PHYDAGOGIC : Jurnal Fisika dan Pembelajarannya **Volume 8, Issue 2, April 2026**
ISSN 2654-2641 (online) DOI: 10.31605/phy.v8i2.6488
http://ojs.unsulbar.ac.id/index.php/phy

ANALISIS STATISTIK DAN INTERPRETASI FISIKA DISTRIBUSI WEIBULL PADA TINGGI GELOMBANG DI PESISIR PAPUA

Ishak S. Beno[1*], Zakaria V. Kareth[2], Alvian M. Sroyer[3], Westy B. Kawuwung[4]
[1,3,4]Program Studi Matematika, Universitas Cenderawasih, Indonesia
[2]Program Studi Geofisika, Universitas Cenderawasih, Indonesia
Email: i.s.beno@fmipa.uncen.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakteristik statistik dan interpretasi fisika tinggi gelombang laut di wilayah pesisir Papua menggunakan distribusi Weibull. Data yang digunakan berupa tinggi gelombang harian tahun 2023 yang diperoleh dari stasiun pemantauan gelombang. Parameter distribusi diestimasi menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE), sedangkan kesesuaian model dievaluasi melalui uji Kolmogorov–Smirnov, histogram, Probability Density Function (PDF), Cumulative Distribution Function (CDF), dan QQ-plot. Hasil analisis menunjukkan bahwa tinggi gelombang berkisar antara 1,01 hingga 2,96 meter dengan rata-rata sebesar 2,05 meter. Estimasi parameter Weibull menghasilkan nilai parameter bentuk (k) sebesar 4,07 dan parameter skala (λ) sebesar 2,27. Nilai parameter bentuk yang lebih besar dari satu menunjukkan bahwa distribusi gelombang cenderung stabil dengan variasi yang relatif terkonsentrasi. Secara fisika, hal ini mengindikasikan kondisi transfer energi gelombang yang cukup konsisten dari angin ke permukaan laut. Model Weibull mampu merepresentasikan pola umum distribusi data, meskipun terdapat deviasi pada bagian ekor distribusi yang mengindikasikan kemungkinan kejadian gelombang ekstrem. Hasil penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif tidak hanya secara statistik, tetapi juga dalam konteks fisika gelombang laut, sehingga dapat mendukung analisis risiko serta perencanaan infrastruktur pesisir di wilayah Papua.

Kata Kunci: Tinggi Gelombang Laut, Distribusi Weibull, Maximum Likelihood Estimation, Energi Gelombang, Oseanografi Fisik, Pesisir Papua.

STATISTICAL ANALYSIS AND PHYSICAL INTERPRETATION OF THE WEIBULL DISTRIBUTION FOR WAVE HEIGHT IN THE COASTAL WATERS OF PAPUA

Abstract

This study aims to analyze the statistical characteristics and physical interpretation of ocean wave heights in the coastal region of Papua using the Weibull distribution. The dataset consists of daily wave height observations in 2023 obtained from a wave monitoring station. Parameter estimation was conducted using the Maximum Likelihood Estimation (MLE) method, while model performance was evaluated using the Kolmogorov–Smirnov test, histogram, Probability Density Function (PDF), Cumulative Distribution Function (CDF), and QQ-plot. The results show that wave heights range from 1.01 to 2.96 meters with an average value of 2.05 meters. The estimated Weibull parameters are a shape parameter (k) of 4.07 and a scale parameter (λ) of 2.27. A shape parameter greater than one indicates a relatively stable wave distribution with concentrated variability. From a physical perspective, this reflects a consistent energy transfer from wind forcing to the ocean surface. Although the Weibull model adequately represents the general distribution pattern, deviations in the tail suggest the presence of extreme wave events. These findings provide a more comprehensive understanding of wave

OPEN ACCESS CC BY NC

characteristics, both statistically and physically, and can be used to support coastal risk assessment and infrastructure planning in Papua.

