

Analisis Tinggi Gelombang dengan Kala Ulang Metode *Fisher Tippet Type-1* Pantai Pangali-ali Kabupaten Majene

Imam Rohani^{1*}, Apriansyah¹, Yusman¹, Asfianti¹

¹Prodi Teknik Sipil, Universitas Sulawesi Barat, Kabupaten Majene

Korespondensi: imam.rohani@unsulbar.ac.id

Diterima: 21 Juni 2025; Direvisi: 6 Januari 2026; Disetujui: 30 April 2026

Abstrak

Pantai Pangali-Ali, Kabupaten Majene merupakan pantai yang wilayahnya memiliki daerah pesisir yang panjang yaitu sepanjang 125 km. Sebagian besar pusat kegiatan masyarakat di Kabupaten Majene terletak di daerah pesisir. Beberapa daerah di Kabupaten Majene memiliki potensi terjadi kerusakan akibat abrasi. Salah satu yang mempengaruhi terjadinya gelombang adalah kecepatan dan arah angin. Penelitian ini bertujuan untuk 1) mengetahui distribusi kecepatan angin dan arah angin dari WRPlot Pantai Panga-liali tahun 10 tahun (2014-2023), 2) Mengetahui kecepatan angin dalam faktor tegangan angin (UA) dan 3) Menganalisis tinggi gelombang kala ulang 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun metode Fisher Tippet Type-1 Pantai Pangali-Ali Majene. Hasil analisis yang dilakukakan, maka diperoleh arah Tenggara berdasarkan data angin selama 10 tahun (2014-2023) frekuensi distribusi sebesar 28%. Nilai Faktor Tegangan Angin (UA) diperoleh nilai maksimum pada tahun 2014 arah Tenggara sebesar 14,51 m/s. Untuk analisis periode ulang 2 tahun= 0,328 m, periode 5 tahun= 496 m, periode 10 tahun= 0,607 m, periode 25 tahun= 0,747 m, periode 50 tahun= 851 m, dan periode 100 tahun= 954 m.

Kata kunci: Gelombang, Angin, *fetch*, Periode Ulang, Fisher Tippet Type-1

Abstract

Pangali-Ali Beach in Majene Regency possesses an extensive 125 km coastal area, making it one of the region's most significant shorelines. The coastal zone serves as the primary hub for community activities throughout Majene. Certain areas within the regency are particularly susceptible to abrasion damage, where wind speed and direction play a pivotal role in wave formation dynamics. This study aims to: (1) examine the wind speed and direction distribution using 10-year WRPlot data (2014-2023) from Pangali-Ali Beach, (2) determine wind speed characteristics through wind stress factor (UA) analysis, and (3) calculate wave heights for 2-, 5-, 10-, 25-, 50-, and 100-year return periods employing the Fisher-Tippett Type-1 method. Analysis results indicate the southeast wind direction predominates, representing 28% frequency distribution over the decade. The maximum Wind Stress Factor (UA) value reached 14.51 m/s from the southeast in 2014. Wave height analysis yielded the following return period values: 0.328 m (2-year), 0.496 m (5-year), 0.607 m (10-year), 0.747 m (25-year), 0.851 m (50-year), and 0.954 m (100-year).

Key words: wave, wind, *fetch*, period, fisher tippet type-1

PENDAHULUAN

Kabupaten Majene di Provinsi Sulawesi Barat memiliki wilayah pesisir yang berbatasan langsung dengan Laut Makassar. Wilayah pesisirnya membentang sepanjang 125 km dengan luas perairan laut mencapai sekitar 1.000 km², meliputi Kecamatan Banggae Timur hingga Malunda. Luasnya wilayah pesisir ini menyimpan potensi kelautan yang melimpah, sehingga mayoritas penduduk setempat menggantungkan hidupnya pada sektor kelautan dan bermukim di kawasan pantai. Kawasan pantai ini memiliki berbagai fungsi, antara lain sebagai daerah wisata, permukiman nelayan, kawasan pelabuhan, dan lain sebagainya (Yusman, dkk., 2019).

Pantai Pangali-ali yang terletak di Kota Majene memiliki karakteristik gelombang yang cukup besar, di mana ombak dapat mencapai daratan saat pasang tinggi. Gelombang besar ini dapat menimbulkan arus kuat yang berpotensi menyebabkan abrasi pantai. Oleh karena itu, diperlukan pembangunan struktur pelindung pantai untuk melindungi kawasan pesisir dan masyarakat sekitar (Rohani, dkk., 2021).

