

VALIDASI MODEL NUMERIK SPEKTRUM GELOMBANG MENGUNAKAN DATA *WAVE RECORDER* PLATFORM MINYAK & GAS LEPAS PANTAI

Gatot Defriyanto¹, Samuel Radityo², Eko Supriyadi³, Furqon Alfahmi⁴,
Ngurah Made Darma Putra⁵

Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG)^{1,2,3,4}

Institut Pertanian Bogor (IPB)³

Universitas Negeri Semarang (UNNES)^{1,5}

gatotdefriyan@students.unnes.ac.id¹

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa model numerik InaWave pada *Ocean Forecasting System* BMKG dengan validasi terhadap data observasi dari wave recorder di platform minyak dan gas lepas pantai FPU Jangkrik selama tahun 2023. Hasil penelitian menunjukkan bahwa model InaWave mampu mencerminkan pola fluktuasi tinggi gelombang signifikan dengan koefisien korelasi sebesar 0,88, mencerminkan hubungan linier yang kuat antara hasil simulasi dan data observasi. Namun, model menunjukkan bias underestimate, terutama pada kondisi gelombang tinggi, dengan nilai *Root Mean Square Error* sebesar 0,36 meter. Distribusi kesalahan yang terpusat di sekitar nol mengindikasikan bahwa model memiliki akurasi yang baik pada kondisi gelombang rendah hingga sedang, tetapi memerlukan perbaikan untuk menangkap dinamika ekstrem secara lebih akurat. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa integrasi data observasi *in-situ* dari platform lepas pantai merupakan instrumen krusial dalam menyempurnakan akurasi sistem prediksi samudera. Keberhasilan model InaWave dalam merekonstruksi pola gelombang dengan korelasi yang sangat kuat membuktikan reliabilitas operasionalnya untuk wilayah perairan kompleks seperti Selat Makassar. Temuan ini tidak hanya memberikan fondasi ilmiah bagi peningkatan sistem peringatan dini maritim di Indonesia, tetapi juga menawarkan kerangka kerja validasi yang aplikatif bagi pengembangan model numerik di wilayah perairan strategis global lainnya guna memitigasi risiko operasional dan menjaga keberlanjutan ekosistem laut.

Kata kunci: Model InaWave, Validasi Model Numerik, Radar Gelombang X-Band (*X-Band Wave Radar*), Tinggi Gelombang Signifikan, Selat Makassar.

ABSTRACT

Accurate ocean wave forecasting plays a pivotal role in navigational safety, maritime resource management, and offshore oil and gas operations, particularly within the Makassar Strait, which exhibits complex hydrodynamic dynamics. This study aims to evaluate the performance of the InaWave numerical model integrated into the BMKG Ocean Forecasting System through validation against in-situ observation data from a wave recorder positioned on the FPU Jangkrik offshore platform throughout 2023. The results indicate that the InaWave model effectively captures the fluctuation patterns of Significant Wave Height (SWH) with a strong correlation coefficient of 0.88, demonstrating a robust linear relationship between simulations and

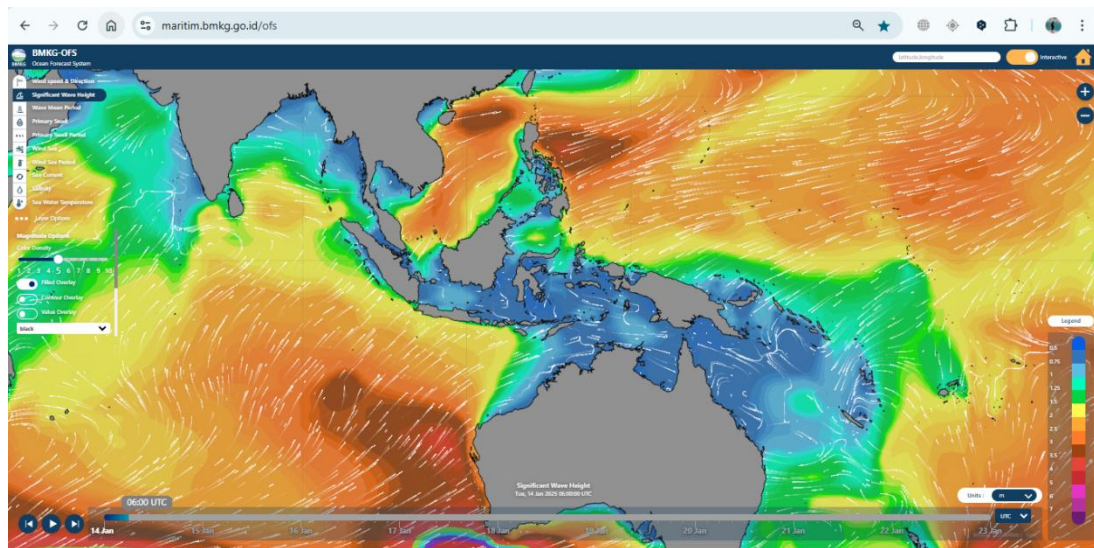
observations. However, the model exhibits a systematic underestimation bias, specifically during high-wave conditions, with a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.36 meters. The error distribution, centered near zero, suggests high accuracy under low-to-moderate wave conditions, yet highlights the necessity for refinement in capturing extreme dynamics. Overall, this research underscores that integrating in-situ observational data from offshore platforms is a critical instrument for enhancing the precision of ocean forecasting systems. The successful reconstruction of wave patterns by the InaWave model confirms its operational reliability for complex maritime environments. These findings not only provide a scientific foundation for strengthening Indonesia's maritime early warning systems but also offer an applicable validation framework for numerical model development in other strategic global waters to mitigate operational risks and ensure marine ecosystem sustainability.