Keyworrd: *Wave Height, Weibull Distribution, Maximum Likelihood Estimation, Wave Energy, Physical Oceanography, Papua Coastal Waters.*

PENDAHULUAN

Wilayah pesisir merupakan zona dinamis yang dipengaruhi oleh interaksi kompleks antara atmosfer, laut, dan daratan. Salah satu parameter oseanografi yang memiliki peran penting dalam dinamika wilayah pesisir adalah tinggi gelombang laut. Tinggi gelombang tidak hanya berpengaruh terhadap keselamatan pelayaran, tetapi juga berperan dalam proses fisika seperti transportasi sedimen, erosi dan akresi pantai, serta distribusi energi di permukaan laut. Secara fisika, gelombang laut merupakan hasil transfer energi dari angin ke permukaan laut, di mana besarnya energi gelombang berbanding lurus dengan kuadrat tinggi gelombang. Oleh karena itu, analisis terhadap karakteristik tinggi gelombang menjadi penting baik dalam konteks ilmiah maupun aplikasi praktis.

Variabilitas tinggi gelombang laut dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain kecepatan dan arah angin, durasi tiupan angin, serta panjang lintasan angin (fetch). Studi sebelumnya menunjukkan bahwa wilayah perairan Indonesia memiliki pola gelombang yang dipengaruhi oleh sistem monsun, yang menyebabkan variasi musiman yang signifikan dalam tinggi gelombang [1-3]. Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa dinamika gelombang laut berperan langsung dalam perubahan morfologi pesisir akibat interaksi antara energi gelombang dan material sedimen [4,5]. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik gelombang laut tidak hanya penting untuk dipahami secara statistik, tetapi juga dalam kerangka fisika oseanografi.

Dalam kajian statistik oseanografi, tinggi gelombang sering dimodelkan sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi probabilitas tertentu. Salah satu distribusi yang banyak digunakan adalah distribusi Weibull, yang dikenal fleksibel dalam memodelkan data lingkungan dan fenomena alam. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa distribusi Weibull mampu menggambarkan distribusi tinggi gelombang di berbagai wilayah laut, termasuk Samudra Hindia dan perairan Indonesia [6-9]. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut lebih berfokus pada wilayah perairan tertentu seperti Jawa atau Bali, serta belum secara mendalam mengaitkan hasil statistik dengan interpretasi fisika gelombang laut.

Wilayah pesisir Papua memiliki karakteristik oseanografi yang unik karena berbatasan langsung dengan Samudra Pasifik, yang merupakan salah satu sumber energi gelombang terbesar di dunia [10]. Kondisi ini menyebabkan wilayah tersebut memiliki potensi dinamika gelombang yang berbeda dibandingkan perairan Indonesia lainnya. Meskipun demikian, kajian mengenai distribusi statistik tinggi gelombang di wilayah pesisir Papua masih relatif terbatas, terutama yang mengintegrasikan analisis statistik dengan interpretasi fisika gelombang. Keterbatasan ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian yang perlu diisi untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik gelombang di wilayah tersebut.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi probabilitas tinggi gelombang di wilayah pesisir Papua menggunakan distribusi Weibull, mengestimasi parameter distribusi dengan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE), serta mengevaluasi kesesuaian model menggunakan uji statistik. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk menginterpretasikan parameter distribusi Weibull dalam konteks fisika gelombang laut, khususnya yang berkaitan dengan transfer energi dan dinamika atmosfer–laut. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan tidak hanya memberikan kontribusi dalam bidang statistik oseanografi, tetapi juga dalam pemahaman fisika gelombang laut yang relevan untuk analisis risiko dan perencanaan wilayah pesisir.

METODE PENELITIAN

2.1 Jenis dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa tinggi gelombang signifikan (*significant wave height*) dengan resolusi harian selama periode Januari hingga Desember 2023. Data harian kemudian diagregasi menjadi data bulanan untuk analisis variasi musiman. Data diperoleh dari stasiun pemantauan gelombang laut yang berada di wilayah pesisir Papua (koordinat lokasi disesuaikan dengan sumber data yang digunakan, misalnya dari BMKG atau data reanalisis seperti ERA5).

Data tinggi gelombang signifikan dipilih karena parameter ini secara fisika merepresentasikan rata-rata sepertiga gelombang tertinggi yang terjadi, sehingga sering digunakan dalam analisis oseanografi dan rekayasa pantai. Secara fisika, parameter ini berkaitan langsung dengan energi gelombang laut yang dinyatakan sebanding dengan kuadrat tinggi gelombang.

