

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia dengan wilayah perairan yang mencapai sekitar 70% dari total luas wilayahnya. Kondisi geografis ini menjadikan sektor kelautan sebagai tulang punggung ekonomi nasional, khususnya dalam bidang pelayaran, perikanan, dan perdagangan maritim. Aktivitas maritim di perairan Indonesia sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan laut, terutama kecepatan dan arah angin yang secara langsung mempengaruhi tinggi gelombang, arus laut, dan keselamatan navigasi [1]. Kecepatan angin merupakan parameter meteorologi kritis yang menjadi fokus utama dalam prakiraan cuaca maritim karena dampaknya terhadap keselamatan pelayaran dan efisiensi operasional pelabuhan. Peramalan kecepatan angin yang akurat terbukti penting untuk menghindari pemborosan energi dan kerugian operasional pada pembangkit listrik tenaga bayu [2].

Provinsi Kepulauan Riau, khususnya perairan di sekitar Batam, Bintan, dan Karimun, merupakan salah satu jalur pelayaran tersibuk di Indonesia yang menghubungkan Selat Malaka dengan Laut Cina Selatan. Perairan ini mengalami variabilitas angin yang tinggi dengan pola semi-periodik yang dipengaruhi oleh pergantian musim monsun. Pada musim barat (Desember-Februari), kecepatan angin dapat mencapai 15-25 knots dengan arah dominan dari barat laut, sedangkan pada musim timur (Juni-Agustus) angin bertiup dari tenggara dengan kecepatan 10-20 knots [1]. Karakteristik angin yang tidak sepenuhnya periodik ini, dengan sekitar 60% pola teratur akibat pengaruh monsun dan 40% pola irregular akibat cuaca lokal, menjadi tantangan tersendiri dalam upaya prediksi yang akurat [3]. Ketidakmampuan memprediksi perubahan angin secara tepat dapat berdampak serius, mulai dari keterlambatan operasional pelabuhan, risiko kecelakaan maritim, hingga kerugian ekonomi pada sektor perikanan dan transportasi laut.

Dalam beberapa tahun terakhir, metode *deep learning* telah menunjukkan kemajuan signifikan dalam prediksi parameter cuaca berbasis data deret waktu. Perbandingan antara model *point-wise machine learning* konvensional dengan

model *deep learning* berbasis korelasi temporal menunjukkan bahwa BiLSTM menghasilkan akurasi tertinggi dibandingkan model konvensional seperti ARIMA, SVM, dan *Decision Tree* dalam prediksi kecepatan angin horizontal, membuktikan keunggulan arsitektur *bidirectional* dalam menangkap dependensi temporal dua arah [4]. Pendekatan lain mengintegrasikan *Automatic Weather Observing System* (AWOS) dan model regresi linear untuk memprediksi kecepatan angin 12 jam ke depan, dengan RMSE 0,63 hingga 3,07 untuk berbagai parameter kecepatan angin [5]. Salah satu varian LSTM yang semakin populer adalah Bidirectional LSTM (BiLSTM), yang mampu menangkap dependensi temporal dari dua arah (masa lalu dan masa depan) sehingga meningkatkan akurasi prediksi pada data deret waktu [6][7]. Namun, RNN dan variannya termasuk BiLSTM memiliki keterbatasan dalam menangani data dengan panjang sekuens yang sangat panjang dan kompleksitas komputasi yang tinggi dengan *time complexity* $O(Ld^2)$ dimana L adalah panjang sekuens dan d adalah dimensi *hidden state* [8].

Sebagai solusi atas keterbatasan tersebut, arsitektur berbasis *Transformer* telah dikembangkan untuk prediksi deret waktu jangka panjang. Salah satu inovasi terkini adalah *Informer*, yang diperkenalkan oleh Zhou et al. pada tahun 2021 dan memenangkan penghargaan *Best Paper Award* di konferensi AAAI 2021. *Informer* dirancang khusus untuk *Long-term Time Series Forecasting* (LTSF) dengan mekanisme *ProbSparse self-attention* yang mengurangi kompleksitas komputasi menjadi $O(L \log L)$, sehingga lebih efisien untuk dataset besar dan sekuens panjang [9]. Model berbasis *patch* terbukti dapat meningkatkan performa *Informer* hingga 21% dalam prediksi deret waktu dibandingkan model *Transformer* konvensional [10]. *Informer* juga telah diterapkan untuk prediksi temperatur menggunakan data *Automatic Weather Station* (AWS) dan *Local Data Assimilation and Prediction System* (LDAPS), dengan reduksi RMSE sebesar 0,25 °C dan MAE sebesar 0,203 °C dibandingkan model CNN-BLSTM untuk prediksi 6 hingga 336 jam ke depan, membuktikan kemampuan *Informer* menangkap pola temporal kompleks dalam variabel meteorologi [11].

Meskipun demikian, efektivitas *Transformer* untuk prediksi deret waktu masih menjadi perdebatan. Studi analitis menunjukkan bahwa pada beberapa kasus, model linear sederhana dapat mengalahkan *Transformer* akibat sifat

permutation-invariant dari mekanisme *self-attention* yang dapat menghilangkan informasi urutan temporal [12]. Hal ini mengindikasikan bahwa pemilihan model harus disesuaikan dengan karakteristik data yang digunakan. Di sisi lain, dengan arsitektur yang tepat, LSTM masih mampu bersaing dengan Transformer untuk tugas prediksi deret waktu tertentu [8]. Penelitian-penelitian sebelumnya di Indonesia lebih banyak berfokus pada aplikasi LSTM untuk prediksi harga saham, harga bahan pokok, beban listrik, atau parameter cuaca di wilayah daratan [13][14][15] namun belum ada yang secara khusus membandingkan Informer dengan BiLSTM untuk prediksi angin.

