

Verifikasi Luaran Arus Laut Permukaan Model InaCAWO Berbasis Data HF Radar Di Perairan Labuan Bajo

Verification of InaCAWO Model Surface Ocean Currents Based on HF Radar Data in the Labuan Bajo Waters

Panji Kuswanaji¹, Aries Kristianto^{1*}

¹Program Studi Meteorologi, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tanah Tinggi, Kota Tangerang, Banten, Indonesia 15211

Email: pkuswanaji@gmail.com; *aries.kristianto@stmkg.ac.id

Received: 30th June 2026; Revised: 10th August 2026; Accepted: 14th August 2026

Abstrak –Perairan Labuan Bajo merupakan wilayah strategis dengan aktivitas pelayaran dan pariwisata bahari yang tinggi, sehingga informasi arus laut permukaan menjadi penting untuk mendukung keselamatan maritim. Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi luaran arus laut permukaan model InaCAWO menggunakan data observasi HF Radar Labuan Bajo sebagai acuan. Data yang digunakan berupa komponen arus permukaan zonal (u) dan meridional (v) dari model InaCAWO dan HF Radar selama periode 1 Desember 2024 hingga 31 Mei 2025. Perbedaan resolusi spasial antara kedua data disesuaikan melalui metode Natural Neighbor Interpolation dengan menginterpolasi data HF Radar ke grid model InaCAWO. Verifikasi dilakukan menggunakan indikator statistik berupa Bias, Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), dan Willmott Index, serta dianalisis melalui perbandingan mean surface current, deret waktu, scatterplot, dan distribusi spasial bulanan komponen arus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa InaCAWO mampu menggambarkan pola umum arus laut permukaan di perairan Labuan Bajo, tetapi cenderung menghasilkan magnitudo arus yang lebih rendah dibandingkan dengan HF Radar. Perbandingan deret waktu menunjukkan nilai bias $-0,34$ knot, RMSE $0,41$ knot, dan korelasi $0,25$, yang mengindikasikan hubungan temporal yang lemah dan kecenderungan nilai prediksi yang berada di bawah nilai observasi. Verifikasi komponen u dan v menunjukkan bahwa galat model bervariasi secara spasial dan temporal, dengan ketidakpastian lebih menonjol pada komponen meridional. Dengan demikian, InaCAWO dapat digunakan sebagai gambaran awal kondisi arus laut permukaan, tetapi masih memerlukan evaluasi lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi pada dinamika arus lokal.

Kata kunci: Arus laut permukaan; HF Radar; InaCAWO; Labuan Bajo; verifikasi model.

Abstract – Labuan Bajo waters are a strategic maritime region with intensive tourism and marine transportation activities, making surface current information essential for maritime safety. This study aims to verify surface ocean current outputs from the InaCAWO model using HF Radar observations in Labuan Bajo as reference data. The study used surface current zonal (u) and meridional (v) components from InaCAWO and HF Radar for the period 1 December 2024 to 31 May 2025. Spatial resolution differences between the two datasets were adjusted using Natural Neighbor Interpolation, by interpolating HF Radar data onto the InaCAWO model grid. Model verification was conducted using statistical indicators, including Bias, Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and Willmott Index, and supported by analyses of mean surface current, time series, scatterplots, and monthly spatial distributions of current components. The results show that InaCAWO is able to represent the general pattern of surface currents in Labuan Bajo waters, but tends to produce lower current magnitudes than HF Radar observations. The time series comparison shows a bias of -0.34 knot, an RMSE of 0.41 knot, and a correlation of 0.25 , indicating a weak temporal relationship and an underestimation tendency. Verification of u and v components shows spatially and temporally varying errors, with greater uncertainty in the meridional component. Therefore, InaCAWO can serve as an initial representation of surface current conditions, but further evaluation is needed to improve its accuracy in capturing local current dynamics.

Keywords: Surface ocean current; HF Radar; InaCAWO; Labuan Bajo; model verification.

1. Pendahuluan

Perairan Labuan Bajo merupakan wilayah strategis di Indonesia bagian timur yang memiliki peran penting sebagai destinasi pariwisata bahari nasional maupun internasional [1]. Peningkatan aktivitas pelayaran wisata, transportasi laut, dan kegiatan kelautan lainnya menjadikan informasi oseanografi, khususnya arus laut permukaan, sangat penting untuk mendukung keselamatan aktivitas maritim. Kecepatan dan arah arus laut permukaan dapat memengaruhi manuver kapal, waktu tempuh, serta potensi risiko kecelakaan laut [2].

Informasi arus laut permukaan dapat diperoleh melalui data observasi maupun model numerik. *High Frequency Radar* (HF Radar) merupakan instrumen observasi yang mampu merekam arus laut permukaan secara kontinu dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi, serta telah digunakan dalam pemantauan dinamika pesisir, pengelolaan lalu lintas kapal, dan mitigasi bencana maritim [3]; [4]. Namun, cakupan HF Radar relatif terbatas pada wilayah pesisir tertentu sesuai jangkauan sistem radar, sehingga belum mampu merepresentasikan kondisi arus laut pada domain yang lebih luas.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, model numerik oseanografi digunakan sebagai alat prediksi arus laut permukaan pada cakupan spasial yang lebih luas. Salah satu model yang dikembangkan untuk wilayah Indonesia adalah *Indonesian Coupling Atmosphere-Wave-Ocean Model* (InaCAWO), yang mengintegrasikan interaksi atmosfer, gelombang, dan laut untuk menghasilkan prediksi kondisi laut yang lebih baik [5]. Model *coupling* serupa telah diterapkan di berbagai wilayah, seperti Pulau Madeira, Laut Adriatik, pesisir California, Teluk Meksiko, dan Brasil [6]. Meskipun demikian, luaran model numerik tetap memiliki ketidakpastian akibat keterbatasan data awal dan batas, parameterisasi proses fisis, resolusi spasial, serta sifat sistem atmosfer–laut yang nonlinier dan *chaotic* [7]. Oleh karena itu, verifikasi model diperlukan untuk menilai tingkat kesesuaian luaran model terhadap data observasi.

Penelitian ini memverifikasi luaran arus laut permukaan model InaCAWO dengan menggunakan data observasi HF Radar di perairan Labuan Bajo sebagai acuan. Verifikasi dilakukan pada jam standar pokok 00, 06, 12, dan 18 UTC selama periode 1 Desember 2024 sampai 31 Mei 2025. Pendekatan yang digunakan adalah metode statistik, yang umum digunakan untuk mengukur kesesuaian antara hasil simulasi model dan data observasi [8]. Indikator statistik yang digunakan meliputi Bias, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Willmott Index*.

