

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian terintegrasi yang telah dilakukan terhadap Sistem Verifikasi Ganda Akses Parkir Berbasis Deteksi Plat Nomor dan Pengenalan Pengemudi Menggunakan YOLO dan OCR pada Raspberry Pi 4, maka dapat ditarik beberapa kesimpulan fungsional sebagai berikut:

1. Keberhasilan Implementasi Arsitektur Edge-to-Server Skema komputasi terdistribusi berbasis Edge-to-Server berhasil diimplementasikan dengan memisahkan beban kerja akuisisi lapangan pada Raspberry Pi 4 Model B (sebagai edge terminal) dan beban inferensi model kecerdasan buatan pada laptop server lokal. Arsitektur ini terbukti efektif dalam memitigasi kendala keterbatasan fisik single-board computer. Selama pengujian intensif pada sesi pagi, siang, dan sore, suhu operasional CPU Raspberry Pi 4 tetap terjaga dalam batas aman tanpa mengalami overheating atau thermal throttling, dengan suhu harian rata-rata berkisar antara 47,35°C hingga 53,79°C.
2. Akurasi Tinggi pada Lokalisasi Spasial YOLOv8s Model deteksi objek YOLOv8s yang dilatih selama 100 epoch menggunakan optimizer AdamW ($lr_0 = 0,003646$, momentum = 0,897681, weight decay = 0,000120) menunjukkan performa lokalisasi spasial yang sangat baik pada data uji plat nomor. Evaluasi model menghasilkan nilai Precision sebesar 98,80%, Recall sebesar 95,38%, F1-Score sebesar 97,06%, dan mean Average Precision $mAP@0.5$ sebesar 97,20%. Model juga terbukti tangguh dalam mendeteksi dan mengabaikan gangguan objek non-target (background noise) di lapangan.

3. Keandalan Proteksi Sistem Verifikasi Ganda Pengujian terintegrasi di gerbang parkir dengan total $N = 80$ sampel transaksi keluar-masuk kendaraan menghasilkan tingkat Accuracy sebesar 91,25%, Recall sebesar 91,25%, dan F1-Score sebesar 95,42%. Sistem ini menghasilkan nilai Precision sebesar 100,00% (False Acceptance Rate atau FAR = 0%). Angka ini membuktikan bahwa mekanisme verifikasi ganda memiliki tingkat keamanan mutlak dalam menolak akses masuk jika terdapat ketidakcocokan antara nomor plat kendaraan yang terbaca oleh OCR dengan data wajah pengemudi terdaftar pada berkas basis data terserialisasi (.pkl).
4. Responsivitas Latensi Akhir-ke-Akhir (End-to-End Latency) Waktu tunggu pengendara secara riil di lapangan dari proses pengambilan foto hingga palang terbuka penuh (end-to-end response time) tercatat berada pada rentang harian rata-rata 1,95 hingga 3,81 detik (dengan rata-rata global di bawah 2,35 detik). Hasil tersebut berada di bawah batas kenyamanan sistem gerbang otomatis komersial (5,0 detik). Waktu tunda ini didominasi oleh latensi komputasi global di jaringan nirkabel lokal, sementara waktu transmisi perintah serial hanya berkisar 5,2 ms.
5. Stabilitas Kinetik Aktuator Palang Parkir Penerapan profil akselerasi trapezoidal (acceleration-deceleration ramp dengan frekuensi pulsa dinamis) pada firmware Arduino Nano sukses menghilangkan fenomena kehilangan langkah (skip-step) pada motor stepper NEMA 17 yang dikendalikan via driver TB6600. Pada konfigurasi microstepping 1/8 (400 pulsa aktual), palang parkir dapat berputar tegak tepat 90° secara halus dalam waktu 1,152 detik untuk siklus membuka (kecepatan puncak dengan delay 800 μ s) dan 1,600 detik untuk siklus menutup (kecepatan puncak dengan delay 1500 μ s), yang dipadukan dengan jeda penutupan otomatis berbasis non-blocking timer selama 5 detik.

5.2 Saran

Untuk meningkatkan keandalan, akurasi, serta cakupan operasional sistem di masa mendatang, beberapa saran perbaikan fungsional yang dapat diterapkan adalah sebagai berikut:

1. Pengembangan Sistem untuk Kondisi Malam Hari Sistem yang dirancang saat ini dibatasi hanya pada kondisi cahaya pagi dan siang hari. Guna memastikan sistem dapat beroperasi selama 24 jam penuh, penelitian selanjutnya perlu menambahkan iluminasi cahaya buatan yang adaptif (seperti inframerah atau floodlight eksternal) serta menyertakan dataset citra malam hari dalam proses pelatihan model deteksi.
2. Optimasi Algoritma OCR Terhadap Gangguan Pantulan Cahaya (Glare) Kasus kegagalan deteksi (False Negative) pada sesi siang hari umumnya dipicu oleh pantulan terik matahari (glare) pada sasis logam plat nomor kendaraan yang merusak kontras karakter alfanumerik. Penelitian berikutnya disarankan menggunakan filter polarisasi fisik (CPL filter) pada lensa kamera atau mengintegrasikan algoritma pra-pemrosesan restorasi citra adaptif (seperti metode dehazing atau histogram equalization lokal) sebelum citra dipotong masuk ke sub-modul OCR.
3. Integrasi Sensor Fisik Anti-Tabrak (Anti-Crush Safety) Siklus penutupan palang otomatis saat ini sepenuhnya mengandalkan penundaan waktu tunggu perangkat lunak (software timer selama 5 detik). Guna mengantisipasi risiko palang menabrak kendaraan yang terhenti di tengah gerbang, disarankan untuk mengintegrasikan sensor fisik tambahan seperti sensor ultrasonik, sensor inframerah, atau magnetic loop detector yang ditanam di bawah permukaan sasis jalan sebagai interlok pengaman palang.

4. Kuantisasi Model dan Akselerasi Hardware di Sisi Edge Untuk mereduksi waktu tunggu respons hingga di bawah 1,0 detik, disarankan untuk melakukan kuantisasi model deep learning ke format yang lebih ringan seperti ONNX atau TensorRT sebelum dieksekusi di server. Selain itu, penggunaan modul akselerator perangkat keras (seperti Google Coral USB Accelerator) langsung di lapangan dapat dieksplorasi agar proses inferensi sistem verifikasi ganda dapat berjalan secara mandiri (standalone edge processing) tanpa ketergantungan pada koneksi Wi-Fi eksternal.