2.2 Pra-pengolahan Data

Sebelum dilakukan analisis, data melalui beberapa tahap pra-pengolahan:

1. Pemeriksaan kelengkapan data untuk mengidentifikasi nilai hilang (*missing values*).
2. Pembersihan data dengan menghapus atau menginterpolasi data yang tidak valid.
3. Uji outlier menggunakan metode boxplot untuk mengidentifikasi nilai ekstrem.
4. Pengelompokan data dalam bentuk bulanan untuk analisis variasi musiman.

Tahapan ini bertujuan untuk memastikan bahwa data yang digunakan dalam analisis memiliki kualitas yang baik dan representatif.

2.3 Model Distribusi Weibull

Distribusi Weibull digunakan untuk memodelkan distribusi probabilitas tinggi gelombang. Distribusi ini memiliki dua parameter utama, yaitu parameter bentuk (*shape parameter*, k) dan parameter skala (*scale parameter*, λ).

Fungsi kepadatan probabilitas (PDF) distribusi Weibull dinyatakan sebagai:

$$f(x) = \frac{k}{\lambda}\left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(\frac{x}{\lambda})^k},\ x \geq 0$$

Sedangkan fungsi distribusi kumulatif (CDF) dinyatakan sebagai:

$$F(x) = 1 - e^{-(\frac{x}{\lambda})^k}$$

Dalam konteks fisika, parameter skala (λ) dapat diinterpretasikan sebagai ukuran karakteristik tinggi gelombang yang berkaitan dengan energi dominan sistem, sedangkan parameter bentuk (k) menggambarkan tingkat variasi dan kestabilan distribusi gelombang.

2.4 Estimasi Parameter (Maximum Likelihood Estimation)

Parameter distribusi Weibull diestimasi menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE). Misalkan terdapat data pengamatan $x_1, x_2, \dots, x_n$ maka fungsi likelihood dinyatakan sebagai:

$$L(k, \lambda) = \prod_{i=1}^{n} \frac{k}{\lambda}\left(\frac{x_i}{\lambda}\right)^{k-1} e^{-(\frac{x_i}{\lambda})^k}$$

Untuk mempermudah perhitungan, digunakan fungsi log-likelihood:

$$\ln L(k, \lambda) = n \ln k - n \ln \lambda + (k - 1) \sum_{i=1}^{n} ln\, x_i - \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{x_i}{\lambda}\right)^k$$

Nilai parameter k dan λ diperoleh dengan memaksimalkan fungsi log-likelihood menggunakan metode numerik. Proses ini dilakukan dengan bantuan perangkat lunak komputasi seperti MATLAB atau Python.

2.5 Analisis Distribusi

Analisis distribusi dilakukan melalui:

- Histogram untuk melihat pola sebaran data
- Probability Density Function (PDF) untuk melihat kepadatan probabilitas
- Cumulative Distribution Function (CDF) untuk melihat probabilitas kumulatif
- Quantile-Quantile Plot (QQ-plot) untuk membandingkan distribusi empiris dan teoritis

Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi sejauh mana distribusi Weibull mampu merepresentasikan data tinggi gelombang.

2.6 Uji Kesesuaian Model

Kesesuaian model diuji menggunakan uji Kolmogorov–Smirnov (K–S). Statistik uji dinyatakan sebagai:

$$D = max|F_n(x) - F(x)|$$

dengan

- $F_n(x)$ = distribusi kumulatif empiris
- $F(x)$ = distribusi kumulatif teoritis Weibull

Hipotesis yang digunakan:

- H_0 : Data mengikuti distribusi Weibull
- H_1 : Data tidak mengikuti distribusi Weibull

Keputusan diambil berdasarkan nilai *p-value* dengan tingkat signifikansi $\alpha = 0{,}05$. Jika $p - value > \alpha$, maka H_0 tidak ditolak.

2.7 Analisis Fisika Gelombang

Untuk menghubungkan hasil statistik dengan fenomena fisika, dilakukan interpretasi terhadap parameter distribusi Weibull dalam konteks energi gelombang laut. Energi gelombang per satuan luas secara umum dinyatakan sebagai:

$$E = \frac{1}{8}\rho g H^2$$

di mana:

- E = energi gelombang
- ρ = densitas air laut
- g = percepatan gravitasi
- H = tinggi gelombang

Dengan demikian, distribusi tinggi gelombang yang diperoleh secara statistik dapat digunakan untuk menggambarkan distribusi energi gelombang di wilayah penelitian. Interpretasi ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai dinamika gelombang laut, khususnya dalam kaitannya dengan transfer energi dari angin ke permukaan laut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Deskripsi Statistik Tinggi Gelombang

Berdasarkan data tinggi gelombang tahun 2023 di wilayah pesisir Papua, diperoleh rentang nilai antara 1,01 meter hingga 2,96 meter dengan nilai rata-rata sebesar 2,05 meter. Variasi ini menunjukkan bahwa kondisi gelombang di wilayah penelitian berada pada kategori sedang dengan fluktuasi musiman yang cukup jelas.