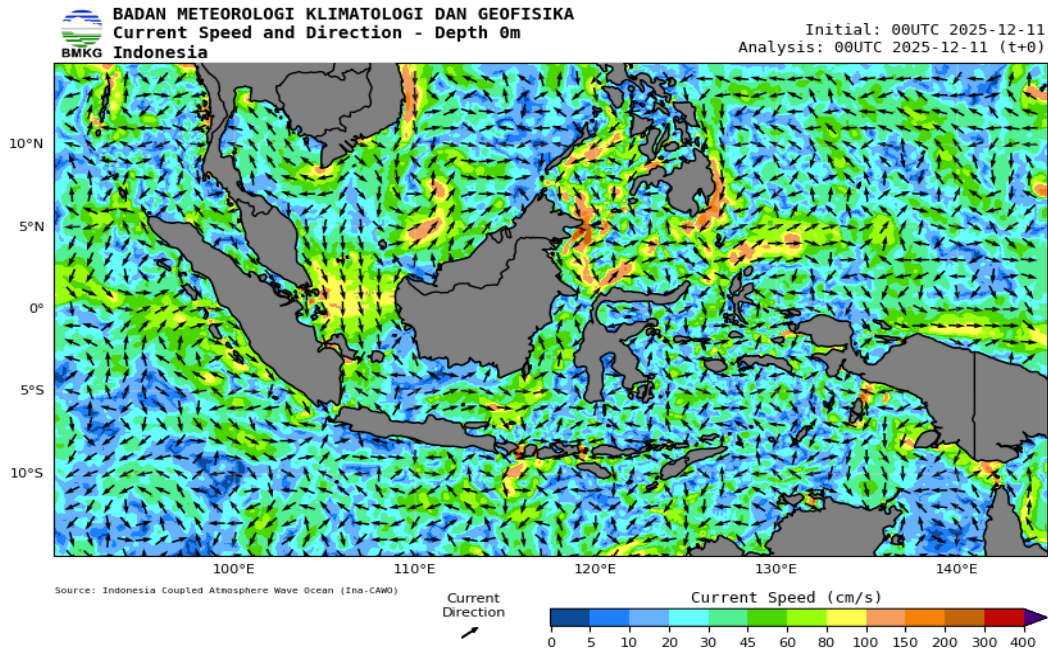
Berdasarkan uraian tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana tingkat kesesuaian luaran arus laut permukaan model InaCAWO BMKG dibandingkan dengan data observasi HF Radar di Labuan Bajo pada jam standar pokok 00, 06, 12, dan 18 UTC selama periode 1 Desember 2024 sampai 31 Mei 2025. Penelitian ini bertujuan untuk memverifikasi performa model InaCAWO dalam merepresentasikan arus laut permukaan di wilayah pengamatan HF Radar. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kinerja model InaCAWO, menjadi dasar evaluasi dan penyempurnaan model, serta mendukung peningkatan akurasi informasi arus laut permukaan untuk keselamatan pelayaran dan pengelolaan wilayah pesisir.

2. Landasan Teori

2.1. Model InaCAWO

Model InaCAWO (*Indonesia Coupling Atmosphere–Wave–Ocean*) merupakan sistem pemodelan laut–atmosfer terkopel yang dikembangkan oleh BMKG. Model ini memiliki input data yang lebih banyak serta resolusi spasial dan temporal yang lebih baik dibandingkan InaWAVES (BMKG, 2025). InaCAWO mengadopsi konsep pemodelan terkopel seperti pada COAWST (*Coupling Ocean–Atmosphere–Wave–Sediment Transport*), yaitu mengintegrasikan komponen atmosfer, gelombang, dan oseanografi dalam satu sistem komputasi terpadu [9].

Secara umum, InaCAWO terdiri atas dua produk utama, yaitu InaCAWO-Wave dan InaCAWO-Flow. InaCAWO-Wave menyediakan informasi tinggi gelombang, *swell*, arah, dan periode gelombang dengan memanfaatkan model SWAN, sedangkan InaCAWO-Flow menghasilkan informasi arus laut, suhu permukaan laut, salinitas, dan stratifikasi kolom air menggunakan model oseanografi ROMS (*Regional Ocean Modeling System*). ROMS mampu mensimulasikan sirkulasi laut *nonlinier* dan variabilitas arus permukaan secara detail [10]. Dalam sistem ini, model atmosfer WRF (*Weather Research and Forecasting Model*) berperan sebagai penyedia *forcing* atmosfer, sehingga interaksi antara angin, gelombang, dan arus dapat direpresentasikan secara simultan.

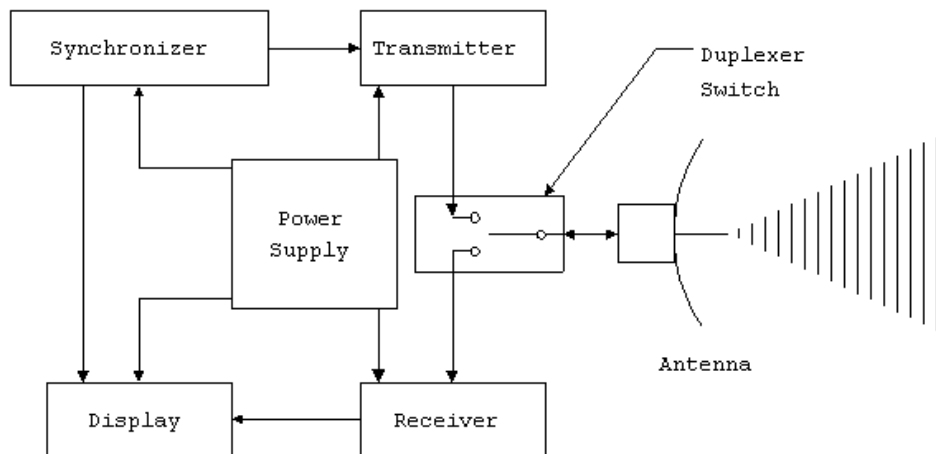


Gambar 1. Tampilan luaran model InaCAWO-Flow.

Gambar 1 menunjukkan contoh luaran InaCAWO-Flow berupa peta kecepatan dan arah arus permukaan di wilayah perairan Indonesia. Arah arus ditampilkan melalui vektor panah, sedangkan intensitas arus direpresentasikan dengan skala warna. Informasi tersebut penting untuk analisis dinamika oseanografi, khususnya dalam memahami pola arus, transport massa air, serta interaksi laut-atmosfer di wilayah perairan tropis.

2.2. HF Radar

HF Radar (*High Frequency radar*) seperti pada Gambar 2 merupakan instrumen oseanografi berbasis gelombang radio yang berfungsi untuk mengukur arus permukaan laut, gelombang, serta parameter dinamika laut lainnya secara kontinu dengan jangkauan pengamatan kira-kira 70 km dari garis pantai [11]. Sistem ini bekerja pada rentang frekuensi 3–30 MHz, sehingga mampu mendeteksi pergerakan partikel air laut melalui prinsip *Bragg scattering*, yaitu proses hamburan gelombang radio oleh gelombang permukaan laut yang memiliki panjang gelombang tertentu [12].



Gambar 2. Diagram sistem HF Radar.

BMKG sebagai instansi yang bertanggung jawab dalam pengamatan kondisi kelautan di wilayah Indonesia memanfaatkan HF Radar sebagai salah satu instrumen untuk mendukung layanan informasi meteorologi maritim. Data hasil observasi HF Radar digunakan BMKG sebagai layanan informasi arus laut permukaan yang dapat digunakan dalam layanan jalur penyeberangan BMKG. Penggunaan HF Radar di Indonesia berkembang melalui pemasangan sistem HF Radar di sejumlah wilayah pesisir, terutama pada kawasan dengan aktivitas pelayaran yang intensif.

Seperti radar konvensional, HF Radar pada dasarnya beroperasi dengan cara mengirimkan gelombang radio dan menganalisis sinyal pantulannya. Namun, HF Radar memiliki sifat unik, yaitu beroperasi pada frekuensi 3-30 MHz, memungkinkan kemampuan propagasi khusus seperti deteksi gelombang permukaan [13]. Pada Gambar 2 dapat dilihat bahwa sistem HF Radar tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu antenna pemancar dan antenna penerima yang berfungsi untuk memancarkan serta menangkap sinyal radio, synchronizer sebagai pengolah sinyal, serta sistem komputer untuk melakukan proses *direction finding*, estimasi arus permukaan, dan pengiriman data secara *real-time* ke pusat pengolahan.

