

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

Setelah melewati seluruh rangkaian tahapan mulai dari optimasi mode, hingga pengujian langsung pada *hardware* Esp32, beberapa poin penting yang dapat disimpulkan dari tugas akhir ini yaitu:

1. Optimasi model lewat kombinasi manual secara *weight pruning* dan *full integer quantization* berhasil memangkas ukuran file biner secara signifikan dari 27,38KB menjadi hanya 3,15KB. Pemotongan ukuran hingga 88,5% ini membuat model menjadi sangat ringan untuk disimpan dalam memori mikroprosesor.
2. Proses kuantisasi ke format INT8 hanya berdampak kecil pada akurasi model, di mana performanya hanya turun sekitar 1,36% (dari akurasi awal 93,95% menjadi 92,59%). Meskipun ada sedikit penurunan, validitas keputusan alat tetap terjaga konsisten dengan hasil simulasi di Google Colab saat menguji rangkaian data lokal.
3. Pembatasan ruang *Tensor Arena* secara statis di angka 40 KB terbukti menjadi kapasitas paling ideal untuk menjaga stabilitas RAM internal ESP32. Berdasarkan pemantauan riil sepanjang pengujian 5.000 dataset menggunakan fungsi “*ESP.getFreeHeap()*”, memori dinamis (*Free Heap*) perangkat mampu bertahan konstan di angka 280 KB tanpa mengalami penurunan. Kestabilan angka ini menjadi bukti konkret bahwa sistem

komputasi *Edge AI* yang dirancang bebas dari masalah kebocoran memori (*memory leak*), sehingga risiko kegagalan sistem (*crash loop*) saat proses inferensi berulang berhasil diatasi sepenuhnya.

4. Penggunaan komputasi lokal (*Edge AI*) terbukti sangat efisien dalam memotong durasi kerja prosesor Xtensa LX6. Waktu inferensi alat untuk menghasilkan keputusan kelayakan air berhasil dipercepat secara drastis dari yang semula 12,45 ms menjadi hanya berkisar antara 96 μ s hingga 112 μ s dengan nilai rata-rata sebesar 106 μ s (rata-rata 0,106 ms) per data.
5. Kecepatan waktu inferensi tersebut berbanding lurus dengan penghematan konsumsi listrik alat. Dari pantauan sensor INA219, sirkuit ESP32 bekerja sangat hemat di bawah daya 1 Watt dengan rata-rata daya aktif sebesar 308,00 mW (tegangan bus 5,03 V dan arus 61,23 mA). Profil daya yang rendah ini memastikan alat sangat layak digunakan untuk sistem pemantauan jarak jauh di lingkungan Perumda Air Minum Tirta Bahari Kota Tegal dengan mengandalkan baterai atau panel surya (*off-grid*).

6.2 Saran

Berdasarkan temuan data dan evaluasi performa alat yang sudah berjalan, beberapa poin saran yang bisa diajukan untuk pengembangan sistem ini ke depan diantaranya:

1. Penerapan Fitur *Deep Sleep Mode* untuk Memaksimalkan Penghematan Listrik: Meskipun dari hasil bacaan sensor INA219 konsumsi daya aktif sirkuit sudah sangat irit di bawah 1 Watt (rata-rata 308,00 mW), efisiensi

ini masih bisa ditekan lagi. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan memanfaatkan fitur *Deep Sleep* bawaan ESP32. Mikrokontroler dapat diatur untuk tidur setelah selesai melakukan inferensi singkat (96 us), dan hanya bangun kembali setiap beberapa menit sekali untuk membaca sensor, sehingga daya baterai di lapangan akan jauh lebih awet.

2. Penggunaan Protokol Komunikasi Hemat RAM untuk Fitur Monitoring Jarak Jauh: Mengingat alokasi ruang memori untuk *Tensor Arena* telah dikunci secara statis di angka 40 KB demi menjaga kelancaran *runtime* model AI, ruang sisa RAM dinamis harus dijaga dengan ketat. Jika sistem ini nantinya dikembangkan untuk mengirimkan hasil klasifikasi kualitas air secara nirkabel ke pusat data, sangat disarankan untuk menggunakan protokol komunikasi yang hemat memori seperti ESP-NOW atau *Bluetooth Low Energy* (BLE). Hindari penggunaan protokol berbasis Wi-Fi konvensional yang boros RAM, agar fitur transmisi data jarak jauh tidak merebut jatah memori operasional *TensorFlow Lite Micro* yang bisa memicu *crash* di tengah jalan.
3. Perluasan dan Variasi Dataset Lapangan untuk Menjaga Akurasi: Walaupun penurunan akurasi akibat kuantisasi INT8 tergolong kecil (hanya turun 1,90%) dan hasil tes terbukti konsisten dengan Google Colab, model ini tetap perlu diuji dengan tantangan data yang lebih bervariasi di lapangan. Disarankan untuk terus menambah jumlah data latih, terutama dengan mengambil sampel air langsung dari berbagai titik

distribusi Perumda Air Minum Tirta Bahari Kota Tegal yang kondisinya fluktuatif, agar model AI di dalam *chip* semakin matang dan adaptif.

4. Perancangan Sistem Catu Daya Mandiri (*Off-Grid System*): Fakta bahwa alat ini mampu bekerja stabil dengan penarikan arus rata-rata 61,23 mA pada tegangan 5,03 V menjadi modal besar untuk implementasi nyata di area terpencil. Pengembangan fisik alat selanjutnya sebaiknya langsung dilengkapi dengan modul manajemen daya terintegrasi, seperti baterai *rechargeable* yang dikombinasikan dengan panel surya kecil ukuran 5 WP atau 10 WP sebagai penyuplai daya mandiri di lokasi penempatan node sensor.