Keywords: InaWave Model, Numerical Model Validation, X-Band Wave Radar, Significant Wave Height, Makassar Strait.

PENDAHULUAN

Pemahaman mendalam terhadap dinamika gelombang laut menjadi aspek vital dalam berbagai bidang kelautan, seperti keselamatan pelayaran, pengelolaan sumber daya maritim, dan operasional kegiatan lepas pantai (Bong et al., 2022) Selat Makassar, sebagai salah satu jalur pelayaran internasional yang strategis di Indonesia, memiliki karakteristik gelombang yang kompleks akibat pengaruh kondisi hidrodinamika lokal dan global (Idris et al., 2020) Di sisi lain, sektor minyak dan gas lepas pantai di kawasan ini sangat bergantung pada prediksi gelombang yang akurat untuk menjaga keberlanjutan operasi dan memitigasi risiko lingkungan (Liu, 2022) Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, model numerik seperti InaWave, yang terintegrasi dalam *Ocean Forecasting System* (OFS) - Badan Meteorologi Klimatologi & Geofisika (BMKG) telah digunakan secara luas untuk memprediksi spektrum gelombang laut (Gambar 1). Sistem pemodelan cuaca maritim OFS – BMKG ini mengacu kepada pemodelan gelombang WaveWatch III (WW3), yaitu

sebuah model gelombang generasi ke tiga yang dikembangkan oleh *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP) milik NOAA, OFS - BMKG menggunakan teknik nesting pada tiga domain dan memperhitungkan variasi batimetri dan wind forcing dari *Global Forecast System - National Oceanic and Atmospheric Administration* (GFS - NOAA). Proses pemodelan diawali dengan menjalankan model pada domain global, sehingga nilai kondisi batas luar (boundary condition) dapat digunakan untuk menghitung prediksi di wilayah perairan Indonesia. Tinggi gelombang signifikan dari OFS - BMKG selanjutnya di manfaatkan untuk informasi cuaca maritim untuk berbagai aktivitas perairan dan pelayaran Indonesia. Namun, efektivitas model ini sangat bergantung pada validasi terhadap data observasi lapangan yang relevan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi keakuratan model numerik OFS - BMKG dalam memprediksi spektrum gelombang laut di Selat Makassar melalui validasi dengan data dari minyak dan gas lepas



Gambar 1.
Tampilan InaWave pada sistem OFS - BMKG

pantai di *Floating Production Unit* (FPU) Jangkrik, Enimura Bakau B.V., *wave recorder* yang dipasang di platform selama tahun 2023. Dengan membandingkan hasil simulasi model dengan data lapangan, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan prediksi model numerik OFS – BMKG tersebut, serta memberikan masukan strategis untuk peningkatan performanya. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk berkontribusi dalam pengembangan model prediksi gelombang yang lebih akurat dan andal, khususnya untuk wilayah perairan Indonesia yang memiliki peran strategis dalam aktivitas ekonomi dan lingkungan global.

Penelitian tentang prediksi gelombang laut menggunakan model numerik telah berkembang pesat, dengan berbagai studi yang mengeksplorasi akurasi dan keandalan model di berbagai wilayah perairan dunia (Bujak et al., 2023). Namun, validasi terhadap model numerik seperti OFS - BMKG di perairan Indonesia, khususnya Selat Makassar, masih sangat terbatas (Munir et al., 2020).

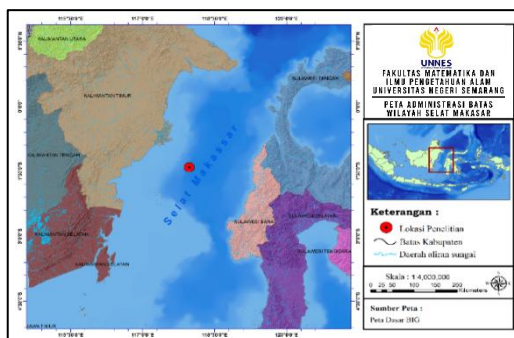
Sebagian besar studi sebelumnya berfokus pada pengembangan model atau penerapannya di perairan dengan karakteristik oseanografis yang berbeda (Yuan & Wang, 2022), sementara hanya sedikit penelitian yang memanfaatkan data observasi berbasis *wave recorder* dari platform minyak dan gas lepas pantai untuk validasi model (Horstmann et al., 2021). Ketiadaan validasi yang komprehensif menciptakan celah dalam literatur yang menghambat pemahaman mendalam tentang performa model numerik di wilayah dengan dinamika arus lintas ekuator yang kompleks. Penelitian ini dirancang untuk mengisi celah tersebut, dengan memanfaatkan data empiris dari FPU Jangkrik di Enimura Bakau B.V., sehingga diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi peningkatan akurasi model prediksi gelombang laut di Selat Makassar.