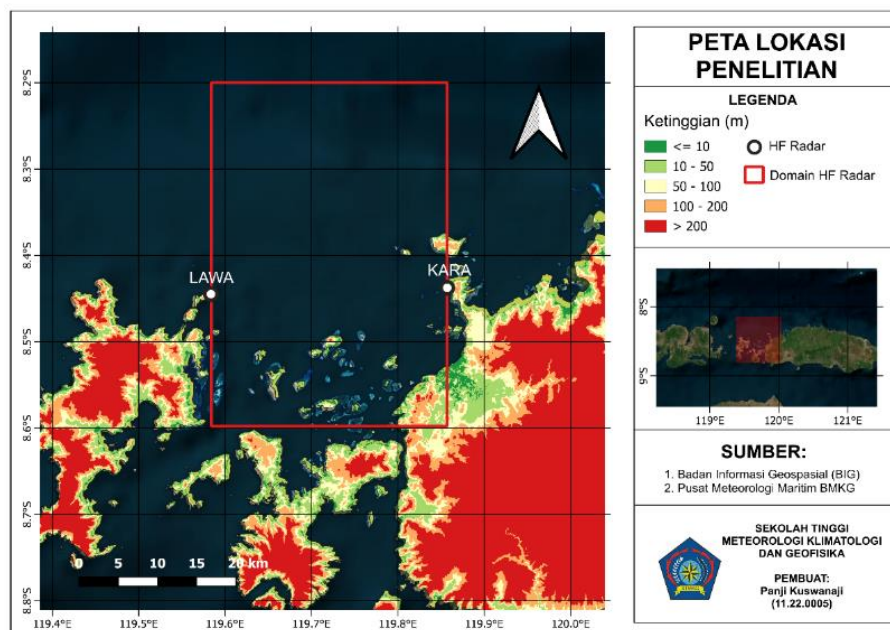
3. Material dan Metode

3.1 Jenis penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan deskriptif. Metode kuantitatif merupakan pendekatan penelitian yang dominan menggunakan angka, mulai dari pengumpulan data, pengolahan, analisis statistik, hingga penyajian hasil [14]. Pada penelitian ini, metode kuantitatif diterapkan saat mengolah data observasi dari HF Radar, serta ketika melakukan perbandingan antara data hasil pengamatan HF Radar dengan keluaran model InaCAWO (*Indonesia Coupling Atmosphere–Wave–Ocean*) yang dikembangkan oleh BMKG. Pendekatan ini digunakan untuk menguji performa InaCAWO dalam merepresentasikan dinamika arus laut permukaan dengan menggunakan data HF Radar.

3.2 Lokasi dan waktu penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di perairan Labuan Bajo sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Wilayah ini merupakan salah satu perairan strategis di Indonesia bagian timur yang terletak di antara Pulau Flores dan Pulau Komodo, serta berperan sebagai destinasi pariwisata bahari yang banyak dikunjungi wisatawan domestik maupun mancanegara [1]. Tingginya aktivitas pelayaran wisata di wilayah ini menjadikan informasi arus laut permukaan penting untuk mendukung efisiensi, keselamatan, dan keamanan pelayaran.



Gambar 3. Peta lokasi penelitian.

Salah satu sumber informasi arus laut permukaan adalah luaran model InaCAWO. Namun, sebagai produk model numerik, luaran InaCAWO perlu diverifikasi terhadap data observasi HF Radar di Labuan Bajo untuk mengetahui tingkat kesesuaiannya. Penelitian ini menggunakan luaran model InaCAWO periode 1 Desember 2024 hingga 31 Mei 2025. Rentang waktu satu tahun dipilih untuk merepresentasikan variasi bulanan dan musiman arus laut permukaan di Labuan Bajo. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai kinerja model InaCAWO dalam memprediksi arus laut permukaan di wilayah perairan kepulauan.

3.3 Data penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data observasi HF Radar Labuan Bajo BMKG dan luaran arus laut permukaan model InaCAWO BMKG. Data HF Radar digunakan sebagai data observasi arus laut permukaan yang mencakup parameter kecepatan dan arah arus dengan satuan m/s. Sistem HF Radar bekerja pada frekuensi 3-30 MHz [15], dengan resolusi spasial 1 km, radius pengamatan hingga 70 km dari pesisir, dan resolusi temporal 10 menit. Data observasi yang digunakan mencakup periode 1 Desember 2024 sampai 31 Mei 2025.

Luaran model InaCAWO digunakan sebagai data prakiraan arus laut permukaan hasil pemodelan sistem terkopel atmosfer–gelombang–osean. Data model ini memiliki resolusi spasial $0,025^\circ$ dan resolusi temporal 1 jam, dengan parameter utama berupa kecepatan arus laut permukaan dalam satuan m/s di wilayah perairan Labuan Bajo. Periode data model yang digunakan sama dengan data observasi, yaitu 1 Desember 2024 sampai 31 Mei 2025. Selanjutnya, luaran model InaCAWO diverifikasi terhadap data HF Radar untuk menilai performa model dalam merepresentasikan arus laut permukaan di wilayah penelitian. Tabel 1 menyajikan informasi terkait resolusi kedua sumber data berdasarkan aspek spasial dan temporal.

Tabel 1. Sumber data.

No.	Jenis Data	Sumber Data	Parameter	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal	Periode Data	Fungsi Data
1	Data HF Radar Labuan Bajo	BMKG	Kecepatan dan arah arus laut permukaan	1 km	10 menit	1 Desember 2024-31 Mei 2025	Data observasi/acuan verifikasi
2	Luaran model InaCAWO	BMKG	Kecepatan dan arah arus laut permukaan	3 km	1 jam	1 Desember 2024-31 Mei 2025	Data model/prakiraan yang diverifikasi

3.4 Teknik pengolahan data

Pengolahan data dilakukan terhadap komponen *zonal* (u) dan *meridional* (v) arus laut permukaan dari data observasi HF Radar dan luaran model InaCAWO selama periode 1 Desember 2024 sampai 31 Mei 2025. Seluruh data dalam format NetCDF diolah menggunakan skrip Python melalui Visual Studio Code. Data dikelompokkan berdasarkan bulan dan jam standar pokok, yaitu 00, 06, 12, dan 18 UTC. Selanjutnya, data pada masing-masing jam standar pokok dirata-ratakan untuk seluruh hari dalam setiap bulan sehingga diperoleh rata-rata bulanan komponen *zonal* (u) dan *meridional* (v) pada 00, 06, 12, dan 18 UTC.

Perbedaan resolusi spasial antara data HF Radar dan luaran model InaCAWO disesuaikan melalui interpolasi spasial. Data HF Radar diinterpolasi ke grid model InaCAWO menggunakan metode Natural Neighbor Interpolation agar kedua data berada pada grid yang sama. Setelah proses penyamaan grid, komponen *zonal* (u) dan *meridional* (v) dari HF Radar dan InaCAWO divisualisasikan dalam bentuk peta rata-rata bulanan dan dianalisis menggunakan current rose pada setiap jam standar pokok. Analisis current rose dilakukan pada wilayah dengan batas koordinat $8,2^\circ$ – $8,5^\circ$ LS dan $119,6^\circ$ – 120° BT untuk membandingkan pola distribusi dan arah dominan arus laut permukaan.

