

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pencemaran udara merupakan isu global yang menimbulkan dampak multidimensional, mencakup aspek kesehatan manusia, kualitas lingkungan, serta stabilitas sosial dan ekonomi. Sejumlah penelitian telah menunjukkan bahwa paparan polutan udara berkaitan erat dengan meningkatnya risiko penyakit pernapasan dan kardiovaskular, penurunan kualitas lingkungan, serta kerugian ekonomi yang muncul akibat berkurangnya produktivitas dan meningkatnya beban pembiayaan kesehatan masyarakat. Di kawasan perkotaan, aktivitas manusia yang meliputi kegiatan industri dan pertanian, laju urbanisasi yang cepat, serta intensitas transportasi dan pembangunan infrastruktur yang terus meningkat menjadi pemicu utama tingginya tingkat pencemaran udara karena secara kolektif menghasilkan emisi polutan dalam jumlah signifikan (Manisalidis *et al.*, 2020; Syahputri *et al.*, 2023; Harmedi *et al.*, 2024). Paparan jangka panjang terhadap partikel dan gas beracun dapat menyebabkan gangguan pernapasan, kardiovaskular, bahkan kanker. Pencemaran udara terjadi ketika udara mengandung zat, energi, atau komponen lain dalam volume yang dapat membahayakan kesehatan makhluk hidup, kehidupan, serta mengganggu kenyamanan dan keseimbangan lingkungan. Menurut *World Health Organization* (2021), pencemaran udara adalah kontaminasi udara baik di luar maupun di dalam ruangan oleh agen

kimia, fisik, atau biologis yang mengubah sifat alami atmosfer, dan WHO menegaskan bahwa polusi udara merupakan salah satu risiko lingkungan terbesar bagi kesehatan manusia.

Berdasarkan data IQAir (2024), Indonesia memiliki rata-rata konsentrasi tahunan $PM_{2.5}$ sebesar $35,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, yang menempatkannya pada peringkat ke-15 dari 138 negara dengan tingkat pencemaran udara partikel halus tertinggi di dunia. Kondisi tersebut sebenarnya menunjukkan sedikit perbaikan dibanding tahun 2023 dan 2022, ketika laporan IQAir mencatat Indonesia sebagai negara dengan tingkat polusi udara terparah di Asia Tenggara, sekaligus salah satu yang paling tercemar di dunia. Pencemaran udara menjadi suatu permasalahan yang dialami oleh seluruh wilayah di Indonesia, salah satunya Kota Semarang. Polusi udara Kota Semarang berada dalam kategori sedang dan berada di urutan ke-10 sebagai kota dengan polusi udara terburuk sepanjang Agustus 2023. Oleh karena itu, upaya pengendalian pencemaran udara memerlukan langkah pencegahan, salah satunya melalui peramalan parameter polutan udara sehingga tindakan pengendalian dapat dilakukan lebih awal.

Beberapa studi menunjukkan bahwa keterbatasan jumlah stasiun pemantauan kualitas udara yang ada secara tradisional karena biaya tinggi dan penyebaran yang jarang menjadi hambatan utama dalam pemodelan dan peramalan kualitas udara di banyak kawasan urban, sehingga memperkuat kebutuhan akan metode prediksi di lokasi tanpa data pengukuran langsung (Zhou *et al.*, 2023). Berbagai penelitian kualitas udara menunjukkan bahwa model simulasi numerik seperti WRF-CMAQ tetap menjadi pendekatan

utama untuk memprediksi konsentrasi polutan di tingkat regional meskipun memiliki tantangan akurasi dan kebutuhan komputasi yang intensif, sementara kajian di kawasan Asia Tenggara masih jarang memanfaatkan model seperti WRF-Chem untuk mengidentifikasi sumber polusi utama di kota besar (Nguyen *et al.*, 2023). Model-model ini memiliki keterbatasan signifikan meskipun berbasis prinsip fisika atmosfer yang solid. Model tersebut memerlukan sumber daya komputasi yang besar, membutuhkan kalibrasi yang kompleks, dan sering kali menghasilkan ramalan yang kurang akurat untuk kondisi lokal. Hu *et al.* (2017) menemukan bahwa sistem WRF/CMAQ untuk simulasi kualitas udara di China sangat dipengaruhi oleh ketidakpastian dalam inventaris emisi.

Pendekatan *machine learning* dan *deep learning* telah banyak digunakan untuk meramalkan kualitas udara. Riset yang dilakukan oleh Yafouz *et al.* (2021) menunjukkan bahwa algoritma seperti *decision tree*, *support vector machine* (SVM), dan *neural network* mampu memprediksi konsentrasi ozon serta polutan lainnya dengan baik. Dalam beberapa tahun terakhir, model berbasis Recurrent Neural Network (RNN) seperti LSTM dan GRU semakin banyak digunakan karena kemampuannya dalam mengolah data deret waktu. Chung *et al.* (2014) menjelaskan bahwa model-model tersebut mampu menangkap pola temporal yang kompleks pada data polusi udara tanpa memerlukan rekayasa fitur manual yang intensif. Misalnya, Huang *et al.* (2025) menggunakan model *hybrid* yang menggabungkan *empirical mode decomposition* dengan LSTM dan GRU untuk meramalkan Indeks Standar Pencemar Udara (AQI) kota Taichung, dan menemukan

bahwa kombinasi GRU dengan dekomposisi sinyal memberikan akurasi tertinggi. Huang *et al.* (2025) juga mencatat arsitektur GRU yang lebih sederhana menguntungkan proses pelatihan sehingga konvergensinya lebih cepat dibanding LSTM.