Gambar 1. Rata-rata tinggi gelombang bulanan di wilayah pesisir Papua tahun 2023

Gambar 1 menunjukkan rata-rata tinggi gelombang bulanan. Terlihat bahwa nilai maksimum terjadi pada bulan November, sedangkan nilai minimum terjadi pada bulan Agustus. Pola ini mengindikasikan adanya pengaruh kuat dari dinamika atmosfer, khususnya sistem monsun dan pola angin regional.

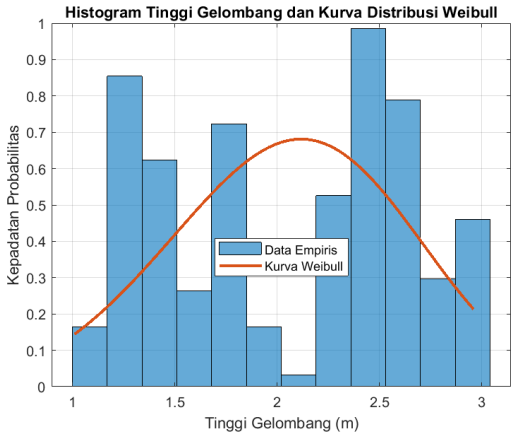
Secara fisika, variasi ini dapat dijelaskan melalui mekanisme transfer energi dari angin ke permukaan laut. Pada periode tertentu, peningkatan kecepatan angin dan durasi tiupan (fetch dan duration) menyebabkan peningkatan energi gelombang, yang berimplikasi langsung pada peningkatan tinggi gelombang. Sebaliknya, pada periode dengan angin yang lebih lemah, energi yang ditransfer menjadi lebih kecil sehingga tinggi gelombang menurun.

3.2 Pemodelan Distribusi Weibull

Distribusi Weibull digunakan untuk memodelkan distribusi probabilitas tinggi gelombang. Hasil estimasi parameter menggunakan metode Maximum Likelihood Estimation (MLE) diperoleh:

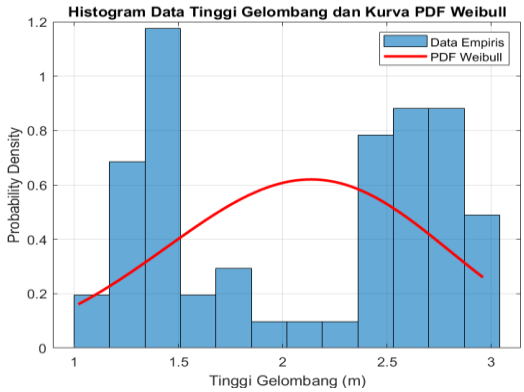
- Parameter bentuk (k) = 4,07
- Parameter skala (λ) = 2,27

Berdasarkan parameter distribusi yang diperoleh, karakteristik statistik gelombang dapat dihubungkan dengan interpretasi fisika melalui hubungan energi gelombang.



Gambar 2. Histogram data tinggi gelombang dan kurva distribusi Weibull.

Gambar 2 menunjukkan histogram data tinggi gelombang yang ditumpangkan dengan kurva distribusi Weibull. Terlihat bahwa kurva Weibull mampu mengikuti pola umum distribusi data empiris, khususnya pada bagian tengah distribusi.



Gambar 3. Histogram data tinggi gelombang dan kurva fungsi kepadatan probabilitas (PDF) distribusi Weibull.

Gambar 3 menampilkan fungsi kepadatan probabilitas (PDF) Weibull. Kurva menunjukkan bahwa probabilitas tertinggi berada pada kisaran 2,0–2,5 meter, yang sesuai dengan nilai rata-rata data.