Menurut Rizka Fauzia, perencanaan bangunan pelindung pantai seperti pemecah gelombang (*breakwater*), tembok laut (*seawall*), dan dermaga (*jetty*) harus mempertimbangkan dan menganalisis berbagai faktor yang memengaruhi desain struktur. Terdapat dua faktor lingkungan utama yang perlu diperhitungkan, yaitu angin dan gelombang. Pemahaman tentang pola angin sangat penting karena angin merupakan pembangkit arus dan gelombang. Gelombang laut sendiri merupakan gerakan naik-turun air laut yang membentuk pola sinusoidal, dengan arah gerakan tegak lurus terhadap permukaan air (Meitayusni Nabila dkk., 2020).

Gelombang laut dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan gaya pembangkitnya, antara lain: (1) gelombang angin yang dihasilkan oleh gaya gesek angin pada permukaan laut, (2) gelombang pasang surut akibat gaya gravitasi benda langit (terutama bulan dan matahari), (3) gelombang tsunami yang dipicu oleh aktivitas seismik bawah laut atau letusan gunung berapi, serta (4) gelombang kapal yang disebabkan oleh pergerakan kapal Menurut Triatmodjo, (1999).

Gelombang angin memegang peranan krusial dalam dinamika pantai dan laut (Suska, 2016). Meskipun pengukuran langsung gelombang di lapangan memberikan data yang akurat, metode ini memerlukan biaya tinggi karena membutuhkan peralatan khusus, keahlian teknis, pengukuran jangka panjang, serta tantangan medan lapangan. Menekankan bahwa ketersediaan data angin yang memadai untuk prediksi gelombang dengan berbagai periode ulang akan menghasilkan desain yang optimal, ekonomis, dan efektif. (Purwanto, dkk., 2020).

Analisis komparatif metode Gumbel dan Weibull dalam memprediksi gelombang di perairan Donggala, dengan hasil kedua metode menunjukkan tingkat akurasi yang setara berdasarkan nilai *RMSE* (Setiawan, dkk., 2023). Penelitian serupa oleh (Faizah, dkk., 2017) membandingkan metode Weibull dengan *Fisher Tippet Type-1* untuk prediksi gelombang di Pelabuhan Donggala, di mana *Fisher Tippet Type-1* menunjukkan keunggulan dengan nilai *RMSE* 0,500 m dibandingkan Weibull (0,949 m), mengindikasikan tingkat akurasi yang lebih tinggi karena nilai *RMSE* yang lebih rendah mencerminkan kesesuaian yang lebih baik dengan data observasi. Penelitian ini menggunakan data angin sekunder dari *ECMWF* untuk memprediksi karakteristik gelombang representatif dan arahnya. Metode *Fisher Tippet Type-1* diterapkan sebagai pendekatan analitis utama dalam studi ini.

METODE PENELITIAN

Pada Analisis ini mengadopsi pendekatan kuantitatif melalui analisis statistik untuk mengolah data sekunder yang bersumber dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. Menurut Setiawan dkk. (2015), platform *ECMWF* menyediakan data meteorologi yang komprehensif dan terpercaya untuk keperluan penelitian (Setiawan, dkk., 2015). Parameter data yang digunakan meliputi: [daftar parameter yang akan dimasukkan]. Pemilihan data sekunder ini didasarkan pada pertimbangan kelengkapan data temporal, akurasi pengukuran, dan validitas metode pencatatan yang digunakan oleh lembaga tersebut. Data-data yang diperlukan antara lain, sebagai berikut:

A. Data Angin

Data angin harian diperoleh dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)* dengan periode pengamatan 10 tahun (2014-2023). Data temporal dengan resolusi per jam ini mencakup parameter kecepatan dan arah angin yang menjadi variabel kunci dalam analisis gelombang.

B. Data Fetch

Fetch didefinisikan sebagai area pembentukan gelombang dengan karakteristik angin yang relatif *konstan* (Triatmodjo, 2016). Dalam studi ini, pengukuran *fetch* dilakukan dengan membagi zona pengamatan menjadi sektor-sektor 6° hingga 42° dari titik pengamatan, mengacu pada variasi arah angin dominan di lokasi penelitian.