Penelitian ini menawarkan kontribusi baru dengan memanfaatkan data observasi dari *wave recorder* yang dipasang di platform minyak dan gas lepas pantai FPU Jangkrik, Enimura Bakau B.V., untuk validasi model

numerik OFS – BMKG di Selat Makassar. Berbeda dengan penelitian yang dilakukan oleh (Supriyadi & Rahayu, 2021) yang menggunakan data satelit atau (Draycott et al., 2022) menggunakan Buoy dan (Ponce de Leon & Soares, 2021) dengan Radar SAR, penelitian ini menggunakan pendekatan unik dengan memanfaatkan data lapangan yang lebih mencerminkan kondisi lokal. Kebaruan lainnya terletak pada fokusnya di wilayah Selat Makassar, salah satu perairan strategis dengan dinamika gelombang yang dipengaruhi oleh arus lintas ekuator dan aktivitas manusia yang intensif (Xu et al., 2025). Penelitian ini sangat penting karena meningkatkan keakuratan prediksi gelombang untuk mendukung operasi minyak dan gas lepas pantai, mitigasi risiko lingkungan, serta keselamatan navigasi maritim. Dengan pendekatan ini, penelitian ini tidak hanya memberikan masukan praktis untuk peningkatan model numerik OFS - BMKG tetapi juga berkontribusi pada literatur global terkait validasi model numerik spektrum gelombang.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di perairan Selat Makassar dalam batas koordinat penelitian dilaksanakan di koordinat geografis 1° LU hingga 5° LS dan 118° BT hingga 120° BT



Gambar 2.
Lokasi Penelitian

dengan mengambil titik lokasi validasi di *Rig Platform* Minyak & Gas lepas pantai Eni-Muarabakau B.V FPU Jangkrik dengan koordinat $1^{\circ} 15' 45.360''$ South, $117^{\circ} 39' 2.880''$ East (Gambar 2).

Data yang di gunakan adalah peta spasial tinggi gelombang signifikan dari pemodelan OFS - BMKG dan data pengamatan ketinggian gelombang dari alat *wave recorder* selama tahun 2023. Pemodelan OFS - BMKG menggunakan data angin yang berasal dari GFS dengan resolusi temporal 6 jam dan spasial $0,25^{\circ}$, data kondisi batas luar (*boundary condition*) serta data batimetri BATNAS (Batimetri Nasional) yang diambil dari Badan Informasi Geospasial (BIG) dengan resolusi spasial 6 *arc-second*). Simulasi dilakukan di Selat Makassar dengan grid resolusi tinggi (3 km), mencakup periode selama satu tahun penuh (2023).



Gambar 3.
Wave Recorder yang terpasang di platform minyak dan gas lepas pantai di FPU Jangkrik, Enimura Bakau B.V

Dalam penelitian ini, metode statistik digunakan dengan menghitung *Root Mean Square Error* (RMSE) dan Koefisien Korelasi Data pengamatan gelombang selama satu tahun digunakan untuk membandingkan dengan hasil prediksi model gelombang dari OFS - BMKG.

RMSE dihitung dengan rumus:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Dengan n adalah jumlah data pengamatan, x_i adalah nilai prediksi model pada titik data ke- i , y_i adalah nilai pengamatan gelombang pada titik data ke- i .

Korelasi yang digunakan adalah tipe Pearson (r):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Di mana n adalah jumlah data pengamatan, x_i mewakili nilai yang diukur, y_i nilai yang disimulasikan, \bar{x} adalah rata-rata dari nilai yang diukur, dan \bar{y} adalah rata-rata dari nilai yang disimulasikan. Dengan hasil interpretasi merujuk pada Tabel 1, melalui evaluasi statistik menggunakan RMSE dan koefisien korelasi, penelitian ini akan menghasilkan informasi mengenai tingkat keakuratan model dalam mereproduksi pola dan karakteristik gelombang laut di perairan lepas pantai khususnya area *rig* minyak dan gas.(15)

Tabel 1. Tabel interpretasi nilai korelasi

| Nilai Korelasi | Intepertasi Keterkaitan Antar Variabel |
|----------------|--|
| 0,00 - 0,199 | Sangat lemah |
| 0,20 - 0,399 | Lemah |
| 0,40 - 0,599 | Sedang |