Interpretasi Statistik:

Nilai k > 1 menunjukkan bahwa distribusi Weibull bersifat unimodal dengan sebaran data yang lebih terkonsentrasi di sekitar nilai tengah. Hal ini menunjukkan bahwa variabilitas tinggi gelombang berada pada tingkat moderat, sehingga data tidak menunjukkan penyebaran yang terlalu luas.

Interpretasi Fisika:

Nilai k = 4,07 mengindikasikan bahwa sistem gelombang di wilayah penelitian cenderung stabil dengan fluktuasi energi yang relatif terkendali. Parameter skala λ = 2,27 merepresentasikan tinggi gelombang karakteristik yang berkaitan dengan kondisi energi dominan di perairan tersebut.

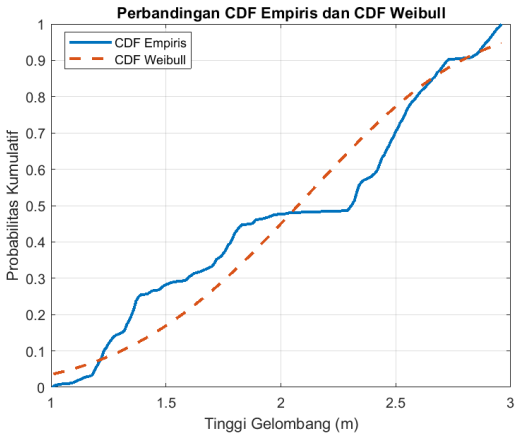
Karena energi gelombang berbanding lurus dengan kuadrat tinggi gelombang:

$E \propto H^2$

maka dominasi tinggi gelombang di sekitar 2 meter menunjukkan bahwa energi gelombang berada pada tingkat yang cukup signifikan, namun tidak menunjukkan kondisi ekstrem.

3.3 Analisis Distribusi Kumulatif

Distribusi kumulatif digunakan untuk mengevaluasi probabilitas kejadian tinggi gelombang tertentu.



Gambar 4. Perbandingan fungsi distribusi kumulatif empiris dan distribusi Weibull.

Gambar 4 menunjukkan perbandingan antara distribusi kumulatif empiris dan distribusi Weibull. Kurva teoritis terlihat cukup dekat dengan kurva empiris, yang menunjukkan bahwa model Weibull mampu merepresentasikan distribusi data secara umum.

Hasil analisis menunjukkan bahwa:

- Sebagian besar tinggi gelombang berada pada kisaran 1,5 – 2,8 meter
- Probabilitas terjadinya gelombang ekstrem relatif kecil

Interpretasi:

- Model cukup baik dalam merepresentasikan kondisi gelombang pada

rentang nilai tengah, namun kurang optimal untuk kejadian ekstrem.

- Kurang optimal untuk kejadian ekstrem (tail distribution)

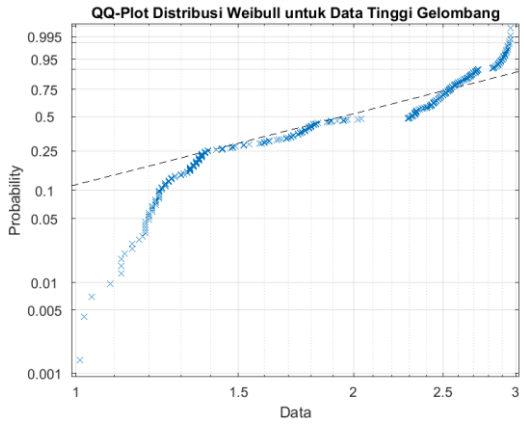
Secara fisika:

Deviasi pada bagian ekor distribusi mengindikasikan adanya fenomena:

- Badai lokal
- Anomali angin
- Interaksi nonlinier gelombang

3.4 Uji Kesesuaian Distribusi

Uji Kolmogorov–Smirnov digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian model Weibull terhadap data empiris.



Gambar 5. QQ-plot distribusi Weibull untuk data tinggi gelombang.

Gambar 5 (QQ-plot) menunjukkan bahwa sebagian besar titik berada di sekitar garis diagonal, yang menandakan kesesuaian yang cukup baik antara distribusi teoritis dan empiris, terutama pada bagian tengah data.

Namun, terdapat deviasi pada bagian ekor distribusi, yang menunjukkan bahwa model Weibull belum sepenuhnya mampu menangkap perilaku ekstrem.

