BAB V
KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil membangun dan menguji sistem pengenalan tulisan tangan (*Handwritten Text Recognition*/HTR) menggunakan gabungan model Kuantum dan Klasik (*Hybrid Quantum-Classical*). Sistem ini dibuat untuk mengubah hasil pindaian kertas *wongoji* menjadi teks digital. Berdasarkan hasil pengujian sistem, kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1) Algoritma segmentasi berhasil dibuat menggunakan *library* OpenCV. Proses pra-pemrosesan ini menggunakan operasi morfologi dan binarisasi agar letak kotak *wongoji* dapat dideteksi dengan tepat. Hasil pemotongan dari gambar ini kemudian berhasil diproses ke dalam model QCNN-ResNet-18 menggunakan 8-*qubit* (simulator PennyLane), yang terbukti mampu mengenali 74 kelas (huruf Hangeul dan angka) dengan akurasi yang tinggi yaitu 97,26% pada pengujian ke data baru (*unseen test*).
2) Kinerja sistem secara keseluruhan dievaluasi menggunakan perhitungan ralat karakter, yaitu *Character Error Rate* (CER). Masalah penulisan dua angka di dalam satu kotak berhasil ditangani oleh fitur *Conditional Splitter* di bagian *backend*. Setelah dilakukan pengujian langsung ke seluruh modul sistem secara bersamaan (*end-to-end*), rata-rata CER yang didapatkan dari pengguna nyata adalah sebesar 47,26% dengan nilai tengah (median) 46,37%.
3) Sistem pengenalan tulisan tangan ini berhasil dihubungkan ke dalam sebuah *website* menggunakan *framework* Django. Halaman situs buatan ini terbukti mampu memudahkan pengguna mengunggah ambar kertas *wongoji* secara langsung, lalu memprosesnya secara otomatis hingga mengeluarkan hasil ketikan teks digital. Hal ini membuktikan bahwa teknologi model hibrida kuantum sudah layak dijadikan pijakan prototipe bagi alat bantu otomatis pemeriksa ujian.

5.2 Saran

Keberhasilan implementasi prototipe hibrida kuantum ini membuka berbagai peluang untuk pengembangan lebih lanjut. Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, terdapat beberapa saran perbaikan untuk penelitian mendatang:

1) Pendekatan Segmentasi Tingkat Jamo (*Jamo-Level Segmentation*)

Penelitian ini dievaluasi pada subset 74 kelas karakter. Untuk mengenali keseluruhan 11.172 kombinasi suku kata Hangeul tanpa membebani kapasitas eksponensial sirkuit kuantum, penelitian selanjutnya disarankan untuk menerapkan segmentasi karakter pada tingkat unit terkecil (Jamo). Pendekatan ini akan menekan kebutuhan parameter kelas sekaligus meningkatkan jangkauan prediksi kosa kata.

2) Mitigasi *Catastrophic Forgetting*

Ketidakseimbangan proporsi data saat pelatihan (64 kelas Hangeul berbanding 10 kelas angka MNIST) menyebabkan model melupakan fitur identifikasi angka dasar, yang berkontribusi pada nilai CER 47,26%. Penelitian di masa depan disarankan untuk mengintegrasikan metode retensi memori jaringan, seperti *Elastic Weight Consolidation* (EWC) atau strategi *Continual Learning*.

3) Implementasi pada Perangkat Keras Kuantum Riil

Simulasi sirkuit kuantum pada penelitian ini dijalankan secara komputasi lokal (PennyLane *Simulator Environment*). Penelitian lanjutan direkomendasikan untuk mendistribusikan komputasi sirkuit secara langsung pada perangkat keras kuantum riil (seperti IBM Quantum) guna mengevaluasi dampak *noise* aktual (*Noisy Intermediate-Scale Quantum* / NISQ) terhadap presisi klasifikasi model.

4) Integrasi Konteks Sekuensial dan Linguistik

Kesalahan klasifikasi pada arsitektur yang membaca karakter secara tunggal (*isolated character recognition*) rentan terjadi ketika kualitas tulisan memburuk. Penelitian ke depan dapat menggabungkan *output* dari QCNN-ResNet-18 dengan model sekuensial bahasa seperti *Long Short-Term Memory* (LSTM) atau *Vision Transformer* (ViT) agar sistem dapat mengoreksi kesalahan prediksi berdasarkan konteks tata bahasa kalimat.

5) Optimasi Latensi dan Efisiensi Komputasi *Web*

Eksekusi segmentasi citra berskala besar yang digabungkan dengan inferensi sirkuit kuantum memberikan beban komputasi yang tinggi pada *server* Django. Untuk mencegah waktu tunda (*latency delay*) pada pemrosesan dokumen masal, diperlukan penerapan teknik kompresi model (*Model Quantization/Pruning*) atau pendelegasian komputasi ke dalam layanan asinkron berbasis komputasi awan (*Asynchronous Microservices*).