Verifikasi luaran model InaCAWO terhadap data HF Radar dilakukan dengan menghitung indikator statistik pada setiap grid, yaitu Bias, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Willmott Index*. Perhitungan ini dilakukan secara terpisah untuk komponen u dan v arus laut permukaan. Selain verifikasi statistik, perbandingan current rose juga digunakan untuk menilai kesesuaian pola arah arus laut permukaan antara luaran model InaCAWO dan data observasi HF Radar.

3.5 Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk menilai performa luaran arus laut permukaan model InaCAWO BMKG terhadap data observasi HF Radar di perairan Labuan Bajo. HF Radar digunakan sebagai data acuan karena mampu merekam arus laut permukaan secara kontinu dengan resolusi temporal dan spasial yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam evaluasi model oseanografi [4]. Metode verifikasi yang digunakan adalah pendekatan statistik yang umum diterapkan untuk menilai performa model numerik [8], meliputi Bias, *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Willmott Index*.

Bias digunakan untuk mengetahui kecenderungan sistematis model dalam menghasilkan nilai yang lebih tinggi atau lebih rendah dibandingkan observasi. Nilai bias positif menunjukkan model cenderung overestimate, sedangkan nilai negatif menunjukkan underestimate. Nilai bias yang mendekati nol menunjukkan kesesuaian rata-rata yang lebih baik antara model dan observasi [8]. Bias dihitung dengan Persamaan (1).

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (1)$$

Keterangan: N adalah jumlah pasangan data; i adalah indeks data (1, 2, ..., N); F_i adalah nilai luaran model InaCAWO; dan O_i adalah nilai observasi HF Radar. Karena selisih $F_i - O_i$ mempertahankan tanda, Bias menunjukkan arah penyimpangan: positif untuk overestimate dan negatif untuk underestimate.

Mean Absolute Error (MAE) digunakan untuk menghitung rata-rata besar kesalahan absolut antara luaran model dan data observasi. MAE tidak mengkuadratkan nilai error sehingga kurang sensitif terhadap nilai ekstrem dibandingkan dengan RMSE. Semakin kecil nilai MAE, semakin baik kesesuaian model terhadap observasi [8]. MAE dihitung dengan Persamaan (2).

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (2)$$

Keterangan: N , i , F_i , dan O_i didefinisikan seperti pada Persamaan (1), sedangkan $|F_i - O_i|$ adalah nilai absolut kesalahan. Berbeda dengan Bias, MAE menghilangkan tanda positif/negatif sehingga kesalahan tidak saling meniadakan; MAE menunjukkan rata-rata besar kesalahan, bukan arah penyimpangan.

Root Mean Square Error (RMSE) digunakan untuk mengukur besarnya penyimpangan antara luaran model dan observasi. Karena selisih error dikuadratkan, RMSE lebih sensitif terhadap kesalahan yang besar atau ekstrem [16]. Nilai RMSE yang semakin kecil menunjukkan tingkat kesesuaian model yang semakin baik [8]. RMSE dihitung dengan Persamaan (3).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (3)$$

Keterangan: N , i , F_i , dan O_i didefinisikan seperti pada Persamaan (1), sedangkan $(F_i - O_i)^2$ adalah kuadrat kesalahan. Pengkuadratan membuat RMSE lebih sensitif terhadap kesalahan besar, sedangkan akar kuadrat mengembalikan RMSE ke satuan variabel yang diverifikasi.

Willmott Index atau *Index of Agreement* digunakan untuk menilai tingkat kesesuaian relatif antara luaran model dan observasi dengan mempertimbangkan deviasi terhadap rata-rata observasi. Nilainya berkisar antara 0 hingga 1, dengan nilai mendekati 1 menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik [17]. *Willmott Indeks* dihitung dengan Persamaan (4).

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|F_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

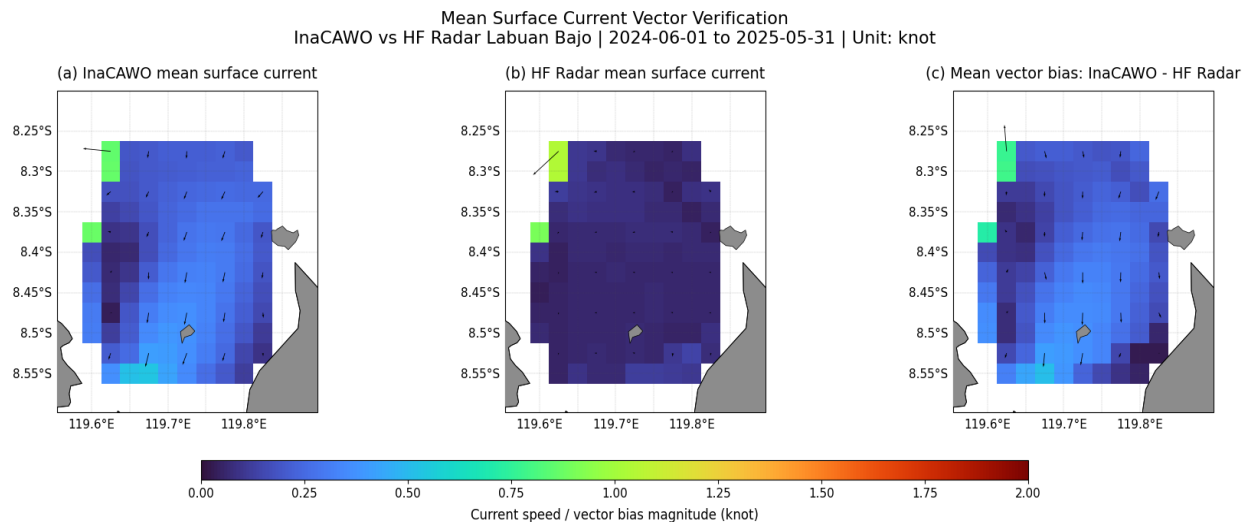
Keterangan: d adalah *Willmott Index* (*Index of Agreement*); N adalah jumlah pasangan data; F_i adalah nilai luaran model; O_i adalah nilai observasi; $\bar{O}$ adalah rata-rata observasi; dan $|\cdot|$ menyatakan nilai absolut. Nilai d berkisar antara 0 hingga 1; semakin mendekati 1, semakin baik kesesuaian model terhadap observasi.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Mean surface current

Pengevaluasian kemampuan model dalam merepresentasikan kondisi arus laut permukaan di wilayah kajian, dilakukan analisis perbandingan rerata spasial arus permukaan antara luaran model InaCAWO dan data observasi HF Radar. Selain itu, dihitung pula selisih atau bias vektor untuk mengidentifikasi

perbedaan baik pada magnitudo maupun arah arus. Hasil visualisasi dari analisis tersebut disajikan pada Gambar 4 yang memperlihatkan distribusi spasial mean surface current dari kedua sumber data serta pola bias di wilayah perairan Labuan Bajo.



Gambar 4. Mean surface current vector verification: (a) InaCAWO, (b) HF Radar, (c) Bias: InaCAWO- HF Radar.

