

BAB V

PENUTUP

Bab ini menyajikan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan mengenai Analisis Prediksi Emisi Karbon Dioksida Kendaraan Bermotor menggunakan Algoritma Hibrida LSTM dan ARIMA. Kesimpulan yang diuraikan didasarkan pada hasil analisis dan evaluasi performa model dalam menganalisis Total Emisi CO₂. Selain itu, pada bagian ini juga diberikan beberapa saran pengembangan yang dapat dijadikan referensi bagi penelitian selanjutnya untuk meningkatkan efektivitas dan penerapan model prediksi dalam konteks yang lebih luas.

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini dilakukan untuk melihat bagaimana penerapan model Hibrida LSTM dan ARIMA dalam memprediksi Emisi CO₂ kendaraan bermotor, dengan fokus pada tingkat akurasi, evaluasi performa, dan tingkat kesalahan dari model tersebut. Peninjauan atas luaran eksperimen dan analisis data menunjukkan beberapa kesimpulan esensial yang dijabarkan berikut ini.

1. Model Hibrida LSTM dan ARIMA mampu memprediksi Emisi CO₂ Kendaraan Bermotor dengan tingkat akurasi yang cukup baik. Pada skenario terbaik (data latih 70%, learning rate 0.01), model mencatat nilai evaluasi MAE sebesar 0.0941, MAPE 10.20%, dan RMSE 0.1081. Hal ini menunjukkan bahwa model berhasil mengintegrasikan keunggulan ARIMA dalam menangani pola linier dan LSTM dalam mengolah pola non-linier dari residual, sehingga mampu mengadaptasi pola data Emisi CO₂ yang kompleks.
2. Meski demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa model hibrida belum mampu menghasilkan performa prediksi yang lebih unggul dibandingkan model ARIMA dan LSTM secara tunggal. Model ARIMA mencatat performa terbaik dengan MAE 0.0847, MAPE 9.21%, dan RMSE 0.0965, sementara model LSTM mencatat MAE 0.0912, MAPE 9.93%, dan RMSE 0.1032. Ini

mengindikasikan bahwa pemanfaatan residual dari ARIMA sebagai input LSTM masih dapat dioptimalkan.

3. Salah satu keterbatasan yang memengaruhi hasil penerapan model hibrida adalah jumlah data yang terbatas serta minimnya variasi fitur pada *dataset* yang digunakan. Jika dibandingkan dengan dataset yang digunakan dalam beberapa jurnal acuan, data yang digunakan dalam penelitian ini memiliki jumlah observasi dan atribut yang lebih sedikit, sehingga mengurangi kemampuan model dalam menangkap pola-pola kompleks dan jangka panjang secara maksimal.
4. Meskipun belum menunjukkan performa tertinggi, model hibrida ARIMA-LSTM tetap memiliki potensi sebagai pendekatan yang adaptif dan fleksibel, terutama untuk data deret waktu yang memiliki karakteristik linier dan non-linier secara bersamaan. Model ini akan lebih optimal bila diterapkan pada dataset yang lebih besar, kaya fitur, dan memiliki pola residual yang lebih jelas.
5. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan model Hibrida LSTM dan ARIMA dapat dijadikan pendekatan alternatif dalam prediksi emisi CO₂ kendaraan bermotor, dengan hasil evaluasi yang tergolong baik dan tingkat kesalahan yang masih dalam batas wajar. Hasil ini juga membuka peluang untuk pengembangan lanjutan, baik dalam aspek arsitektur model, *preprocessing* data, maupun strategi pelatihan, guna mencapai performa prediktif yang lebih tinggi.

5.2 Saran Pengembangan

Berdasarkan hasil yang diperoleh dalam penelitian ini, terdapat beberapa hal yang dapat disarankan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang, khususnya dalam penerapan model Hibrida LSTM dan ARIMA untuk prediksi emisi CO₂ kendaraan bermotor. Adapun saran-saran tersebut adalah sebagai berikut.

1. Peningkatan dan pengoptimalan arsitektur model LSTM yang dapat dilakukan dengan mengeksplorasi struktur arsitektur jaringan yang lebih kompleks, seperti menambah jumlah lapisan (*layer*), jumlah unit LSTM pada masing-masing *layer*, serta menggunakan berbagai jenis *optimizer* (misalnya

Adam, RMSprop) dan teknik regularisasi seperti *dropout* atau *L2 Regularization*. Tujuannya adalah untuk meningkatkan kapasitas pembelajaran model sekaligus mengurangi risiko *overfitting* pada data latih.

2. Mengingat hasil performa model hibrida dalam penelitian ini belum melampaui performa model tunggal, maka pendekatan hibrida perlu disempurnakan. Salah satu aspek penting yang perlu diperhatikan adalah pada tahap pengolahan residual ARIMA, termasuk cara residual diolah dan digunakan sebagai *input* LSTM, serta penyesuaian parameter di kedua model. Dengan strategi hibrida yang lebih adaptif, diharapkan performa keseluruhan dapat ditingkatkan.
3. Salah satu faktor yang turut memengaruhi performa model dalam penelitian ini adalah keterbatasan data. Oleh karena itu, penggunaan dataset yang lebih besar dengan variasi kondisi yang lebih beragam misalnya dengan mencakup fitur eksternal seperti cuaca, kondisi lalu lintas, jenis bahan bakar, usia kendaraan, dan sebagainya dapat meningkatkan kompleksitas serta ketepatan model dalam mengenali pola emisi yang lebih realistis.
4. Penelitian ini menggunakan MAE, MAPE, dan RMSE sebagai metrik utama. Ke depannya, disarankan untuk menambahkan metrik lain seperti R^2 (koefisien determinasi) dan MSE (*Mean Squared Error*) untuk memberikan perspektif evaluasi model yang lebih menyeluruh, baik dari sisi sebaran kesalahan maupun tingkat variasi yang dapat dijelaskan oleh model.
5. Model hibrida ini memiliki potensi untuk diterapkan dalam sistem *monitoring* emisi kendaraan secara langsung. Oleh karena itu, penelitian lanjutan dapat mengarah pada pengembangan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT) atau aplikasi *mobile*, agar hasil prediksi dapat dimanfaatkan secara praktis oleh pengguna, instansi, maupun pembuat kebijakan.
6. Dalam skenario pemantauan waktu nyata, sangat penting untuk memastikan kestabilan model terhadap data baru yang terus berkembang. Oleh sebab itu, evaluasi berkala serta pengujian robustness terhadap perubahan data perlu dilakukan agar model tetap relevan dan akurat dalam jangka panjang.