C. Peta Lokasi Penelitian

Penelitian ini memanfaatkan peta satelit Indonesia dalam format *AutoCAD (.dwg)* sebagai dasar perhitungan daerah pembangkitan gelombang (*fetch*). Lokasi penelitian ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian Pantai Pangali-Ali Majene

Penelitian ini diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data angin *ECMWF* serta peta digital. Tahap berikutnya meliputi pengukuran *fetch* efektif, pengolahan data angin, dan konversinya menjadi parameter gelombang. Proses dilanjutkan dengan peramalan gelombang dengan menggunakan analisis statistik yaitu metode Fisher Tippett Type-1 dan penentuan karakteristik gelombang, diakhiri dengan perhitungan gelombang untuk berbagai periode ulang melalui metode distribusi ekstrim. Penentuan peramalan gelombang yang digunakan dalam analisis dapat dilihat pada persamaan dibawah.

D. Persamaan yang digunakan

Persamaanyan digunakan dalam penilitian ini: (Faizah, dkk., 2017) .(Munk, dkk., 2020):

1. Nilai Faktor Tegangan Angin (UA)

$$U_{(10)} = U_{(Z)} \left(\frac{10}{Z}\right)^{1/7} \dots\dots\dots (1)$$

2. Koreksi Stabilitas Atmosfer.

$$U = RT \cdot U_{10} \dots\dots\dots (2)$$

3. Faktor Tegangan Angin

$$(UA)U_A = 0.71 U^{1,23} \dots\dots\dots (3)$$

4. *Fetch Efektif*

$$F_{eff} = \frac{\sum x_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} \dots\dots\dots (4)$$

5. Penentuan Kondisi *Fully Developed* atau *Non-Fully Developed*

$$\frac{gt}{U_A} = 68,8 \left(\frac{g \cdot F}{U_A^2} \right)^{2/3} \leq 7,5 \times 10^4 \dots\dots\dots (5)$$

6. Tinggi Gelombang Signifikan (H_s).

$$H_s = 0,0016 \cdot \frac{U_A^2}{g} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

7. Periode Gelombang Signifikan (T_s)

$$T_s = 0,2857 \cdot \frac{U_A}{g} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} \dots\dots\dots (7)$$

8. Peluang Kejadian Metode *Fisher-Tippet Type I*

$$P(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m-0,44}{N_T+0,12} \dots\dots\dots (8)$$

9. Variabel Reduksi *Fisher-Tippet Type I*

$$Y_m = -\ln[-\ln(P)] \dots\dots\dots (9)$$

10. Tinggi Gelombang Periode Ulang

$$H_{sr} = a + bY_r \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

Uz adalah kecepatan angin pada ketinggian pengukuran, sedangkan U10 adalah kecepatan angin yang sudah dikoreksi pada ketinggian 10 meter. Simbol z menunjukkan ketinggian pengukuran angin, U adalah kecepatan angin setelah koreksi stabilitas atmosfer, RT adalah faktor koreksi stabilitas, dan UA adalah faktor tegangan angin yang digunakan untuk melihat pengaruh angin terhadap pembentukan gelombang.

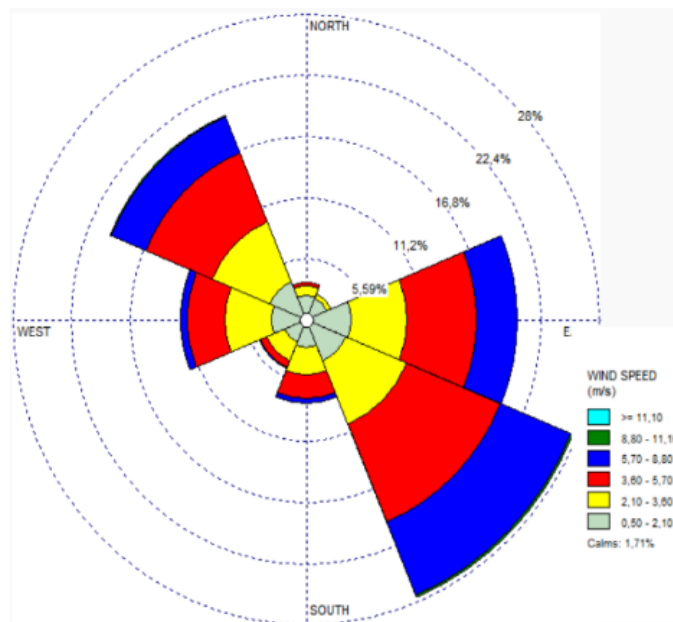
Dalam perhitungan *fetch*, F atau Feff berarti *fetch* efektif, yaitu panjang lintasan angin di atas permukaan laut. Simbol Xi menunjukkan panjang *fetch* pada setiap garis pengukuran, α adalah sudut penyimpangan dari arah angin dominan, dan $\cos\alpha$ digunakan untuk menyesuaikan pengaruh sudut tersebut. Pada perhitungan gelombang, g adalah percepatan gravitasi sebesar 9,81m/s², Hs adalah tinggi gelombang signifikan, dan Ts adalah periode gelombang signifikan. Untuk analisis periode ulang, P menunjukkan peluang kejadian, m adalah nomor urut data, N adalah jumlah data, Ym dan Yr adalah variabel reduksi pada metode *Fisher-Tippet Type I*, sedangkan Hsr adalah