Sejumlah penelitian di Indonesia telah menerapkan metode deep learning untuk peramalan kualitas udara. Karyadi *et al.* (2022) membandingkan kinerja LSTM, Bi-LSTM, dan GRU pada data suhu, kelembapan, PM10, dan ISPU di Kota Bandung dan melaporkan bahwa LSTM serta Bi-LSTM menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan GRU. Sejumlah penelitian lainnya mengintegrasikan teknologi *Internet of Things* (IoT) dengan teknik *machine learning* untuk pemantauan dan peramalan kualitas udara secara *real-time*. Yildiz dan Sucuoglu (2025) mengembangkan sistem peramalan kualitas udara berbasis IoT yang menggabungkan sensor real-time dengan algoritma prediksi dan menemukan bahwa model GRU memberikan performa prediksi yang tinggi dengan nilai R^2 di atas 0,93 pada berbagai parameter polutan, yang menunjukkan bahwa pendekatan GRU mampu mengikuti pola data sensor secara konsisten dan akurat. Azizah *et al.* (2025) juga mengimplementasikan sistem IoT untuk memantau parameter polutan seperti PM2.5, PM10, CO2, dan NO2 secara *real-time* guna menyediakan data yang dapat dianalisis menggunakan model machine learning untuk mendukung pengambilan keputusan lingkungan yang lebih efektif. Fonataba dan Julia (2023) mengevaluasi LSTM dan GRU pada enam parameter polutan di DKI Jakarta dan menemukan bahwa GRU memberikan hasil terbaik dengan akurasi sekitar 92%. Temuan-temuan

tersebut menunjukkan bahwa meskipun perbandingan performa antara LSTM dan GRU dapat berbeda antarstudi, GRU kerap muncul sebagai model yang kompetitif dan efektif untuk peramalan kualitas udara.

Kementerian Lingkungan Hidup menyampaikan informasi kualitas udara kepada masyarakat melalui Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU). Kementerian Lingkungan Hidup menetapkan ISPU sebagai indeks tak berdimensi yang merefleksikan kondisi udara ambien ditinjau dari potensi dampaknya terhadap kesehatan manusia maupun lingkungan. Nilai ISPU ditetapkan menggunakan tujuh parameter pencemar utama, yaitu PM10, PM2.5, NO₂, SO₂, CO, O₃, dan hidrokarbon (HC). Penelitian ini menghasilkan prediksi terhadap enam polutan utama tersebut sehingga memungkinkan perhitungan ISPU untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai kualitas udara di Kota Semarang. Hasil prediksi ini dapat dimanfaatkan sebagai sistem peringatan dini kualitas udara serta sebagai informasi pendukung bagi pemerintah daerah dalam merumuskan kebijakan pengendalian pencemaran udara dan penyampaian informasi risiko kesehatan kepada masyarakat. Selain itu, tinjauan literatur ini memastikan bahwa model GRU yang digunakan dapat dievaluasi secara konsisten dengan studi terdahulu dan hasil prediksinya dapat ditempatkan dalam kerangka kebijakan pengelolaan udara bersih di Indonesia.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana penerapan algoritma *Gated Recurrent Unit* (GRU) dalam memprediksi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Kota Semarang?

2. Bagaimana kinerja model *Gated Recurrent Unit* (GRU) dalam memprediksi Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Kota Semarang?
3. Bagaimana akurasi klasifikasi kategori kualitas udara yang dihasilkan dari prediksi nilai ISPU tersebut?

1.3 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya menggunakan metode prediksi *Gated Recurrent Unit* (GRU) tanpa melakukan perbandingan dengan metode prediksi lainnya.
2. Data yang digunakan adalah parameter kualitas udara di Kota Semarang dengan resolusi waktu per jam pada rentang 22 Oktober 2024 hingga 22 November 2025, yang diperoleh dari situs Weatherbit (<https://www.weatherbit.io/>).
3. Parameter kualitas udara yang digunakan meliputi PM10, PM2.5, O₃, SO₂, NO₂, dan CO.
4. Data parameter kualitas udara ditransformasikan secara langsung menjadi nilai Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) sebagai variabel target prediksi.
5. Proses pelatihan model GRU dalam penelitian ini menggunakan jumlah epoch sebanyak 200.
6. Metode komputasi yang diterapkan dalam penelitian ini dibatasi pada penggunaan algoritma GRU dalam proses pemodelan.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis penerapan algoritma *Gated Recurrent Unit* (GRU) dalam memprediksi nilai Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Kota Semarang.

2. Mengevaluasi kinerja model *Gated Recurrent Unit* dalam melakukan prediksi nilai Indeks Standar Pencemar Udara (ISPU) di Kota Semarang.
3. Menentukan kategori kualitas udara di Kota Semarang berdasarkan hasil prediksi nilai ISPU untuk memberikan informasi mengenai risiko kesehatan masyarakat.