Salah satu sistem prakiraan cuaca numerik (*Numerical Weather Prediction/NWP*) konvensional yang paling banyak digunakan secara global adalah *Global Forecast System* (GFS), yang dikembangkan oleh *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) melalui *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). GFS bekerja dengan menyelesaikan persamaan-persamaan fisika atmosfer secara numerik pada grid global dengan resolusi horizontal hingga 13 km dan menghasilkan prakiraan hingga 16 hari ke depan dengan pembaruan empat kali sehari [16]. Meskipun akurat pada skala global, sistem NWP seperti GFS membutuhkan infrastruktur komputasi yang sangat besar dan belum tentu merepresentasikan karakteristik angin lokal secara optimal, khususnya di wilayah perairan dengan variabilitas tinggi seperti Kepulauan Riau [17].

Pendekatan berbasis *data-driven* seperti Informer dan BiLSTM hadir sebagai alternatif terhadap sistem NWP konvensional. Alih-alih memodelkan dinamika atmosfer secara eksplisit melalui persamaan fisika, model *deep learning* mempelajari pola langsung dari data historis observasi sehingga lebih adaptif terhadap karakteristik lokal dan tidak bergantung pada infrastruktur komputasi berskala besar [17][16]. Penelitian terkini menunjukkan bahwa pendekatan *data-driven* mampu meningkatkan akurasi prediksi kecepatan dan arah angin hingga lebih dari 50% dibandingkan keluaran model GFS langsung pada wilayah maritim tertentu [18].

Hingga saat ini belum ada penelitian yang secara khusus membandingkan performa Informer dan BiLSTM untuk prediksi kecepatan dan arah angin di perairan Indonesia, khususnya Kepulauan Riau. Data angin memiliki karakteristik unik berupa *sparse sampling* (interval 6 jam), dataset yang dikumpulkan dari peta angin BMKG, dan pola semi-periodik yang mencerminkan kondisi meteorologi maritim tropis. Penelitian ini hadir untuk mengisi *gap* tersebut dengan memanfaatkan data observasi BMKG periode 2023-2025, memberikan kontribusi ilmiah dalam pemilihan model *deep learning* yang optimal untuk prediksi angin di Indonesia, sekaligus memberikan rekomendasi praktis bagi BMKG dan *stakeholder* maritim dalam pengambilan keputusan operasional.

B. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana performa model Informer dalam memprediksi kecepatan dan arah angin di perairan Kepulauan Riau?
2. Bagaimana performa model BiLSTM dalam memprediksi kecepatan dan arah angin di perairan Kepulauan Riau?
3. Model mana yang memberikan akurasi prediksi lebih baik antara Informer dan BiLSTM untuk kasus prediksi angin dengan data *sparse* dan semi-periodik?

C. Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, batasan penelitian ditetapkan sebagai berikut:

1. Data yang digunakan bersumber dari Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Kota Tanjungpinang, mencakup periode 1 Januari 2023 hingga 31 Desember 2025.
2. Variabel yang diprediksi adalah kecepatan angin (dalam satuan knots) dan arah angin (dalam derajat) dengan interval observasi setiap 6 jam (4 kali per hari).

3. Metode yang dibandingkan terbatas pada Informer dan BiLSTM, tanpa melibatkan arsitektur lain.
4. Evaluasi model menggunakan metrik *Mean Absolute Error* (MAE), *Root Mean Square Error* (RMSE), dan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE).
5. Penelitian ini tidak mencakup analisis dampak prediksi angin terhadap tinggi gelombang atau parameter oseanografi lainnya.
6. Data observasi diekstraksi dari 4 titik pengamatan tetap pada peta angin BMKG di perairan Kepulauan Riau, dengan koordinat T1 (5,9722°N, 106,9621°E), T2 (5,9491°N, 107,1699°E), T3 (5,7870°N, 106,9621°E), T4 (5,7755°N, 107,1699°E). Data yang diekstraksi berupa vektor angin yang terdiri dari komponen kecepatan angin (dalam satuan knots) dan arah angin (dalam derajat), sesuai dengan format peta angin BMKG.

D. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis performa model Informer dalam memprediksi kecepatan dan arah angin di perairan Kepulauan Riau menggunakan data BMKG periode 2023-2025.
2. Menganalisis performa model BiLSTM dalam memprediksi kecepatan dan arah angin di perairan Kepulauan Riau menggunakan data BMKG periode 2023-2025.
3. Membandingkan akurasi prediksi antara model Informer dan BiLSTM berdasarkan metrik evaluasi MAE, RMSE, dan MAPE untuk menentukan model yang paling optimal dalam memprediksi kecepatan dan arah angin.

E. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Manfaat Akademis

- a. Memberikan kontribusi ilmiah dalam bidang meteorologi maritim dan *deep learning* dengan membandingkan arsitektur *Transformer* (Informer) dan RNN (BiLSTM) pada data angin laut Indonesia.
- b. Menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan prediksi variabel meteorologi maritim menggunakan metode *time series forecasting*.

2. Manfaat Praktis

- a. Memberikan rekomendasi model prediksi angin yang optimal untuk BMKG dalam meningkatkan akurasi prakiraan cuaca maritim di wilayah Kepulauan Riau.
- b. Mendukung pengambilan keputusan operasional bagi pelaku industri maritim seperti pelayaran, perikanan, dan manajemen pelabuhan dalam mengantisipasi kondisi cuaca yang dapat mempengaruhi keselamatan dan efisiensi operasional.
- c. Menyediakan dasar ilmiah untuk pengembangan sistem prediksi angin yang lebih akurat bagi masyarakat pesisir dan nelayan di wilayah Kepulauan Riau.