0,60 – 0,799
0,80 – 1,0

Kuat
Sangat Kuat

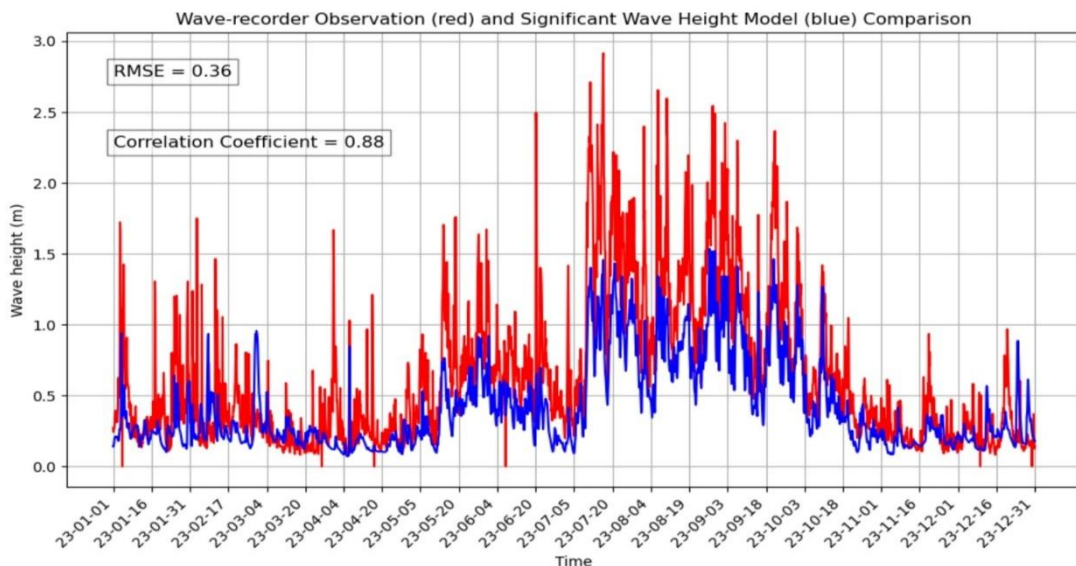
HASIL PENELITIAN

Validasi dilakukan dengan membuat berbagai grafik perbandingan, seperti grafik *time series*, *scatterplot*, dan distribusi kesalahan (*Error Distribution*), yang bertujuan untuk membandingkan data pengamatan dengan hasil pemodelan gelombang laut dari OFS - BMKG. Grafik yang dihasilkan menyajikan perbandingan antara data pengamatan ketinggian gelombang laut yang diukur dengan alat perekam gelombang (*wave recorder*) (ditampilkan dengan warna merah) dan prediksi ketinggian gelombang dari model gelombang signifikan (ditampilkan dengan warna biru) selama periode 2023 seperti model dalam memprediksi kondisi gelombang laut berdasarkan data aktual dari pengamatan. Dalam skala lokal terlihat observasi menunjukkan nilai lebih tinggi dari model. tersaji pada Gambar 5. Grafik ini menyajikan informasi tentang akurasi

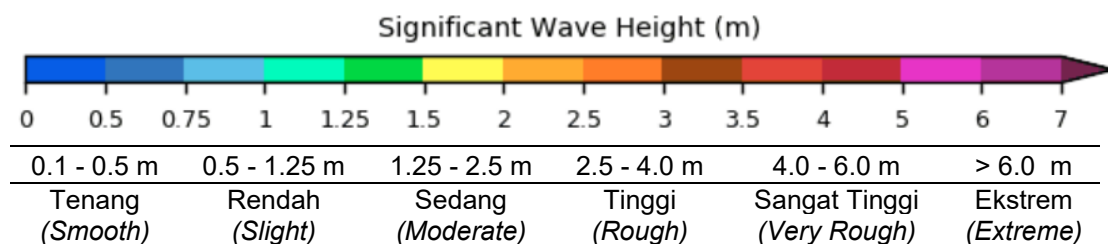
Dengan menggunakan acuan pembagian tinggi gelombang dari Pusat Meteorologi Maritim BMKG, penelitian ini juga berhasil membagi tinggi gelombang berdasarkan beberapa kategori (Gambar 6). Dari perbandingan tercatat peningkatan ketinggian gelombang pada periode tertentu, terutama pada bulan Juli hingga September, yang kemungkinan mencerminkan musim gelombang tinggi yang disebabkan oleh aktivitas meteorologi seperti angin musiman atau alun. Namun, meskipun pola keseluruhan serupa, terdapat beberapa perbedaan yang mencolok pada titik-titik ekstrem (puncak gelombang). Misalnya, pada saat terjadi peningkatan

ketinggian gelombang yang signifikan, data pengamatan sering kali mencatat nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan prediksi model. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan

kondisi gelombang pada kategori tinggi (*rough*) hingga Ekstrem (*extreme*) secara akurat, Perbedaan yang signifikan pada puncak-puncak gelombang ekstrem mengindikasikan bahwa model masih



Gambar 4.
Grafik time series perbandingan data pengamatan dari Wave Recorder dan hasil pemodelan gelombang laut OFS -BMKG



Gambar 5
Klasifikasi Gelombang Signifikan

perlu perbaikan dalam menangkap dinamika gelombang saat terjadi kondisi cuaca buruk atau badai. Meskipun demikian, model menunjukkan performa yang cukup baik untuk kondisi gelombang dalam kategori rendah (*Slight*) hingga sedang (*Moderate*). Ke depannya BMKG akan mengembangkan model kelautan yang akan menggunakan

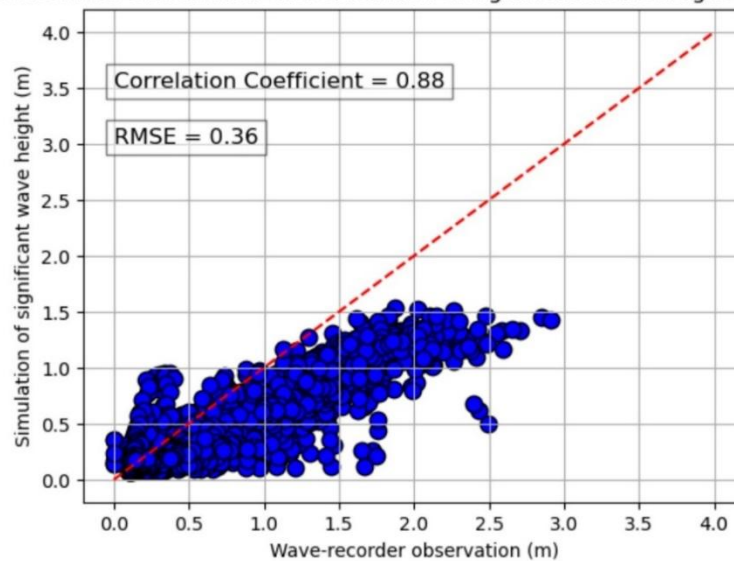
gabungan model arus, gelombang dan atmosfer.