tinggi gelombang signifikan pada periode ulang tertentu. Simbol a dan b merupakan konstanta dan koefisien regresi, r menunjukkan periode ulang, dan \ln berarti logaritma natural.

HASIL DAN PEMBAHASAN

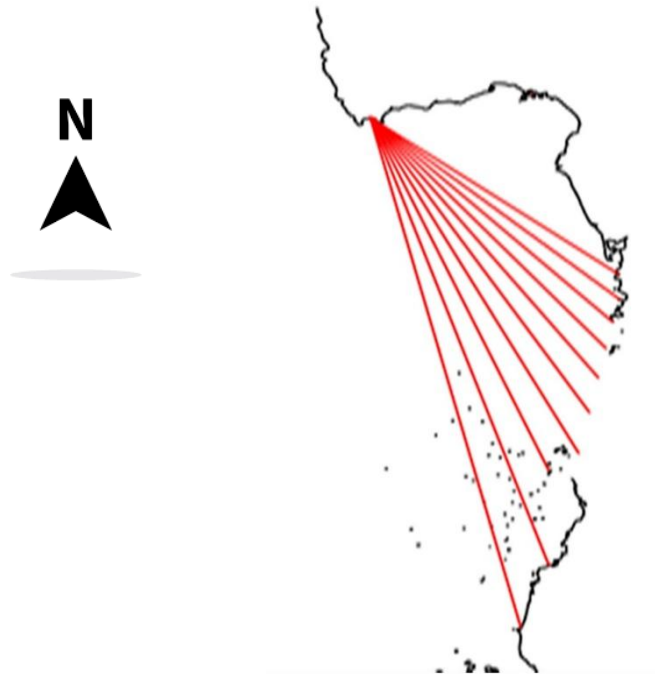
A. Karakteristik Angin

Angin merupakan faktor utama dalam pembentukan gelombang laut. Arah dan kecepatan angin menentukan seberapa besar energi yang ditransfer ke permukaan laut. Oleh karena itu, analisis angin menjadi langkah awal yang penting untuk memahami karakter gelombang di Pantai Pangali-Ali (Satriadi, 2017; Aisjah dkk., 2015). Hasil pengolahan data angin periode 2014–2023 menggunakan WRPlot ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 2. *Windrose* (Mawar Angin)

Berdasarkan Gambar 2, angin di Pantai Pangali-Ali didominasi oleh arah Tenggara dengan frekuensi kejadian sebesar 28%. Kecepatan angin maksimum pada arah ini berada pada kisaran 5,70–8,80 m/s. Kondisi ini menunjukkan bahwa gelombang di lokasi penelitian lebih banyak dipengaruhi oleh angin yang datang dari sektor Tenggara (Purwono & Sismiani, 2018). Untuk melihat hubungan antara arah angin dominan dan wilayah pembentukan gelombang, arah *fetch* di lokasi penelitian ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Fetch* Pantai Pangli-Ali Majene

Gambar 3 menunjukkan arah lintasan angin dari laut menuju lokasi penelitian. Karena angin dominan berasal dari Tenggara, maka sektor ini menjadi arah utama dalam perhitungan *fetch* dan peramalan gelombang. Dengan kata lain, karakter gelombang di Pantai Pangli-Ali tidak hanya dipengaruhi oleh besar kecilnya kecepatan angin, tetapi juga oleh panjang lintasan angin sebelum mencapai pantai.