Perbandingan arus laut permukaan rata-rata antara luaran model InaCAWO dan data HF Radar Labuan Bajo selama periode 1 Desember 2024 hingga 31 Mei 2025 yang diperlihatkan pada Gambar 4 menunjukkan InaCAWO menghasilkan magnitudo arus yang lebih rendah dibandingkan HF Radar pada sebagian besar domain kajian. Pada panel InaCAWO, kecepatan arus didominasi oleh nilai rendah, sedangkan HF Radar menunjukkan peningkatan magnitudo arus terutama di bagian utara hingga timur laut domain. Perbedaan ini menunjukkan bahwa model cenderung melemahkan intensitas arus permukaan yang diamati oleh HF Radar.

Panel bias vektor menunjukkan bahwa perbedaan antara InaCAWO dan HF Radar tidak hanya terjadi pada magnitudo arus, tetapi juga pada arah vektor arus. Nilai bias yang lebih besar terlihat pada bagian utara, timur laut, dan sebagian area selatan domain, yang mengindikasikan bahwa model belum sepenuhnya mampu merepresentasikan struktur arus permukaan lokal di wilayah Labuan Bajo. Kondisi ini berkaitan dengan kompleksitas dinamika perairan pesisir dan kepulauan, termasuk pengaruh topografi, garis pantai, pasang surut, dan variabilitas angin lokal yang sulit direpresentasikan secara sempurna oleh model numerik.

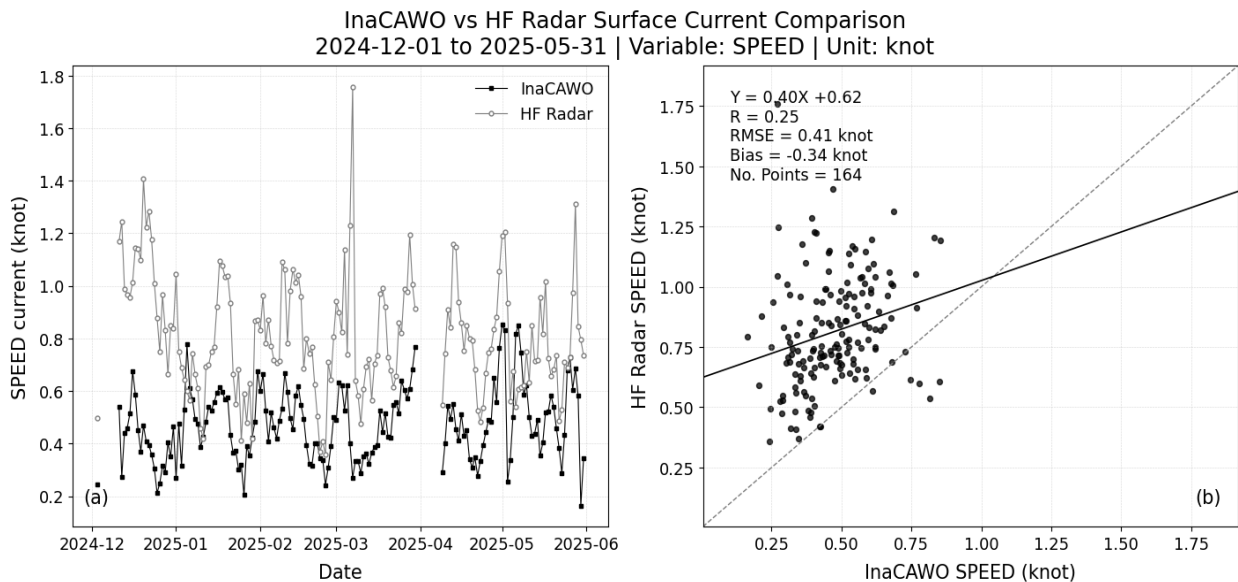
Dengan demikian, hasil ini menunjukkan bahwa InaCAWO masih dapat menangkap keberadaan pola arus permukaan secara umum, tetapi memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan intensitas dan arah arus secara detail pada skala lokal. Oleh karena itu, evaluasi terhadap model InaCAWO tidak cukup hanya dilakukan berdasarkan magnitudo kecepatan, tetapi perlu mencakup komponen arus *zonal* (u) dan *meridional* (v), bias vektor, serta statistik verifikasi seperti bias, RMSE, dan Willmott *Index*.

4.2 Time series comparison

Penilaian kinerja model InaCAWO secara temporal, dilakukan analisis perbandingan deret waktu (time series) antara kecepatan arus laut permukaan hasil model dan observasi HF Radar. Analisis ini bertujuan untuk melihat kemampuan model dalam merepresentasikan variasi harian serta kejadian-kejadian ekstrem yang teramati selama periode penelitian. Selain itu, hubungan statistik antara kedua data juga dievaluasi melalui scatterplot untuk mengidentifikasi pola kesesuaian, korelasi, serta kecenderungan bias model terhadap observasi. Hasil analisis tersebut disajikan pada Gambar 5.

Perbandingan temporal dan hubungan statistik antara kecepatan arus laut permukaan dari model InaCAWO dan HF Radar Labuan Bajo selama periode 1 Desember 2024 hingga 31 Mei 2025 ditunjukkan pada gambar 5. Panel (a) memperlihatkan deret waktu kecepatan arus, sedangkan panel (b) menunjukkan scatterplot antara InaCAWO dan HF Radar. Secara umum, HF Radar menunjukkan nilai kecepatan arus

yang lebih tinggi dan lebih bervariasi dibandingkan InaCAWO. Sebaliknya, InaCAWO cenderung menghasilkan kecepatan yang lebih rendah dan variasi yang lebih halus.



Gambar 5. Perbandingan temporal InaCAWO dan HF Radar: (a) time series InaCAWO dan HF Radar, dan (b) scatter plot InaCAWO dan HF Radar.

Pada deret waktu, beberapa peningkatan kecepatan arus yang terekam oleh HF Radar, seperti pada pertengahan Desember 2024, awal Maret 2025, dan akhir Mei 2025, tidak sepenuhnya direpresentasikan oleh InaCAWO. Hal ini menunjukkan bahwa model cenderung meredam kejadian arus kuat atau variabilitas temporal beramplitudo tinggi. Pola tersebut mengindikasikan adanya kecenderungan underestimation pada luaran InaCAWO terhadap observasi HF Radar.

Hasil scatterplot memperkuat temuan tersebut. Sebagian besar titik berada di atas garis 1:1, yang berarti kecepatan arus HF Radar umumnya lebih besar dibandingkan InaCAWO. Nilai bias sebesar -0,34 knot yang ditunjukkan pada Gambar 5 (b) menunjukkan bahwa InaCAWO secara rata-rata mengestimasi kecepatan arus lebih rendah dibandingkan HF Radar. Persamaan regresi $Y = 0,40X + 0,62$ pada Gambar 5 (b) juga menunjukkan bahwa perubahan kecepatan pada InaCAWO tidak sepenuhnya sebanding dengan perubahan yang diamati oleh HF Radar.

Nilai korelasi $R = 0,25$ pada Gambar 5 (b) menunjukkan hubungan temporal yang lemah antara kedua data, sedangkan RMSE sebesar 0,41 knot pada Gambar 5(b) mengindikasikan galat yang cukup nyata pada estimasi kecepatan arus. Kombinasi antara korelasi rendah, bias negatif, dan sebaran titik yang cukup menyebar menunjukkan bahwa InaCAWO masih memiliki keterbatasan dalam merepresentasikan variabilitas temporal kecepatan arus permukaan di wilayah Labuan Bajo.