Evaluasi kinerja model dilakukan dengan menghitung nilai RMSE dan koefisien korelasi Pearson, yang memberikan gambaran tentang kesesuaian antara data pengamatan dan hasil pemodelan. Nilai RMSE sebesar 0.36 meter menunjukkan bahwa rata rata kesalahan prediksi model terhadap data

pengamatan adalah kecil. Hal ini mengindikasikan bahwa model mampu memprediksi ketinggian gelombang laut dengan akurasi yang cukup baik untuk sebagian besar periode waktu. Namun, kesalahan ini lebih jelas terlihat pada kondisi gelombang tinggi, seperti pada bulan Agustus hingga September, di mana data pengamatan menunjukkan puncak gelombang yang lebih tinggi dibandingkan hasil model. Sementara itu Koefisien korelasi sebesar 0.88 menunjukkan hubungan linier yang kuat antara data pengamatan dan data model. Nilai ini mencerminkan bahwa model memiliki kemampuan yang baik untuk mencerminkan tren umum ketinggian gelombang di Selat Makassar bagian tengah sepanjang tahun. Walaupun pada

nilai r tinggi, tidak semua puncak gelombang dapat dicerminkan secara akurat oleh model, seperti yang terlihat dari perbedaan pada puncak ekstrem. Hal ini mengindikasikan bahwa model masih memerlukan perbaikan dalam merepresentasikan kondisi-kondisi ekstrem. Gambar 5 menunjukkan adanya pola musiman yang jelas dalam ketinggian gelombang laut di Selat Makassar bagian tengah. Pola ini erat kaitannya dengan musim monsun; 1) Periode gelombang rendah (April hingga Juni): Pada periode ini, angin monsun barat daya mulai melemah, menyebabkan ketinggian gelombang yang relatif rendah di Selat Makassar. Prediksi model dan data pengamatan menunjukkan kesesuaian yang baik

Wave-recorder observation and Simulation of significant wave height Comparison



Gambar 6. Scatterplot perbandingan data pengamatan dari Wave Recorder dan hasil pemodelan gelombang laut OFS - BMKG

kenyataannya model ini belum mampu menangkap fenomena lokal gelombang tinggi seperti pada Gambar 6. Tren yang tersaji pada Gambar 5 meliputi periode gelombang rendah (seperti pada bulan April hingga Juni) hingga periode gelombang tinggi (seperti pada bulan Juli hingga September). Namun, meskipun

Periode gelombang tinggi (Juli hingga September): Pada periode ini, angin monsun tenggara yang kuat meningkatkan ketinggian gelombang di wilayah ini.

Gambar 5 juga menunjukkan bahwa meskipun pola gelombang tinggi ini berhasil dicerminkan oleh model,

terdapat perbedaan yang signifikan pada puncak-puncak tertinggi, di mana data pengamatan mencatat gelombang yang lebih tinggi daripada hasil model. Hasil analisis menunjukkan bahwa model mampu mencerminkan pola umum ketinggian gelombang dengan baik, sebagaimana dibuktikan oleh nilai korelasi yang tinggi ($r = 0.88$) dan RMSE yang rendah (0.36 meter).

Pada Gambar 7 hasil analisis disajikan dalam bentuk grafik *scatterplot*, yang menggambarkan hubungan antara ketinggian gelombang laut yang diukur dengan alat observasi gelombang (*wave recorder*) dan hasil prediksi model simulasi ketinggian gelombang signifikan (*significant wave height model*). Grafik ini dilengkapi dengan garis diagonal merah putus-putus yang mewakili garis ideal (1:1), yaitu ketika hasil simulasi model sama persis dengan data pengamatan. *Scatterplot* menunjukkan distribusi titik-titik biru, yang masing-masing merepresentasikan pasangan nilai pengamatan dan prediksi model pada waktu tertentu. Pola distribusi menunjukkan bahwa sebagian besar titik terkonsentrasi di dekat garis diagonal merah (garis ideal). Mengindikasikan bahwa hasil prediksi model memiliki hubungan yang kuat dengan data pengamatan, meskipun terdapat penyebaran atau deviasi pada beberapa titik. Namun, penyebaran data yang menjauhi garis diagonal menjadi lebih terlihat pada nilai ketinggian gelombang yang lebih besar, terutama di pada kategori gelombang tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa model cenderung kurang akurat dalam memprediksi kondisi gelombang kategori tinggi hingga kategori ekstrim, meskipun performanya tetap baik pada

kondisi gelombang kategori rendah hingga sedang.