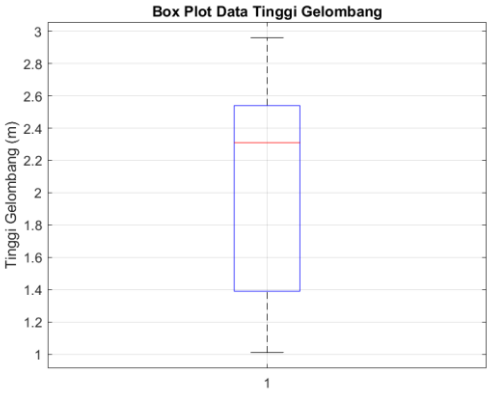
Hasil uji Kolmogorov–Smirnov menunjukkan bahwa terdapat perbedaan signifikan antara distribusi empiris dan distribusi Weibull ($p < 0,05$), sehingga secara statistik ketat model Weibull belum sepenuhnya merepresentasikan data.

Namun, hasil QQ-plot menunjukkan bahwa sebagian besar data berada di sekitar garis diagonal, terutama pada bagian tengah distribusi, yang mengindikasikan bahwa Weibull cukup baik dalam merepresentasikan pola utama data.

Penyimpangan yang terjadi pada bagian ekor distribusi menunjukkan bahwa model Weibull kurang mampu menangkap kejadian gelombang ekstrem.

Secara keseluruhan, distribusi Weibull lebih sesuai digunakan untuk merepresentasikan kondisi gelombang normal, tetapi memiliki keterbatasan dalam menggambarkan fenomena ekstrem.

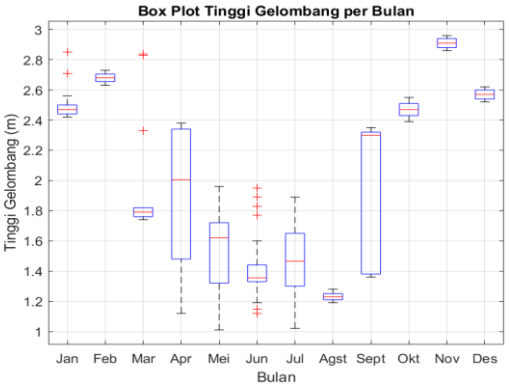
3.5 Analisis Variabilitas Data



Gambar 6. Box plot seluruh data tinggi gelombang.

Gambar 6 (boxplot keseluruhan) menunjukkan bahwa:

- Median berada di sekitar nilai tengah distribusi
- Tidak banyak outlier ekstrem



Gambar 7. Box plot tinggi gelombang per bulan di wilayah pesisir Papua

Gambar 7 (boxplot bulanan) menunjukkan:

- Bulan November–Februari memiliki median lebih tinggi
- Bulan Agustus paling rendah

Interpretasi:

- Ada pola musiman yang kuat
- Variabilitas antar bulan signifikan

Interpretasi Fisika:

- Dipengaruhi oleh:
  a. Sistem monsun
  b. Perubahan tekanan atmosfer
  c. Variasi kecepatan angin

3.6 Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

Hasil penelitian ini sejalan dengan berbagai studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa distribusi Weibull cukup efektif dalam memodelkan tinggi gelombang laut, khususnya untuk merepresentasikan pola distribusi pada kondisi umum. Namun demikian, hasil uji Kolmogorov–Smirnov (K–S) dalam penelitian ini mengindikasikan bahwa distribusi Weibull belum sepenuhnya optimal dalam menggambarkan seluruh karakteristik data. Temuan ini konsisten dengan penelitian lain yang menyatakan bahwa distribusi seperti Lognormal atau Generalized Extreme Value (GEV) cenderung memberikan performa yang lebih baik dalam memodelkan kejadian ekstrem. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa distribusi Weibull lebih sesuai digunakan untuk merepresentasikan kondisi gelombang normal, tetapi memiliki keterbatasan dalam menangkap perilaku ekstrem pada data tinggi gelombang.