Setelah arah angin dominan diketahui, data kecepatan angin kemudian dikoreksi untuk memperoleh nilai faktor tegangan angin (UA). Hasil perhitungan nilai (UA) disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan bahwa nilai UA meningkat seiring bertambahnya kecepatan angin terkoreksi. Hal ini menunjukkan bahwa angin dengan kecepatan lebih tinggi memiliki kemampuan lebih besar dalam membangkitkan gelombang. Hubungan ini sesuai dengan prinsip peramalan gelombang, yaitu semakin besar energi angin, maka semakin besar pula potensi tinggi gelombang yang (Altunkaynak, 2012; Satriadi, 2017)

B. *Fetch* Efektif

Fetch efektif adalah panjang lintasan angin di atas permukaan laut yang memungkinkan gelombang terbentuk. Semakin panjang *fetch*, semakin besar energi angin yang dapat berkembang menjadi gelombang (Lamont-Smith dkk., 2008). Dalam

penelitian ini, *fetch* dihitung berdasarkan arah angin dominan, yaitu Tenggara. Hasil perhitungan *fetch* efektif ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Nilai UA

Tahun	Wind Speed	U10 (Kecepatan terkoreksi)	U(Stabilitas)	UA
2014	0.99	0.99	1.084	0,784
2014	1.95	1.95	2.144	1.814
2014	1.94	1.94	2.132	1.082
2014	1.23	1.23	1.357	1.034
2014	2.04	2.044	2.244	1.919
2014	1.04	1.044	1.148	0.840
2014	3.05	3.052	3.357	3.840
2014	3.58	3.586	3.945	3.402
2014	4.17	4.171	4.588	4.625
2014	4.64	4.645	5.109	5.279
2014	5.55	5.555	6.110	6.578
2014	6.03	6.03	6.632	7.275
2014	5.45	5.450	5.995	6.426
2014	5.79	5.79	6.366	6.918
2014	6,86	6,86	7,544	8,525
2014	6.92	6.92	7.612	6.620
2014	7.19	7.19	7.909	9.035
2014	7.25	7.25	7.977	9.132
2014	10.57	10.57	11.627	14.514
2014	10.41	10.41	11.450	14.243

Berdasarkan Tabel 2, nilai *fetch* efektif diperoleh sebesar 93.167,56 m atau sekitar 93,17 km. Nilai ini menunjukkan bahwa lintasan angin di lokasi penelitian masih relatif terbatas. Akibatnya, gelombang yang terbentuk belum mencapai kondisi berkembang penuh atau *fully developed sea*.

Kondisi tersebut sesuai dengan hasil perhitungan gelombang pada Tabel 3 yang menunjukkan bahwa seluruh data termasuk dalam kategori *Non Fully Developed*. Artinya, gelombang di Pantai Pangali-Ali masih sangat dipengaruhi oleh angin lokal dan keterbatasan panjang *fetch*.

C. Peramalan Tinggi dan Periode Gelombang

Peramalan gelombang dilakukan untuk mengetahui tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode gelombang (T_s). Parameter yang digunakan adalah nilai faktor tegangan angin (UA) dan *fetch* efektif. Metode ini umum digunakan ketika data pengamatan gelombang langsung masih terbatas (Aisjah dkk., 2015; Satriadi, 2017). Hasil peramalan tinggi dan periode gelombang ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 2. Fetch Efektif

a	Cos a	Tenggara	
		Xi	Xi Cos a
42	0.7431	361000	268275.28
36	0.8090	212000	171511.60
30	0.8660	158000	136832.01
24	0.9135	140000	127896.36
18	0.9510	136000	129334.68
12	0.9781	122000	119334
6	0.9945	110000	109397.40
0	1	101000	101000
6	0.9945	86500	86026.14
12	0.9781	2700	2640.99
18	0.9510	1660	1578.75
24	0.9135	1650	1507.35
30	0.8660	1550	1342.33
36	0.8090	1430	1156.89
42	0.7431	1260	936.36
Total	13.5109		1258779.21
Fetch Efektif	93.16756		

Tabel 3. Peramalan Tinggi Gelombang (Hs) dan Periode Gelombang (Ts)

Arah	UA	Feff (m)	Cek fully/Non Fully Developed	Rekapitulasi Perhitungan		
				Tipe	Hs	Ts
SE	0,784	93.167	8.956.038.693	NonFully	0,003868	0,26066
SE	1.814	93.167	2928,386801	NonFully	0,008945	0,344704
SE	1.082	93.167	2955,271035	NonFully	0,00884	0,343918
SE	1.034	93.167	6198,609485	NonFully	0,005097	0,285779
SE	0.715	93.167	10140,99043	NonFully	0,003524	0,252688
SE	0.629	93.167	12020,08798	NonFully	0,003102	0,242174
SE	0.603	93.167	12730,52248	NonFully	0,002971	0,238722
SE	0.583	93.167	13301,13397	NonFully	0,002875	0,236119
SE	0.806	93.167	8645,361739	NonFully	0,003972	0,262971
SE	0.511	93.167	15839,80669	NonFully	0,002522	0,22603
SE	0.127	93.167	101677,9747	NonFully	0,003146	0,105165
SE	1.143	93.167	5422,198395	NonFully	0,005636	0,295502
SE	1.098	93.167	5719,263943	NonFully	0,005415	0,291587

Berdasarkan Tabel 3, nilai Hs dan Ts cenderung meningkat ketika nilai UA bertambah. Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan angin berperan langsung terhadap

pembentukan gelombang. Namun, karena *fetch* efektif terbatas, gelombang yang terbentuk tetap berada pada kondisi *Non Fully Developed*.