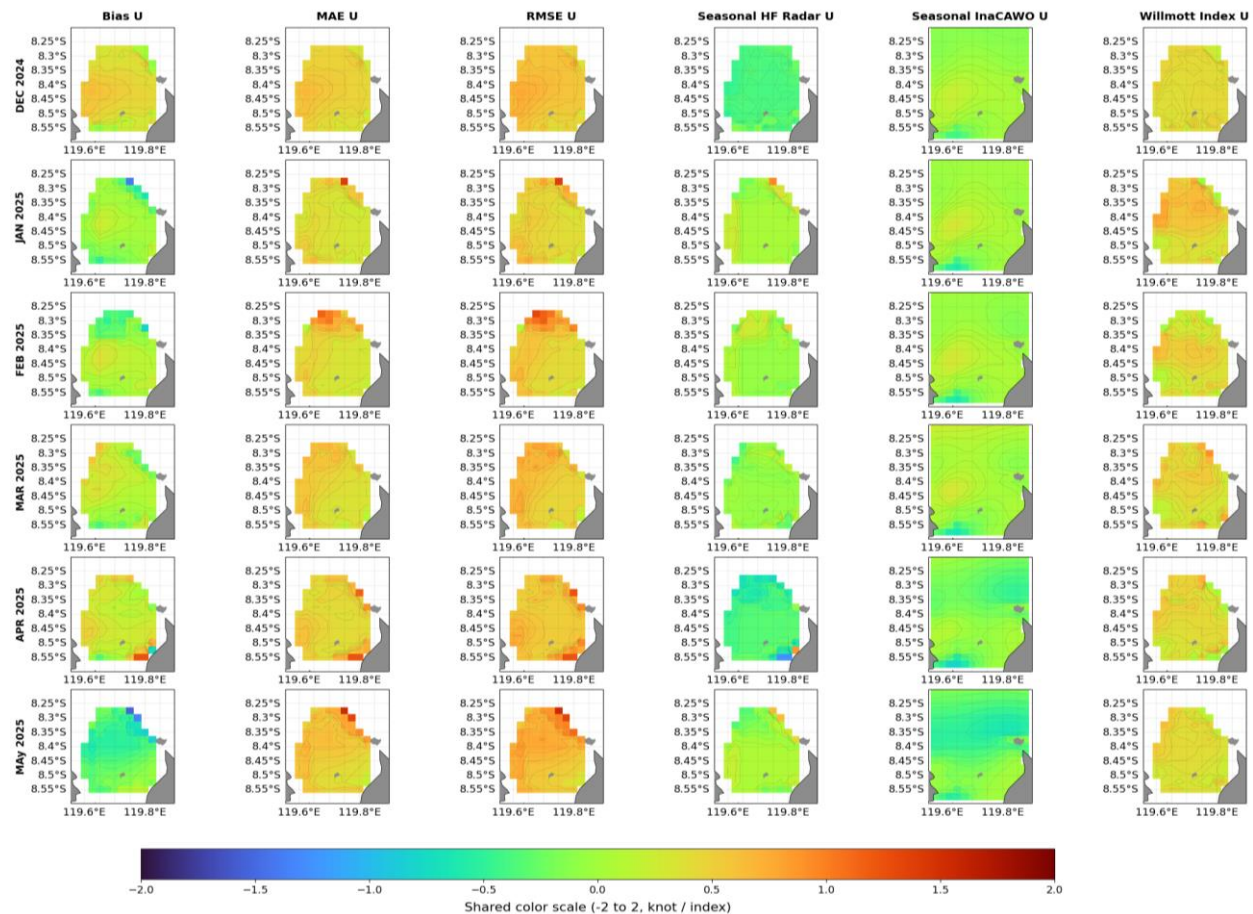
Perbedaan ini kemungkinan berkaitan dengan kompleksitas dinamika perairan Labuan Bajo yang dipengaruhi oleh topografi, bentuk garis pantai, aliran antar-selat, pasang surut, dan angin lokal. HF Radar sebagai observasi permukaan dapat menangkap variasi lokal secara lebih langsung, sedangkan model numerik dapat mengalami keterbatasan akibat resolusi spasial, parameterisasi proses fisis, atau representasi forcing yang belum sepenuhnya sesuai dengan kondisi lokal.

Dengan demikian, gambar ini menunjukkan bahwa InaCAWO mampu menggambarkan keberadaan arus permukaan secara umum, tetapi masih cenderung mengestimasi kecepatan arus lebih rendah dan belum optimal dalam menangkap puncak serta variasi temporal harian yang diamati oleh HF Radar. Oleh karena itu, evaluasi InaCAWO perlu dilengkapi dengan distribusi spasial galat untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

4.3 Verifikasi bulanan komponen *u* arus laut permukaan

Analisis verifikasi bulanan terhadap komponen *zonal* (*u*) dilakukan untuk memahami karakteristik spasial dan variasi musiman dari komponen arus laut permukaan. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi

kemampuan model InaCAWO dalam merepresentasikan distribusi arus arah timur-barat dibandingkan dengan observasi HF Radar pada setiap periode bulanan. Pendekatan ini penting untuk mengidentifikasi pola bias spasial, perubahan intensitas arus, serta konsistensi model dalam menangkap dinamika musiman di wilayah kajian. Hasil analisis disajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Verifikasi bulanan komponen *zonal* (*u*) arus laut permukaan InaCAWO dan HF Radar.

Distribusi spasial bulanan hasil verifikasi komponen *zonal* (*u*) arus laut permukaan antara model InaCAWO dan HF Radar Labuan Bajo selama periode Desember 2024 hingga Mei 2025 diperlihatkan pada Gambar 6. Komponen *zonal* (*u*) merepresentasikan arus arah timur-barat, dengan nilai positif menunjukkan kecenderungan arus ke timur dan nilai negatif menunjukkan kecenderungan arus ke barat. Secara umum, gambar ini menunjukkan bahwa performa InaCAWO dalam merepresentasikan komponen *U* bervariasi baik secara spasial maupun temporal.

Distribusi Bias komponen *zonal* (*u*) arus laut permukaan menunjukkan bahwa perbedaan antara InaCAWO dan HF Radar tidak seragam di seluruh domain. Pada Desember 2024, bias cenderung positif lemah hingga sedang, yang mengindikasikan bahwa InaCAWO sedikit lebih tinggi dibandingkan HF Radar. Pada Januari hingga April 2025, pola bias lebih bervariasi, dengan nilai positif dan negatif lemah yang tersebar di beberapa area. Pada Mei 2025, bias negatif lebih terlihat di bagian utara hingga barat laut domain, menunjukkan kecenderungan InaCAWO mengestimasi komponen *U* lebih rendah dibandingkan HF Radar.

Nilai MAE komponen *zonal* (*u*) dan RMSE komponen *zonal* (*u*) arus laut permukaan memperlihatkan adanya galat yang cukup jelas pada beberapa area, terutama di bagian utara, timur laut, dan sebagian selatan domain. RMSE yang umumnya lebih tinggi dibandingkan MAE menunjukkan adanya lokasi atau kejadian tertentu dengan selisih komponen *u* yang cukup besar antara model dan observasi. Pola ini menandakan bahwa kesalahan model tidak hanya terjadi secara rata-rata, tetapi juga dipengaruhi oleh variasi spasial lokal.

Perbandingan rata-rata komponen *u* dari HF Radar dan InaCAWO menunjukkan bahwa HF Radar menangkap pola yang lebih lokal dan tidak homogen, sedangkan InaCAWO menghasilkan pola yang lebih halus dan kontinu. Hal ini menunjukkan bahwa InaCAWO mampu menggambarkan pola umum arus *zonal*, tetapi belum sepenuhnya merepresentasikan variasi lokal yang terdeteksi oleh HF Radar.