Evaluasi performa model menggunakan dua metrik utama yaitu koefisien korelasi Pearson dan RMSE menghasilkan nilai RMSE sebesar 0.36 meter hal ini menunjukkan bahwa rata-rata kesalahan prediksi model relatif kecil, mengindikasikan akurasi numerik yang baik secara keseluruhan. Namun, kesalahan ini tidak terdistribusi secara merata di seluruh rentang ketinggian gelombang. Pada nilai ketinggian gelombang kategori rendah hingga sedang, model menunjukkan performa yang lebih baik, dengan distribusi data yang lebih dekat ke garis diagonal. Sebaliknya, pada nilai ketinggian gelombang kategori tinggi, kesalahan menjadi lebih besar, yang mengindikasikan perlunya peningkatan model untuk menangkap dinamika gelombang tinggi. Sementara itu koefisien korelasi sebesar 0.88 menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara hasil simulasi model dan data pengamatan. Nilai ini mengindikasikan bahwa model mampu mencerminkan pola umum

fluktuasi ketinggian gelombang laut di Selat Makassar bagian tengah. Meskipun terdapat beberapa deviasi pada nilai tinggi gelombang tertentu, tren keseluruhan yang dihasilkan oleh model cukup konsisten dengan data pengamatan. Namun, meskipun nilai korelasi tinggi, *scatterplot* menunjukkan bahwa prediksi model cenderung sedikit *underestimate* untuk nilai ketinggian gelombang kategori tinggi. Dalam konteks ini, *underestimate* berarti model cenderung memprediksi tinggi gelombang yang lebih rendah daripada kondisi sebenarnya yang diamati di lapangan. Terlihat dari dominasi titik-titik yang

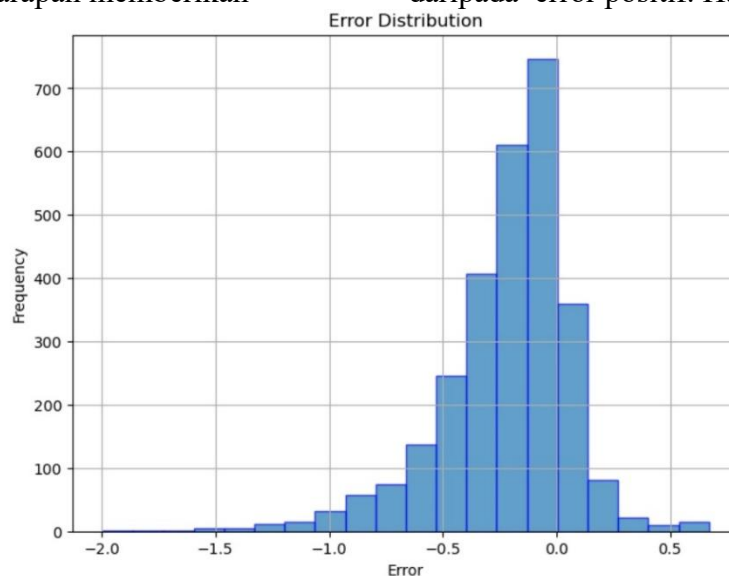
berada di bawah garis diagonal merah, terutama pada kisaran kategori gelombang tinggi.

Hasil *scatterplot* menunjukkan bahwa model prediksi gelombang laut memiliki hubungan linier yang kuat dengan data pengamatan di Selat Makassar bagian tengah, sebagaimana dibuktikan oleh koefisien korelasi Pearson ($r = 0.88$) dan nilai RMSE yang rendah (0.36 meter). Meskipun demikian, model menunjukkan keterbatasan dalam merepresentasikan gelombang pada kategori tinggi, yang memerlukan perhatian lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi prediksi pada kondisi ekstrem.

Penelitian ini juga menganalisis distribusi kesalahan (*error distribution*) (Gambar 8). antara hasil simulasi model prediksi gelombang laut dan data pengamatan di Selat Makassar bagian tengah. Histogram distribusi error digunakan untuk memahami pola penyimpangan nilai prediksi model dari data aktual, dengan harapan memberikan

kesalahan. Distribusi error yang normal dan terpusat di sekitar nol mencerminkan model dengan performa yang baik, sedangkan distribusi yang menyimpang dari pola ini dapat menunjukkan adanya bias sistematis atau keterbatasan model.

Histogram pada Gambar 8 menyajikan distribusi frekuensi kesalahan antara hasil prediksi model dan data pengamatan. Sumbu horizontal (*x-axis*) merepresentasikan nilai error (dalam meter), yaitu perbedaan antara ketinggian gelombang yang diprediksi oleh model dan ketinggian gelombang yang diobservasi ($\text{error} = \text{prediksi} - \text{observasi}$). Sumbu vertikal (*y-axis*) menunjukkan frekuensi kemunculan masing-masing nilai error. Distribusi error memberikan wawasan penting terkait akurasi dan bias model. Dalam penelitian ini, karakteristik error dievaluasi secara statistik untuk memahami performa model secara kuantitatif, histogram menunjukkan bahwa terdapat sedikit bias pada model, dengan nilai error negatif lebih dominan daripada error positif. Hal ini mengindi-



Gambar 7. Distribusi Kesalahan Prediksi Model Numerik Gelombang Laut OFS – BMKG

wawasan lebih mendalam terkait kasikan bahwa model cenderung akurasi model serta potensi sumber *underestimate* pada ketinggian

gelombang yang sebenarnya, terutama pada kondisi gelombang tinggi. Lebar distribusi memberikan indikasi tentang tingkat variasi atau ketidakpastian prediksi model. Semakin sempit distribusi, semakin kecil variasi error dan semakin konsisten model dalam mencerminkan data pengamatan.