Selanjutnya, nilai hasil perhitungan dinormalisasi menggunakan pendekatan (David, 2022), yaitu dengan faktor pembagi 3 atau sekitar 33,3%. Hasil rekapitulasi gelombang signifikan tahunan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Peramalan Gelombang Signifikan (Hs) dan (Ts)

No	Tahun	Tenggara	
		Hs	Ts
1	2014	0,432	5,543
2	2015	0,373	5,201
3	2016	0,226	4,310
4	2017	0,388	5,191
5	2018	0,339	5,125
6	2019	0,420	5,432
7	2020	0,321	4,745
8	2021	0,353	5,089
9	2022	0,337	4,893
10	2023	0,349	5,299

Berdasarkan Tabel 4, nilai Hs tahunan berkisar antara 0,226–0,432 m, sedangkan nilai Ts berkisar antara 4,310–5,543 detik. Nilai Hs tertinggi terjadi pada tahun 2014 sebesar 0,432 m, sedangkan nilai terendah terjadi pada tahun 2016 sebesar 0,226 m.

Secara umum, gelombang di Pantai Pangali-Ali tergolong rendah hingga sedang. Kondisi ini wajar karena wilayah kajian memiliki *fetch* yang terbatas, sehingga energi angin tidak sepenuhnya berkembang menjadi gelombang besar. Dengan demikian, karakter gelombang di lokasi penelitian lebih dikontrol oleh angin lokal dari arah Tenggara.

D. Analisis Periode Ulang Gelombang

Analisis periode ulang dilakukan untuk memperkirakan tinggi gelombang ekstrem pada kala ulang tertentu. Analisis ini penting sebagai dasar awal dalam perencanaan bangunan pantai dan pengelolaan kawasan pesisir (Agarwal dkk., 2013).

Pada penelitian ini, analisis periode ulang dilakukan menggunakan metode *Fisher-Tippet Type I* berdasarkan data tinggi gelombang signifikan tahunan. Hasil perhitungan awal ditampilkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Tinggi Gelombang dengan Periode Ulang Tertentu Arah Tenggara

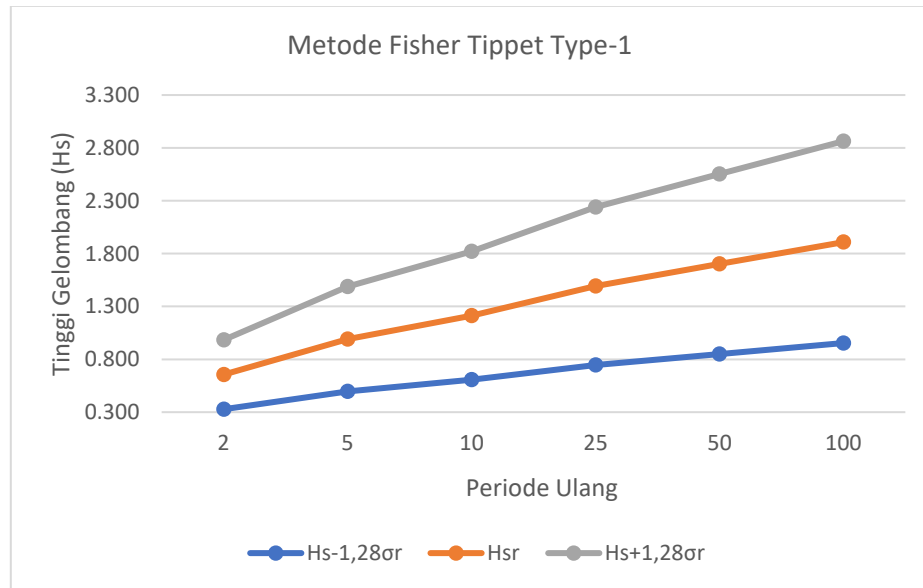
No	Tahun ke	Hsm (m)	P	Ym	Hsm.Ym	Ym ²	(Hsm-Hr) ²	Hsm	Hsm-Hsm
1	1	0,432	0,945	2,866	1,237	8,214	0,006	0,698	-0,266
2	6	0,420	0,451	0,227	0,095	0,051	0,004	0,307	0,113
3	4	0,388	0,648	0,836	0,324	0,699	0,016	0,397	-0,010
4	2	0,373	0,846	1,787	0,667	3,194	0,001	0,538	-0,165
5	8	0,353	0,253	-0,318	-0,112	0,101	0,0004	0,226	0,126
6	10	0,349	0,055	-1,063	-0,371	1,129	0,00000	0,116	0,232
7	5	0,339	0,549	0,513	0,174	0,263	0,00021	0,349	-0,010
8	9	0,337	0,154	-0,626	-0,211	0,392	0,00028	0,181	0,156
9	7	0,321	0,352	-0,044	-0,014	0,002	0,001	0,267	0,054
10	3	0,226	0,747	1,232	0,278	1,518	0,016	0,456	-0,230
	Σ	3,536	5,000	16,100	5,908	15,564	0,030		
	Rata-rata	0,354		0,541		1,556			