3.7 Implikasi Fisik dan Praktis

Hasil penelitian ini memiliki implikasi penting baik dari sisi fisika maupun praktis. Secara fisika, karakteristik gelombang di wilayah pesisir Papua menunjukkan kondisi yang relatif stabil, dengan energi gelombang yang cukup besar namun tidak tergolong ekstrem. Hal ini mengindikasikan bahwa dinamika gelombang di wilayah tersebut didominasi oleh *forcing* angin regional yang bekerja secara konsisten dalam mentransfer energi ke permukaan laut. Dari sisi praktis, temuan ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam berbagai aplikasi rekayasa dan pengelolaan wilayah pesisir, seperti perencanaan desain pelabuhan, analisis risiko terhadap gelombang laut, serta pengembangan strategi pembangunan pesisir yang lebih aman dan berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa distribusi Weibull mampu merepresentasikan pola umum tinggi gelombang di wilayah pesisir Papua dengan parameter bentuk ($k = 4{,}07$) dan skala ($\lambda = 2{,}27$). Hasil analisis menunjukkan bahwa distribusi gelombang cenderung terkonsentrasi pada kisaran 1,5–2,8 meter, yang mengindikasikan kondisi laut yang relatif stabil dengan dominasi gelombang sedang. Namun, hasil uji Kolmogorov–Smirnov menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara distribusi empiris dan model Weibull ($p < 0{,}05$), terutama pada bagian ekor distribusi yang berkaitan dengan kejadian gelombang ekstrem. Dengan demikian, model Weibull lebih sesuai untuk menggambarkan karakteristik gelombang pada kondisi normal, tetapi memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan fenomena ekstrem. Secara fisika, kondisi ini mencerminkan sistem gelombang yang didominasi oleh transfer energi angin yang relatif konsisten, dengan potensi kejadian ekstrem yang tetap perlu diperhatikan dalam analisis risiko pesisir.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data dengan periode yang lebih panjang serta membandingkan beberapa model distribusi lain seperti Lognormal dan Generalized Extreme Value (GEV) untuk meningkatkan akurasi, khususnya dalam analisis gelombang ekstrem. Selain itu, integrasi dengan data angin dan parameter oseanografi lainnya perlu dilakukan untuk memperkuat interpretasi fisika gelombang laut.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Kurniawan R, Habibie MN, Suratno. Variasi bulanan gelombang laut di Indonesia. J Meteorol Geofis. 2011;12(3):221-232.

[2] Dero AI, Abdullah RM, Nuary ZA. Variasi gelombang, arus permukaan, dan angin di Laut Halmahera bagian barat. J Widya Climago. 2022;4(2):45-53.
[3] Ma'rufatin A, Yananto A, Pandoe WW. Karakteristik angin wilayah pesisir utara Pulau Jawa berdasarkan variabilitas monsun. J Teknol Lingkung. 2024;25(1):20-30.
[4] Pasaribu R, Irwan A, Soeprijadi L, Pattirane C. Studi alternatif bangunan pengaman pantai di pesisir Kabupaten Karawang. Pelagicus J IPTEK Terap Perikan Kelaut. 2020;1(2):83-95.
[5] Purnomo R, Fauzi B, Hawari GN, Nur AK. Dinamika pantai Kota Semarang, Jawa Tengah. J Geol Kelaut. 2024;22(2):130-145.
[6] Muraleedharan G, Rao AD, Kurup PG, Nair NU, Sinha M. Modified Weibull distribution for maximum and significant wave height simulation and prediction. Coast Eng J. 2007;54(8):630-638. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2007.05.001
[7] Retika F, Nugroho D, Widiaratih R. Analisis terjadinya gelombang tinggi akibat pola pergerakan angin terkait keselamatan pelayaran di perairan utara Jawa Tengah. Indones J Oceanogr. 2024;6(4):334-343. https://doi.org/10.14710/ijoce.v6i4.24678
[8] Puna SH, Rahman I, Sakina SL. Studi karakteristik gelombang laut perairan Indonesia menggunakan model Simulating Wave Nearshore (SWAN). Indones J Oceanogr. 2025;7(3):284-297.
[9] Ahmad AL, Nurisman N, Achiari H, Setiawati E. Kajian karakteristik gelombang di Kecamatan Bumi Waras, Lampung. MARLIN. 2022;3(1):55-66.
[10] Mansawan AA, Suruan SS. Pemanfaatan gelombang laut sebagai sumber energi terbarukan di wilayah pesisir Papua Barat. Moderna Sains J. 2025;1(1):62-66.