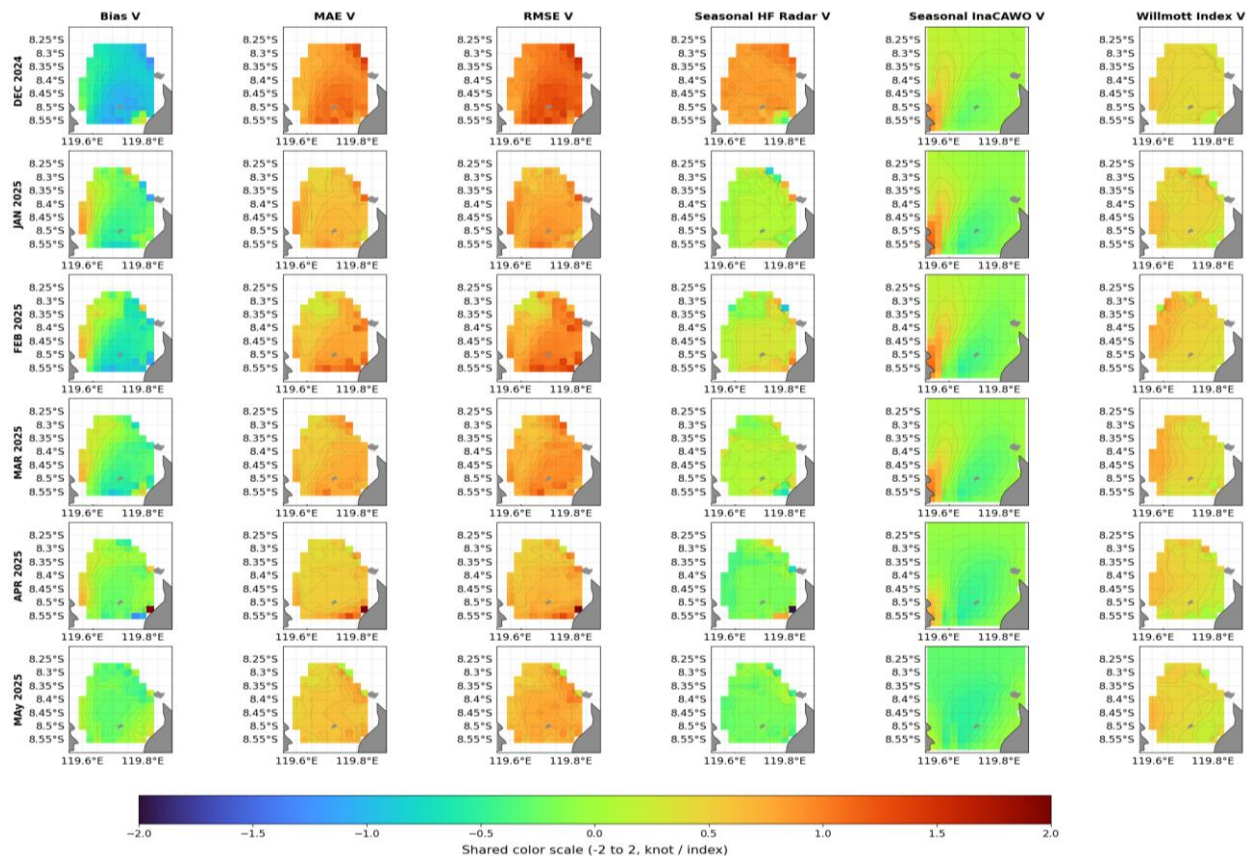
Nilai Willmott *Index* komponen *zonal* (*u*) arus laut permukaan secara umum menunjukkan tingkat kesesuaian yang sedang, namun tidak merata di seluruh domain dan bulan. Area dengan nilai Willmott lebih tinggi menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik terhadap observasi, sedangkan area dengan nilai lebih rendah menunjukkan ketidaksesuaian yang lebih besar. Pola ini mengindikasikan bahwa performa InaCAWO untuk komponen *u* sangat dipengaruhi oleh lokasi dan dinamika lokal.

Secara oseanografis, perbedaan tersebut kemungkinan berkaitan dengan kompleksitas perairan Labuan Bajo yang dipengaruhi oleh bentuk garis pantai, topografi dasar laut, aliran antar-selat, pasang surut, dan variasi angin lokal. Faktor-faktor ini dapat menghasilkan perubahan arus skala kecil yang sulit direpresentasikan secara optimal oleh model numerik.

Secara keseluruhan, InaCAWO mampu merepresentasikan pola umum komponen arus *zonal* di wilayah Labuan Bajo, tetapi masih menunjukkan galat pada beberapa bulan dan lokasi tertentu. Oleh karena itu, verifikasi komponen *u* penting untuk melengkapi analisis magnitudo arus, karena kesalahan pada komponen timur-barat dapat memengaruhi interpretasi arah dan transport arus permukaan secara keseluruhan.

4.4 Verifikasi bulanan komponen meridional (*v*) arus laut permukaan

Evaluasi dilakukan untuk melengkapi analisis verifikasi arus permukaan terhadap komponen meridional (*v*) arus laut permukaan yang merepresentasikan pergerakan arus arah utara–selatan. Analisis ini bertujuan untuk menilai kemampuan model InaCAWO dalam mereproduksi variasi spasial komponen *meridional* dibandingkan dengan observasi HF Radar pada skala bulanan. Fokus evaluasi diarahkan pada identifikasi pola distribusi arus, perbedaan intensitas antara model dan observasi, serta konsistensi representasi dinamika musiman di wilayah kajian. Hasil analisis disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Verifikasi bulanan komponen komponen meridional (*v*) arus laut permukaan InaCAWO dan HF Radar.

Nilai MAE komponen meridional (v) dan RMSE komponen meridional (v) arus laut permukaan menunjukkan bahwa galat komponen v cukup menonjol pada beberapa wilayah, khususnya di bagian timur laut, selatan, dan sebagian tepi domain. RMSE umumnya lebih tinggi dibandingkan MAE, yang menunjukkan bahwa terdapat lokasi atau periode tertentu dengan selisih yang cukup besar antara InaCAWO dan HF Radar. Pola galat yang relatif tinggi pada Desember 2024 hingga Maret 2025 mengindikasikan bahwa representasi komponen v oleh model masih memiliki ketidakpastian yang cukup besar, terutama pada wilayah dengan variasi arus yang lebih kuat.

Perbandingan rata-rata komponen v dari HF Radar dan InaCAWO menunjukkan perbedaan pola spasial yang cukup jelas. HF Radar memperlihatkan nilai komponen meridional (v) arus laut permukaan yang relatif lebih tinggi pada beberapa area, terutama pada bagian utara hingga timur laut domain, sedangkan InaCAWO menghasilkan pola yang lebih halus dan cenderung lebih lemah. Pola InaCAWO yang lebih kontinu menunjukkan karakter umum model numerik yang merepresentasikan dinamika arus dalam skala grid, sementara HF Radar lebih mampu menangkap variasi lokal arus permukaan.