Berdasarkan Tabel 5, diperoleh rata-rata tinggi gelombang signifikan sebesar 0,354 m. Nilai ini kemudian digunakan untuk menghitung tinggi gelombang rencana pada beberapa kala ulang. Hasil analisis periode ulang ditampilkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Periode Ulang Tertentu Arah Tenggara

Periode Ulang	yr (tahun)	Hsr (m)	σ_r	σ	Hs-1,28 σ	Hs+1,28 σ
2	0,367	0,328	0,116	0,00003	0,328	0,328
5	1,500	0,496	0,475	0,0001	0,495	0,496
10	2,250	0,607	0,713	0,0002	0,606	0,607
25	3,199	0,747	1,014	0,0003	0,747	0,747
50	3,902	0,851	1,237	0,0004	0,851	0,852
100	4,600	0,954	1,458	0,0004	0,954	0,955

Tabel 6 menunjukkan bahwa tinggi gelombang rencana meningkat seiring bertambahnya kala ulang. Pada periode ulang 2 tahun, tinggi gelombang sebesar 0,328 m, sedangkan pada periode ulang 100 tahun meningkat menjadi 0,954 m. Pola ini menunjukkan bahwa semakin panjang kala ulang, semakin besar potensi gelombang ekstrem yang dapat terjadi. Hubungan antara kala ulang dan tinggi gelombang rencana ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Hasil Tinggi Gelombang dengan Kala Ulang

Berdasarkan Gambar 4, tinggi gelombang meningkat secara bertahap terhadap penambahan kala ulang. Namun, peningkatannya masih tergolong moderat. Hal ini menunjukkan bahwa potensi gelombang ekstrem di Pantai Pangali-Ali tetap dipengaruhi oleh keterbatasan *fetch* dan dominasi angin Tenggara.

Jika dibandingkan dengan metode Weibull, hasil *Fisher-Tippet Type I* menunjukkan nilai yang lebih rendah. Perbedaan ini dapat terjadi karena setiap metode statistik memiliki pendekatan yang berbeda dalam membaca peluang kejadian ekstrem (Vanem, 2022). Oleh sebab itu, hasil periode ulang perlu digunakan secara hati-hati, terutama karena data yang dianalisis hanya mencakup periode 10 tahun.

Secara keseluruhan, Pantai Pangali-Ali dipengaruhi oleh angin dominan dari arah Tenggara dengan *fetch* efektif sekitar 93,17 km. Kondisi ini menghasilkan gelombang *Non Fully Developed* dengan tinggi gelombang signifikan tahunan yang relatif rendah hingga sedang. Namun, analisis periode ulang tetap penting untuk memberikan gambaran awal mengenai potensi gelombang ekstrem di masa mendatang.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis distribusi gabungan kecepatan dan arah angin selama periode 2014-2023, diperoleh pola angin dominan dari arah tenggara dengan kecepatan 5,7-8,8 m/s dan frekuensi kejadian 28%. Konversi data angin menggunakan *Spektrum Bretschneider* untuk kondisi *non-fully developed sea* dan *fully developed sea* menghasilkan nilai faktor tegangan angin (UA) maksimum sebesar 14,51 m/s pada Januari 2014 dengan arah Tenggara. Selanjutnya, penerapan metode *Fisher-Tippett*

Type-I untuk analisis ekstrem menghasilkan estimasi tinggi gelombang signifikan pada berbagai periode ulang di sektor tenggara, yaitu: 0,328 m (2-tahunan), 0,496 m (5-tahunan), 0,607 m (10-tahunan), 0,747 m (25-tahunan), 0,851 m (50-tahunan), dan 0,954 m (100-tahunan).

