

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan pada bab-bab sebelumnya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Model *Deep Learning* dengan arsitektur MobileNetV2 berhasil dibangun menggunakan teknik *Transfer Learning* dan diimplementasikan secara praktis ke dalam sistem skrining berbasis web (Skrin.in) untuk mengklasifikasikan tiga kelas kondisi mata (katarak matur, katarak imatur, dan normal) secara otomatis.
2. Kinerja model pada tahap pengujian (*testing*) menggunakan data uji yang belum pernah dilihat sebelumnya berhasil mencapai tingkat akurasi sebesar 99%. Hasil validasi metrik komprehensif membuktikan performa yang sangat seimbang pada setiap kelas, di mana kelas katarak imatur memperoleh nilai *precision* 0.97, *recall* 0.99, dan *F1-score* 0.98. Kelas katarak matur mencatatkan nilai *precision* 0.99, *recall* 0.97, dan *F1-score* 0.98. Sementara itu, kelas mata normal mencapai hasil sempurna dengan nilai 1.00 untuk keseluruhan metrik. Secara rata-rata keseluruhan (*macro average*), model mencatatkan nilai 0.99 untuk *precision*, *recall*, dan *F1-score* yang membuktikan keandalannya dalam menekan angka kesalahan diagnosis.
3. Penerapan *callbacks* terbukti berhasil mengoptimalkan performa serta efisiensi waktu pelatihan. Fungsi *ReduceLROnPlateau* terbukti efektif bertindak sebagai stabilisator dengan menurunkan *learning rate* dari 0.001 menjadi 0.0002 saat terjadi stagnasi, sehingga model mampu mencapai *validation loss* terendah sebesar 0.0261. Di sisi lain, integrasi *ModelCheckpoint* dan *EarlyStopping* memberikan perlindungan mutlak terhadap *overfitting* dengan secara otomatis mengamankan dan mengembalikan arsitektur ke bobot terbaiknya (pada *epoch* ke-19). Secara operasional, keseluruhan optimasi ini berhasil mereduksi total beban waktu komputasi secara substansial dari 2.828 detik (pelatihan manual) menjadi 1.171 detik, memberikan efisiensi waktu hingga 1.657 detik (sekitar 27 menit 37 detik) lebih cepat dengan hasil prediksi yang tetap tangguh dan konsisten.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian dan implementasi sistem di masa mendatang, beberapa hal yang disarankan adalah:

1. Mengembangkan infrastruktur sistem web yang telah dibangun (Skrin.in) dengan mengintegrasikan sistem basis data (*database*) pasien untuk menyimpan riwayat skrining, serta meningkatkan kapasitas *server* (*scale-up*) dari *tier* gratis menjadi *dedicated server* agar dapat menangani beban lalu lintas (*traffic*) penggunaan secara masif di fasilitas kesehatan.
2. Menerapkan metode *Explainable AI* (XAI) seperti *Grad-CAM* pada arsitektur model untuk memvisualisasikan peta panas (*heatmap*) area lensa mata yang menjadi titik fokus model dalam membuat prediksi, guna meningkatkan transparansi, interpretabilitas, dan kepercayaan medis terhadap sistem.
3. Memperkaya *dataset* citra katarak dengan jumlah yang lebih masif dan variasi kondisi pencahayaan serta sudut pengambilan gambar yang lebih beragam untuk dilatih ulang, agar kemampuan generalisasi model terhadap data *real-world* semakin kuat.
4. Mengembangkan sistem lebih lanjut dari sekadar klasifikasi citra utuh menjadi sistem deteksi objek (*object detection*) atau segmentasi, yang mampu melokalisasi dan menandai batas tepi (*bounding box*) area lensa yang mengalami katarak secara spesifik.