

ABSTRAK

Konsentrasi karbon dioksida (CO₂) yang tinggi di ruang kelas berdampak negatif terhadap kenyamanan dan performa kognitif siswa/mahasiswa, dengan ambang 800–1000 ppm umum dipakai sebagai acuan kualitas udara yang masih dapat diterima [8]. Sistem pemantauan konvensional bersifat reaktif menampilkan kondisi saat ini tanpa memberi gambaran ke depan sehingga tindakan ventilasi baru diambil setelah kondisi memburuk, sementara pendekatan klasifikasi biner untuk peringatan dini rentan terhadap base rate kejadian pelampauan ambang yang sangat rendah sehingga sulit dilatih dan dievaluasi secara andal.

Penelitian ini bertujuan membangun model prediksi residual (perubahan) konsentrasi CO₂ 30 menit ke depan berbasis arsitektur Conv1D-GRU untuk mendukung peringatan dini kualitas udara ruang kelas. Audit base rate label klasifikasi pada data sensor IoT lima ruangan gedung SDE4, National University of Singapore (dataset ROBOD) dua ruang kuliah sebagai representasi ruang kelas, serta dua kantor dan satu perpustakaan sebagai pembanding generalisasi mengonfirmasi tingkat kejadian positif hanya 0,00–0,72%, sehingga pendekatan dialihkan ke regresi residual. Model dievaluasi dengan skema Leave-One-Room-Out (LORO), dibandingkan baseline persistence dan trend, diuji signifikansinya melalui paired block bootstrap, ablasi fitur okupansi, variabilitas tiga seed pelatihan, serta dievaluasi sebagai sistem alarm berbasis ambang keputusan dengan kalibrasi ulang dan pengujian ketahanan data, drift, dan latency.

Model Conv1D-GRU mencapai MAE 9,92 ppm ($R^2=0,877$), unggul signifikan secara statistik atas baseline persistence (MAE 10,63 ppm; bootstrap CI selisih MAE: 0,475–0,958 ppm) namun dengan perbaikan praktis kecil ($\pm 6,7\%$). Sebagai sistem alarm pada ambang 800 ppm, recall awal rendah (7,7%) akibat bias model meremehkan CO₂ rata-rata 125 ppm di sekitar kejadian nyata; kalibrasi ambang ke 765 ppm meningkatkan recall menjadi 48,7% dengan false alarm rate tetap rendah (0,11%). Model relatif tahan terhadap gangguan sensor (MAE memburuk maksimal 4,5% pada noise ekstrem) dengan latency inferensi rata-rata 82,4 ms per prediksi.

Hasil ini menunjukkan prediksi residual berbasis Conv1D-GRU mampu memberikan indikasi dini kualitas udara ruang kelas yang lebih baik secara statistik dibandingkan baseline naif, dengan generalisasi yang teruji lintas tipe ruangan. Meski demikian, perbaikan yang tergolong kecil, kontribusi fitur okupansi yang belum konklusif, dan recall alarm yang masih terbatas menempatkan model ini sebagai bukti awal (proof-of-concept) yang layak dikembangkan lebih lanjut, bukan sistem siap deployment produksi.

Kata Kunci: Prediksi Residual, CO₂, Conv1D, GRU, Peringatan Dini, Internet of Things, Kualitas Udara Ruang.