SARAN

Untuk pengembangan studi selanjutnya, disarankan melakukan eksplorasi metode alternatif guna memperkaya analisis, seperti penggunaan data angin dari sumber berbeda selain *ECMWF* serta periode pengamatan yang lebih panjang (>10 tahun) guna meningkatkan validitas dan kelengkapan database. Hal ini akan memberikan landasan lebih kuat dalam perencanaan pembangunan struktur pengaman pantai. Selain itu, penelitian mendatang dapat menguji dan mengembangkan pendekatan metodologis baru sebagai pembanding guna memperkuat hasil analisis dan memberikan perspektif yang lebih komprehensif.

REFERENSI

- Agarwal, A., Venugopal, V., & Harrison, G. P. (2013). The assessment of extreme wave analysis methods applied to potential marine energy sites using numerical model data. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 244–257
- Aisjah, A. S., Arifin, A., & Kurniawan, A. (2015). Sverdrup Munk Bretschneider modification for wave forecasting. *British Journal of Applied Science & Technology*.
- Altunkaynak, A. (2012). Estimation of significant wave height in shallow lakes using expert system techniques. *Expert Systems with Applications*, 39(3), 2549–2559.
- David. (2022). Analisis parameter gelombang signifikan berdasarkan data angin. *Jurnal Kelautan Dan Pesisir*.
- Komperatif, S., Weibull, M., Metode, D. A. N., Menghitung, D., Di, G., & Donggala, P. (2017). *Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako (Untad) Palu Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tadulako (Untad) Palu. 27–28.*
- Meitayusni Nabila, N., Sasmito, B., & Sukmono, A. (2020). Studi Karakteristik Gelombang Perairan Laut Jawa Menggunakan Satelit. *Jurnal Geodesi Undip Januari*, 9(1), 67–76.
- Munk, S., Smb, B., & Perairan, D. I. (2020). *Pengolahan Gelombang Permukaan Laut Menggunakan Metode.*
- Purwanto, P., Trisanto, R., Handoyo, G., Trenggono, M., & Suryoputro, A. A. D. (2020). Analisis Peramalan dan Periode Ulang Gelombang di Perairan Bagian Timur Pulau Lirang, Maluku Barat Daya. *Indonesian Journal of Oceanography*, 2(1), 80–89.
- Purwono, N. ., & Sismiani, A. (2018). Peramalan Kejadian Gelombang Pantai Watunohu Dengan Pendekatan Empiris Analisa Data Angin. *Teodolita (Media Komunikasi Ilmiah Di Bidang Teknik)*, 19(2), 2–10.

- Rohani, I., Paroka, D., Thaha, M. A., & Hatta, M. P. (2021). Pemodelan Fisik Pengaruh Tinggi Pasang Surut Terhadap Kecepatan Aliran Di Muara Sungai. *Konferensi Nasional Teknik Sipil 15, Triyanti 2005*, 20–21.
- Satriadi, A. (2017). Peramalan Tinggi Dan Periode Gelombang Signifikan Di Perairan Dangkal (Studi Kasus Perairan Semarang). *Buletin Oseanografi Marina*, 6(1), 17.
- Setiyawan, Rusdin, A., & Adnyani, N. (2015). Analisis Peramalan Ketinggian Gelombang Laut Dengan Periode Ulang Menggunakan Metode Distribusi Weibull (Studi Kasus Pantai Lembasada Kabupaten Donggala). *Infrastruktur*, 5(1), 38–50.
- Sipil, T., Tadulako, U., Tadulako, U., & Author, C. (2023). *Composite journal*. 3(2), 55–62.
- Suska, U. (2016). BAB II Dasar Teori. *UIN Suska*, 5(1), 1689–1699.
- Vanem, E. (2022). A truncated, translated Weibull distribution for shallow-water significant wave height. *Coastal Engineering*, 171, 104042.
- Yusman, Y., Palippui, H., & Apriansah, A. (2019). Pemetaan Kualitas Air Tanah Wilayah Pesisir Kabupaten Majene. *Riset Sains Dan Teknologi Kelautan*, 2(1), 128–132.