Dalam penelitian ini, distribusi yang relatif terpusat menunjukkan bahwa model memiliki tingkat konsistensi yang baik untuk sebagian besar kondisi, meskipun masih terdapat sedikit bias pada nilai ekstrem. Distribusi error yang terpusat di sekitar nol menunjukkan bahwa model prediksi dapat digunakan dengan akurasi yang cukup tinggi di Selat Makassar bagian tengah, terutama untuk kondisi gelombang pada kategori rendah dan sedang. Namun, bias ke arah nilai negatif mengindikasikan bahwa model perlu ditingkatkan untuk menangkap dinamika lokal yang lebih kompleks, seperti: Arus lintas Indonesia (Arlindo) dan angin monsun dapat memengaruhi ketinggian gelombang secara signifikan, dan pengaruh ini mungkin belum direpresentasikan secara akurat dalam model.

PEMBAHASAN

Korelasi kuat sebesar 0,88 yang ditemukan dalam studi ini menegaskan bahwa model InaWave memiliki kemampuan asimilasi yang stabil terhadap dinamika sirkulasi massa air di Selat Makassar. Secara teoritis, koefisien korelasi yang tinggi menunjukkan bahwa fase pertumbuhan dan peluruhan gelombang yang disimulasikan oleh model sinkron dengan gaya pembangkitnya, yaitu stres angin permukaan. Temuan ini didukung

oleh (Haiyqal et al., 2023) yang menekankan bahwa model gelombang generasi ketiga mampu mencapai tingkat akurasi tinggi apabila skema propagasi spektral disesuaikan dengan karakteristik batimetri perairan sempit. Keberhasilan model dalam menangkap tren fluktuasi sepanjang tahun 2023 membuktikan bahwa integrasi data angin GFS $0,25^\circ$ masih cukup representatif untuk memicu pembangkitan gelombang di wilayah tersebut, meskipun terdapat kompleksitas topografi bawah laut yang signifikan di sepanjang jalur ALKI II.

Namun, perhatian khusus harus diberikan pada nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,36 meter dan adanya bias underestimate pada kondisi gelombang tinggi. Fenomena deviasi ini sering kali berakar pada ketidakmampuan parameterisasi fisik model dalam merepresentasikan proses disipasi energi saat terjadi *whitecapping* ekstrem (Piché, 2024) menjelaskan dalam studinya bahwa model numerik global cenderung meremehkan tinggi gelombang signifikan pada saat kecepatan angin meningkat drastis akibat kegagalan dalam menghitung koefisien hambatan (*drag coefficient*) yang non inier. Di Selat Makassar, pengaruh arus lintas Indonesia (Arlindo) yang kuat juga dapat memodifikasi panjang gelombang dan meningkatkan ketinggian gelombang secara lokal. Sebagaimana dinyatakan oleh (Lu et al., 2023), interaksi arus-gelombang yang tidak diperhitungkan secara penuh dalam konfigurasi model standar sering kali menghasilkan bias negatif pada puncak spektrum energi gelombang. Penggunaan data X-Band Wave Radar dari FPU Jangkrik memberikan perspektif krusial dalam validasi ini. Berbeda dengan data satelit yang memiliki resolusi temporal rendah,

radar X-band menangkap dinamika permukaan secara real-time dan kontinu. (Kwon et al., 2023) berargumen bahwa validasi menggunakan instrumen berbasis platform lepas pantai jauh lebih unggul dalam mendeteksi *rogue waves* atau anomali gelombang yang sering terlewatkan oleh model numerik berskala regional. Ketidaksesuaian antara model InaWave dan observasi radar pada kondisi gelombang tinggi menunjukkan bahwa terdapat kebutuhan mendesak untuk meningkatkan resolusi masukan angin lokal (*high-resolution local wind forcing*). Penelitian terbaru oleh (Favaretto et al., 2022) menunjukkan bahwa penggunaan angin dengan resolusi yang lebih tinggi (misalnya 3-5 km) dapat mereduksi bias underestimate pada model SWAN hingga 15-20%, terutama di wilayah perairan dengan pengaruh termal daratan yang kuat.

Analisis distribusi kesalahan yang terpusat di sekitar nol mengindikasikan bahwa model InaWave sangat presisi untuk kondisi laut rendah hingga sedang, yang merupakan kondisi dominan di Selat Makassar. Hal ini memberikan jaminan reliabilitas untuk navigasi kapal niaga rutin. Namun, bagi operasional minyak dan gas yang berisiko tinggi, deviasi pada nilai

ekstrem tetap menjadi risiko kritis. Menurut (Yuan & Wang, 2022) ambang batas keselamatan pada platform lepas pantai sangat bergantung pada akurasi prediksi puncak gelombang ekstrem untuk menghindari kegagalan struktural. Oleh karena itu, temuan dalam penelitian ini memberikan dasar bagi pengembang model di BMKG untuk mempertimbangkan penerapan skema asimilasi data (*Data Assimilation*) yang melibatkan observasi in-situ secara langsung ke dalam operasional Ocean Forecasting System (OFS), guna

memitigasi kesalahan sistematis selama musim monsun. Secara strategis, validasi ini tidak hanya bersifat lokal, tetapi juga berkontribusi pada kerangka global pemodelan laut di wilayah tropis. Karakteristik Selat Makassar yang unik, dengan kedalaman ekstrem namun lebar yang terbatas, merupakan laboratorium alami yang menantang bagi model numerik mana pun. (Srinivas et al., 2021) dalam studinya tentang validasi gelombang di Samudra Hindia menekankan bahwa model numerik sering kali memerlukan penyesuaian khusus pada parameter "ST6" (skema fisika gelombang terbaru) untuk meningkatkan performa di perairan kompleks. Dengan mengintegrasikan temuan ini, pengembangan sistem peringatan dini maritim di Indonesia dapat diarahkan pada pendekatan pemodelan yang lebih adaptif, memastikan keselamatan jiwa dan kelancaran ekonomi biru di salah satu jalur maritim terpadat di dunia.

SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengevaluasi performa model numerik InaWave dalam sistem prediksi samudera BMKG melalui validasi data observasi riil dari platform lepas pantai di Selat Makassar. Secara keseluruhan, model InaWave menunjukkan reliabilitas yang sangat baik dalam merekonstruksi pola fluktuasi gelombang harian, menjadikannya instrumen yang handal untuk mendukung operasional rutin maritim dan keselamatan pelayaran. Meskipun model memiliki presisi yang tinggi pada kondisi laut normal, ditemukan adanya kecenderungan prediksi yang lebih rendah dari kondisi aktual saat terjadi gelombang tinggi, yang mengindikasikan perlunya optimasi

lebih lanjut pada parameterisasi fisik model dan resolusi data angin masukan untuk menangkap fenomena ekstrem. Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi data observasi in-situ sebagai standar validasi untuk meningkatkan akurasi peringatan dini maritim, sekaligus memberikan kerangka kerja ilmiah bagi pengembangan sistem prediksi gelombang yang lebih adaptif di wilayah perairan strategis Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Bong, N., Oki Setyandito, & Andrew John Pierre. (2022). Studi Karakteristik Limpasan Gelombang Overtopping pada Struktur Tanggul Laut. *Jurnal Teknik Sumber Daya Air*, 2(2), 117–128. <https://doi.org/10.56860/jtsda.v2i2.44>
- Bujak, D., Lončar, G., Carević, D., & Kulić, T. (2023). The Feasibility of the ERA5 Forced Numerical Wave Model in Fetch-Limited Basins. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/jmse11010059>
- Draycott, S., Pillai, A. C., Gabl, R., Stansby, P. K., & Davey, T. (2022). An Experimental Assessment of The Effect of Current on Wave Buoy Measurements. *Coastal Engineering*, 174. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2022.104114>
- 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 (Switzerland)*, 14(7), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w14071087>
- Haiyqal, S. V., Ismanto, A., Indrayanti, E., & Andrianto, R. (2023). Karakteristik Tinggi Gelombang Laut pada saat Periode Normal, El Niño dan La Niña di Selat Makassar. *Jurnal Kelautan Tropis*, 26(1). <https://doi.org/10.14710/jkt.v26i1.17003>
- Horstmann, J., Bödewadt, J., Carrasco, R., Cysewski, M., Seemann, J., & Streßer, M. (2021). A Coherent on Receive X-Band Marine Radar for Ocean Observations. *Sensors*, 21(23). <https://doi.org/10.3390/s21237828>
- Idris, M., Barkey, R. A., & Jamil, H. (2020). The Strategies of The Use of Regional Infrastructure to Increase The Activities in Untia Nusantara Fish Port of Untia Biringkanaya Subdistrict Makassar City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 473(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/473/1/012150>
- Kwon, J. W., Chang, W. Du, & Yang, Y. J. (2023). Significant Wave Height Prediction From X-Band Marine Radar Images Using Deep Learning with 3D Convolutions. *PLoS ONE*, 18(10 October). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0292884>
- Liu, Y. (2022). Spatiotemporal Wave Propagation of The Shale Oil and Gas Development in The Marcellus Shale in The Past One Century And A Half. *GIScience and Remote Sensing*, 59(1), 142–163.

- <https://doi.org/10.1080/15481603.2021.2017707>
- Munir, A. S., Nasution, Y. N., & Mandang, I. (2020). A Numerical Study of the Outflow of Makassar Strait Using Regional Ocean Modelling System (ROMS). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 618(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/618/1/012012>
- Piché, S. (2024). *Scientific Validation of the IEC Specification for the Assessment and Characterization of Wave Resources using SWAN*.
- Ponce de Leon, S., & Soares, C. G. (2021). Extreme Waves in The Agulhas Current Region Inferred From SAR Wave Spectra and The SWAN Model. *Journal of Marine Science and Engineering*, 9(2), 1–17. <https://doi.org/10.3390/jmse9020153>
- Srinivas, G., Remya, P. G., Kumar, B. P., Modi, A., & Nair, T. M. B. (2021). The Impact of Indian Ocean Dipole on Tropical Indian Ocean Surface Wave Heights in ERA5 And CMIP5 Models. *International Journal of Climatology*, 41(3), 1619–1632. <https://doi.org/10.1002/joc.6900>
- Sugiyono. (2008). *Metode Penelitian Pendidikan: Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif, dan R & D*. (p. 334).
- Supriyadi, E., & Rahayu, S. P. (2021). The Verification Significant Wave Height Technique in Indonesian Waters and Analysis of Low Air Pressure. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(3). <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.3.12342>
- Yuan, Y., & Wang, X. (2022). Dynamic Analysis of Shallow Embedded Jacket Offshore Structures Under Wave Forces. *SN Applied Sciences*, 4(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05207-5>