Nilai Willmott *Index* komponen meridional (v) arus laut permukaan secara umum menunjukkan tingkat kesesuaian yang sedang, tetapi tidak merata antarbulan dan antarwilayah. Beberapa area memperlihatkan nilai indeks yang relatif lebih baik, sedangkan area lain menunjukkan kesesuaian yang lebih rendah. Pola ini mengindikasikan bahwa kemampuan InaCAWO dalam merepresentasikan komponen v sangat bergantung pada lokasi dan kondisi dinamika lokal. Area dengan MAE dan RMSE yang tinggi cenderung menunjukkan kesesuaian model yang lebih rendah terhadap observasi.

Secara oseanografis, perbedaan antara InaCAWO dan HF Radar pada komponen v kemungkinan berkaitan dengan kompleksitas dinamika perairan Labuan Bajo. Wilayah ini dipengaruhi oleh konfigurasi pesisir dan kepulauan, topografi dasar laut, aliran antar-selat, pasang surut, serta variabilitas angin lokal. Faktor-faktor tersebut dapat menghasilkan perubahan arah utara-selatan dalam skala spasial kecil yang sulit direpresentasikan secara optimal oleh model numerik.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa InaCAWO mampu menggambarkan pola umum komponen arus *meridional*, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam menangkap intensitas dan variasi lokal yang diamati oleh HF Radar. Bias negatif yang cukup dominan, nilai MAE dan RMSE yang relatif tinggi pada beberapa area, serta variasi Willmott *Index* menunjukkan bahwa komponen v merupakan salah satu sumber ketidakpastian penting dalam verifikasi arus permukaan InaCAWO di wilayah Labuan Bajo.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil verifikasi luaran arus laut permukaan model InaCAWO terhadap data HF Radar Labuan Bajo selama periode 1 Desember 2024 hingga 31 Mei 2025, InaCAWO mampu merepresentasikan pola umum arus laut permukaan di wilayah kajian, tetapi masih memiliki keterbatasan dalam menggambarkan intensitas, arah, dan variabilitas lokal secara detail. Hal ini didukung oleh bias sebesar $-0,34$ knot, RMSE sebesar $0,41$ knot, dan korelasi R sebesar $0,25$, yang mengindikasikan bahwa model cenderung memiliki nilai prediksi di bawah nilai observasi serta masih lemah dalam menangkap variasi temporal kecepatan arus permukaan. Verifikasi bulanan terhadap komponen *zonal* (u) arus laut permukaan menunjukkan bahwa InaCAWO masih dapat menggambarkan pola umum arus *zonal*, meskipun terdapat galat pada beberapa bulan dan lokasi tertentu. Sementara itu, pada komponen *meridional* (v) arus laut permukaan, kecenderungan nilai prediksi di bawah nilai observasi lebih dominan, terutama pada Desember 2024 hingga Maret 2025, sehingga komponen *meridional* menjadi salah satu sumber ketidakpastian penting dalam hasil verifikasi. Secara keseluruhan, InaCAWO dapat digunakan sebagai gambaran awal kondisi arus laut permukaan di perairan Labuan Bajo, tetapi masih memerlukan evaluasi dan penyempurnaan lebih lanjut, khususnya dalam merepresentasikan dinamika arus lokal yang dipengaruhi oleh kompleksitas pesisir, topografi, aliran antar-selat, pasang surut, dan variasi angin.

Deklarasi Kepentingan Bersaing

Penulis menyatakan bahwa tidak ada kepentingan pribadi, finansial, atau profesional yang dapat memengaruhi hasil atau interpretasi penelitian ini.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami ucapkan kepada seluruh civitas Akademik Sekolah Tinggi Meteorologi

Klimatologi dan Geofisika khususnya program studi Meteorologi atas bantuan ilmu dan bimbingan dalam penulisan ini.

Pustaka

- [1] L. Jumhuriyah, D. C. R. Novitasari, F. Setiawan and A. Sunan 2020 Prediksi kecepatan arus laut dengan menggunakan metode backpropagation (studi kasus: Labuhan Bajo), *J. Inform.*, **1**(1) 99–108.
- [2] H. I. Akbar, G. Harsono, B. Sutejo, T. A. Pianto, A. W. Rudiastuti, W. Ambarwulan et al 2023 Studi pendahuluan pengaruh arus laut musiman terhadap waktu tempuh kapal melalui perairan Selat Lombok, *J. Hidrografi Indones.* **5**(2) 91–98.
- [3] Nadira A I, Ismanto A, Hakim A R and Ramdhani A 2023 Tinjauan Pengaruh Pasang Surut Terhadap Arus Permukaan Menggunakan Data HF Radar di Perairan Selat Sunda Indones. *J. Oceanogr.* **5** 256–64.
- [4] R Firdaus et al 2021 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* **893** 012053.
- [5] BMKG 2025 Indonesia Coupled Atmosphere–Wave–Ocean Model (InaCAWO) Available at: <https://peta-maritim.bmkg.go.id/cawo-static/> (Accessed: 2 February 2026).
- [6] Pramesti A R, Zahrina W N, Yanfeto B and Agassi R N 2024 Pemodelan Arus Pasang Surut dan Gelombang 2D Menggunakan Metode Numerik dengan Flow Model dan Spectral Wave Software Mike 21 Di Perairan Pulau Rote pada Bulan Juni 2023: 2D Tidal and Wave Modeling using Numerical Methods with Flow Model and Spectral Wave Software Mike 21 in The Waters of Rote Island in June 2023 *J. Hidrogr. Indones.* **5** 81–90.
- [7] A. Joe 2020 Numerical weather prediction: synopsis *J. Climatol.* Weather Forecast. **8** 266.
- [8] D. S. Wilks 2020 *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences Elsevier*.
- [9] Adithya Vemuri et al 2024 *J. Phys.: Conf. Ser.* **2767** 052032.
- [10] Mujiasih S, Beckers J-M and Barth A 2021 Implementation and Validating of the Regional Ocean Model System (ROMS) for the Sunda Strait Connecting the Java Sea to the Indian Ocean EGU Gen. Assem. 2021 (online, 19–30 Apr) EGU21-3457.
- [11] Tsanyfadhila S, Ismanto A and Helmi M 2022 Karakteristik Arus Laut Permukaan dari High Frequency Radar pada Musim Timur di Selat Bali *J. Kelautan Trop.* **25** 279–90.
- [12] Sri Suharyo O 2018 Rancang Bangun Alat Pengukur Gelombang Permukaan Laut Presisi Tinggi (A Prototype Design) *Appl. Technol. Comput. Sci. J.* **1** 18–29.
- [13] Horstmann J and Dzvonnkovskaya A 2021 High Frequency Radar *Springer Handb. Atmos. Meas.* ed T Foken (Cham: Springer).
- [14] Juliana J, Ondeng S and Rahman U 2026 Konsep Dasar Penelitian Kuantitatif *J. Pendidik. Tambusai* **10** 140–6
- [15] ITU 2015 Characteristics of and protection criteria for radars operating in the radiodetermination service in the frequency band 1215–1400 MHz.
- [15] Tari G and Hasanuddin Z B 2021 Desain dan Simulasi Antena Yagi-Uda untuk Aplikasi Radar Maritim pada Frekuensi 28 MHz *Dewantara J. Technol.* **1** 139–43.
- [16] Karunasingha D S K 2022 Root Mean Square Error or Mean Absolute Error? Use Their Ratio as Well *Inf. Sci.* **585** 609–29.
- [17] Wati K S, Osawa T and Karang I W G A 2023 Estimating Surface Current from HIMAWARI-8 SST Data using Particle Image Velocimetry Method (Case Study in The Flores Sea) *Indones. J. Appl. Phys.* **13** 289–304.