

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan serangkaian tahapan perancangan, implementasi, evaluasi model, hingga pengujian lapangan sistem pendeteksi mastitis pada sapi perah, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Efisiensi Komputasi pada Edge Device Implementasi model Deep Learning YOLOv8 Nano pada perangkat Raspberry Pi 4 berhasil dilakukan melalui teknik konversi dan kuantisasi ke format TensorFlow Lite (Int8). Proses ini terbukti mereduksi ukuran model secara drastis dari 38.3 MB menjadi 3.0 MB, yang memungkinkan sistem melakukan inferensi deteksi objek secara real-time dengan beban komputasi yang ringan tanpa mengorbankan fungsionalitas utama.
2. Kinerja Deteksi Model AI dan Konvergensi Berdasarkan analisis komparatif terhadap skenario pelatihan (*batching epoch*), model mencapai titik performa paling stabil (*plateau*) pada Epoch ke-34 (dari target 50) dengan nilai mAP@50 sebesar 72.3%. Analisis *Confusion Matrix* menunjukkan bahwa model memiliki sensitivitas yang tinggi dalam mendeteksi kelas 'Abnormal' (Mastitis). Temuan ini membuktikan bahwa durasi pelatihan yang terlalu panjang (hingga 100 epoch) tidak diperlukan karena model mengalami konvergensi cepat (*rapid convergence*) pada dataset yang digunakan.
3. Efektivitas Fusi Sensor dan Logika Diagnosa Integrasi data termal dari sensor MLX90614 dengan hasil deteksi visual melalui mekanisme validasi ganda (*Rule-Based Logic*) terbukti efektif meningkatkan kepercayaan diagnosa. Sistem mampu mencegah kesalahan deteksi yang hanya mengandalkan satu parameter. Status "MASTITIS" hanya diputuskan secara valid jika terdapat korelasi positif antara deteksi visual 'Abnormal' dan kenaikan suhu tubuh ambing ($> 38.0^{\circ}\text{C}$), sehingga akurasi keputusan sistem menjadi lebih terpercaya dibandingkan metode visual manual.

4. Tantangan Optik dan Jarak Operasional Pengujian lapangan menunjukkan adanya *trade-off* operasional antara modul kamera dan sensor suhu. Kamera membutuhkan jarak ideal 10–25 cm untuk mendapatkan *Field of View (FOV)* dan fokus terbaik, sedangkan sensor suhu MLX90614 menuntut jarak yang jauh lebih dekat (4–8 cm) untuk akurasi pembacaan termal yang valid. Sistem mengatasi kendala ini melalui prosedur operasional dua tahap dan fitur peringatan interaktif pada layar OLED serta Telegram yang memandu pengguna untuk menyesuaikan posisi alat.
5. Keandalan Sistem IoT Sistem komunikasi berbasis Telegram Bot berfungsi dengan stabil dalam berbagai skenario pengujian konektivitas. Sistem mampu mengirimkan laporan diagnostik lengkap mencakup citra bukti (*evidence*), data suhu aktual, dan status prediksi AI secara *real-time* kepada pengguna. Fitur ini menjamin transparansi data pemantauan kesehatan ternak yang dapat diakses dari jarak jauh sebagai sistem peringatan dini (*Early Warning System*).

5.2 Saran

Demi pengembangan sistem yang lebih optimal, akurat, dan siap guna di masa mendatang, penulis mengajukan beberapa saran perbaikan teknis berdasarkan temuan selama penelitian:

1. Peningkatan Kualitas dan Variasi Dataset Disarankan untuk memperkaya dataset latih dengan variasi kondisi lingkungan yang lebih ekstrem, seperti sampel citra dengan pencahayaan rendah, *backlight*, dan variasi ras warna kulit sapi yang lebih beragam. Penambahan kelas *negative sample* (gambar kandang tanpa objek sapi) ke dalam proses *training* juga sangat direkomendasikan untuk menekan angka kesalahan deteksi pada latar belakang (*background error*) dan meningkatkan nilai akurasi di atas 80%.
2. Modifikasi Sistem Pencahayaan (Lighting) Mengingat isu overexposure (pantulan cahaya putih) pada kulit ambing yang basah saat pengambilan gambar jarak dekat, disarankan untuk menambahkan modul *diffuser* (penyebar cahaya) pada lampu kilat/LED. Alternatif lainnya adalah menggunakan sumber cahaya cincin (*ring light*) dengan intensitas yang dapat diatur (*dimnable*). Solusi ini

bertujuan agar tekstur kulit ambing tetap terlihat jelas dan tidak tertutup pantulan cahaya saat alat didekatkan.

3. Optimasi Lingkungan Komputasi Edge Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan akselerator perangkat keras (Hardware Accelerator) seperti *Google Coral USB Accelerator* atau *Intel Neural Compute Stick*. Penambahan modul ini bertujuan untuk mengambil alih beban komputasi inferensi model AI dari CPU Raspberry Pi, sehingga dapat meningkatkan *Frame Rate (FPS)* deteksi secara signifikan dan menjaga suhu perangkat tetap stabil dalam penggunaan jangka panjang.
4. Peningkatan Generalisasi Model Melalui Hyperparameter Evolution Untuk mengatasi stagnasi nilai akurasi, penelitian selanjutnya disarankan menerapkan teknik Hyperparameter Evolution. Teknik ini memungkinkan pencarian otomatis kombinasi parameter pelatihan terbaik (seperti *learning rate*, *momentum*, dan *weight decay*) melalui algoritma genetika. Selain itu, perlu dilakukan perluasan variasi dataset dengan mengambil sampel dari berbagai jenis ras sapi dan kondisi pencahayaan kandang yang lebih ekstrim untuk meningkatkan kemampuan generalisasi model.

