

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Rancangan dan implementasi model hibrida dilakukan dengan mengonversi model dasar Vision Transformer (*vit_base_patch16_224*) terbukti mampu dikonversi menjadi pengekstraksi fitur murni (*rigid feature extractor*) melalui pencopotan *classification head* bawaan, menghasilkan vektor fitur laten representasi visual berdimensi 768 dari token [CLS] yang menyimpan informasi patologi citra fundus retina mata. Proses ini diintegrasikan melalui alur pra-pemrosesan intensitas piksel, *Holdout split*, *Stratified 5-Fold Cross Validation*, dan penempatan *Random Oversampling* (ROS) secara internal dalam *fold* pelatihan guna mencegah *data leakage*.
2. Model klasifikasi hibrida ViT-XGBoost memberikan performa yang superior dibandingkan model *baseline* ViT murni pada *unseen test data*. Pada *unseen test data*, model hibrida memperoleh nilai Akurasi 97%, *F1-Score* kelas katarak 85%, dan AUC 0.9930, lebih baik daripada model *end-to-end* ViT murni yang hanya mencapai Akurasi 96%, *F1-Score* 81%, AUC 0.9856. Penggabungan arsitektur hibrida ini berhasil memangkas kesalahan *vonis False Positive* dari 18 kasus menjadi hanya 9 kasus, menghasilkan prediksi yang lebih presisi dan andal.
3. Pendekatan hibrida sangat efektif mengatasi potensi *overfitting* dan bias akibat data medis yang terbatas dan tidak seimbang. Validasi internal yang ketat memastikan hasil evaluasi tetap konsisten, sementara algoritma *decision tree ensemble* dari XGBoost mampu membangun batas keputusan non-linear yang selektif untuk mengeliminasi *overfitting* terhadap ambiguitas visual atau *noise* artifak (seperti *lens dust* dan *drusen*) yang menduduki 9,1% dari total data.

5.2 Saran

Berdasarkan proses dan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Penelitian berikutnya dapat menggunakan dataset citra fundus medis primer dengan cakupan yang lebih luas secara lokal di rumah sakit Indonesia untuk meningkatkan generalisasi model secara demografis. Penambahan variasi kelas komorbiditas penyakit mata lainnya,

seperti retinopati diabetik dan glaukoma (multikelas), juga dapat membantu menangkap dinamika patologis mata yang lebih komprehensif di dunia nyata.

Dari sisi pemodelan, penelitian lanjutan dapat membandingkan pendekatan hibrida ViT-XGBoost dengan metode hibrida ansambel lainnya, seperti kombinasi ekstraksi *transformer* dengan model *LightGBM*, *CatBoost*, atau *Support Vector Machine* (SVM). Eksperimen terhadap variasi teknik reduksi dimensi canggih seperti PCA (Principal Component Analysis) pada ruang fitur 768-dimensi keluaran ViT, serta optimasi *hyperparameter* menggunakan algoritma metaheuristik (seperti *Genetic Algorithm*), dapat dilakukan untuk menguji efisiensi komputasi dan pengaruhnya terhadap performa model.

Pada aspek evaluasi, pengujian Keterjelasan AI (*Explainable AI / XAI*) yang lebih mendalam, seperti implementasi *Attention Maps* atau *Grad-CAM*, dapat dikembangkan untuk membuktikan secara visual bahwa fokus perhatian model benar-benar terletak pada titik kekeruhan lensa mata, bukan pada latar belakang citra.

