pada stasiun 3 didapatkan hasil secara berturut-turut adalah 1.51 m, 1.73 m, 1.87 m, 2.06 m, 2.20 m dan 2.33 m. Frekuensi terjadinya gelombang dengan tinggi lebih dari 2 meter lebih sering terjadi di perairan lepas dengan kedalaman laut yang cukup dalam (stasiun 2 dan 4) dan terjadi pada musim barat. Sedangkan untuk wilayah lebih dekat pesisir frekuensi terjadinya gelombang tinggi lebih dari 1.5 meter dapat berbahaya bagi kapal nelayan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adibah, F. & Isdianto, A. 2020. Prediksi Tinggi Gelombang Ekstrim Guna Meningkatkan Keselamatan Pengunjung di Pantai Clungup. *Buletin Udayana Mengabdikan*, 19(4): 382-388.
- Agni, R., Yunianto, I. T. & Permana, C. B. S. 2019. Analisis Dampak Pengembangan Pelabuhan di Suatu Wilayah: Studi Kasus Terminal Kendal Jawa Tengah. *Jurnal Teknik ITS*. 7(2): E134-E139. <http://dx.doi.org/10.12962/j23373539.v7i2.36860>.
- Hardjono, S. 2018. Analisa Ketinggian Gelombang yang Sesuai untuk Pengoperasian Kapal Cepat Rudal 60m di Perairan Indonesia. *Warta Penelitian Perhubungan*, 30(1): 43-58. <http://dx.doi.org/10.25104/warlit.v30i1.635>.
- Hutasuhut, A., Ismanto, A., Rochaddi, B., Maslukah, L. & Widiaratih, R. 2022. Sediment suspension distribution models in east canal flood estuary waters, Semarang, Central Java, Indonesia. *Tropical Aquatic and Soil Pollution*, 2(2): 76-89. <http://dx.doi.org/10.53623/tasp.v2i2.93>.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N. & Permana, D. S. 2012. Kajian Daerah Rawan Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 13(3): 201-212. <https://doi.org/10.31172/jmg.v13i3.135>.
- Pramita, G. & Sari, N. 2020. Studi Waktu Pelayanan Kapal Di Dermaga I Pelabuhan Bakauheni. *Journal of Infrastructural in Civil Engineering*, 1(1): 14-18. <https://doi.org/10.33365/jice.v1i01.702>.
- Pratiwi, N. D., Muliadi & Risko. 2023. Estimasi Tinggi Gelombang Signifikan Di Pesisir Sengkubang Mempawah Kalimantan Barat. *Oceanologia*, 3(1): 8-16.
- Purbani, D., Salim, H. L., Kusuma, L. P. A. S. C., Tussadiah, A. & Subandriyo, J. 2019. Ancaman Gelombang Ekstrim dan Abrasi pada Penggunaan Lahan di Pesisir Kepulauan Karimunjawa (Studi Kasus: Pulau Kemujan, Pulau Karimunjawa, Pulau Menjangan Besar dan Pulau Menjangan Kecil). *Jurnal Kelautan Nasional*, 14(1): 33-45.
- Purnama, L. D. W., Azies, I., Malik, K. & Pranowo, W. S. 2023. Pemodelan Gelombang Laut di Perairan Teluk Jakarta Bulan Januari 2024. *Jurnal Riset Jakarta*, 16(2): 79-86. <https://doi.org/10.37439/jurnaldrd.v16i2.92>.
- Purwanto, Trisanto, R., Handoyo, G., Trenggono, M. & Suryoputro, A. A. D. Analisis Peramalan dan Periode Ulang Gelombang di Perairan Bagian Timur Pulau Lirang, Maluku Barat Daya. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(1): 80-89. <https://doi.org/10.14710/ijoce.v2i1.7481>.
- Putra, T. W. L., Zainuri, M. & Sugianto, D. N. 2021. Studi Penjalaran Gelombang Laut di Pulau Panjang, Kabupaten Jepara. *Buletin Oseanografi Marina*, 10(1): 75-87. <https://doi.org/10.14710/buloma.v10i1.34299>.

- Risandi, J., Pranowo, W. S. & Puspita, C. D. 2021. Prediksi Gelombang Ekstrim di Kepulauan Seribu untuk Aplikasi Kelautan dan Perikanan. *Jurnal Riset Jakarta*, 14(2): 51-56. <https://doi.org/10.37439/jurnaldrd.v14i2.49>.
- Septian, A. R. T. & Noverma. 2022. Analisis Ancaman Bencana Gelombang Ekstrem dan Abrasi di Wilayah Pesisir Gresik Jawa Timur. *Journal of Disaster Mitigation and Civil Engineering Research*, 1(1): 9-15.
- Setiyawan, Rusdin, A. & Adnyani, N. 2015. Analisis Peramalan Ketinggian Gelombang Laut Dengan Periode Ulang Menggunakan Metode Distribusi Weibull (Studi Kasus Pantai Lembasada Kabupaten Donggala). *Journal Teknik Sipil Dan Infrastruktur*. 5(1).
- Sugianto, D. N. 2010. Model Distribusi Data Kecepatan Angin Dan Pemanfaatannya Dalam Peramalan Gelombang Di Perairan Laut Paciran, Jawa Timur. *ILMU KELAUTAN: Indonesian Journal of Marine Sciences*. 15(3): 143-152. <https://doi.org/10.14710/ik.ijms.15.3.143-152>.
- 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.
- Supriadi, A., Widada, S. & Setiyono, H. 2014. Pemetaan Batimetri Untuk Alur Pelayaran Pelabuhan Penyeberangan Mororejo Kabupaten Kendal. *Journal of Oceanography*, 3(2): 284-293.
- Triatmodjo, B. 2012. Teknik Pantai. Yogyakarta, Beta Offset.
- Vironita, F., Rispiningtati, R. & Marsudi, S. 2010. Analisis Stabilitas Penyumbatan Muara Sungai Akibat Fenomena Gelombang, Pasang Surut, Aliran Sungai dan Pola Pergerakan Sedimen pada Muara Sungai Bang, Kabupaten Malang. *Jurnal Teknik Pengairan*, 1(2).
- Wardhani, P. A., Widagdo, S. & Prasita, V. D. 2021. Pola Angin dan Kaitannya Terhadap Karakteristik Tinggi Gelombang di Perairan Labuan Bajo, NTT. *Jurnal Riset Kelautan Tropis*. 5(3): 34-42. <https://doi.org/10.30649/jrkt.v3i1.37>.
- Wicaksana, S., Sofian, I. & Pranowo, W. 2015. Karakteristik Gelombang Signifikan di Selat Karimata dan Laut Jawa Berdasarkan Rerata Angin 9 Tahunan (2005-2013). *OmniAkuatika*, 11(2): 33-40. <http://dx.doi.org/10.20884/1.oa.2015.11.2.37>.