

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan proses perancangan, implementasi, dan pengujian sistem kontrol otomatis perbesaran mikroskop digital berbasis pengolahan citra dan ESP32 yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa tujuan penelitian telah tercapai. Adapun kesimpulan yang diperoleh adalah sebagai berikut.

1. Sistem kontrol otomatis pergantian lensa objektif mikroskop digital menggunakan ESP32 berhasil dikembangkan untuk melakukan perpindahan antara objektif 4× dan 10×. Mekanisme pergantian lensa menggunakan motor stepper NEMA17, driver TB6600, dan sistem roda gigi yang menggerakkan revolver mikroskop. Berdasarkan tiga kali pengujian pergantian lensa, seluruh perpindahan berhasil dilakukan dengan tingkat keberhasilan 100%. Waktu pergantian yang diperoleh sebesar 5,04 detik, 4,71 detik, dan 4,70 detik, dengan rata-rata waktu pergantian sebesar 4,82 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem berbasis ESP32 mampu mengendalikan mekanisme pergantian lensa objektif 4× dan 10× sesuai dengan perintah yang diberikan.
2. Sistem kontrol pergantian lensa objektif berhasil diimplementasikan dan diintegrasikan dengan perangkat lunak Embarcadero Delphi sebagai antarmuka serta bagian pengolah dan pengambil keputusan. Program melakukan pemindaian pada objektif 4× dan 10×, menyimpan hasil pengolahan citra dari kedua objektif, melakukan evaluasi untuk menentukan lensa yang digunakan, kemudian mengirimkan hasil keputusan menuju ESP32 utama melalui koneksi TCP pada jaringan WiFi. ESP32 utama meneruskan perintah melalui jalur digital GPIO menuju ESP32 revolver untuk menggerakkan lensa sesuai hasil keputusan program. Integrasi tersebut memungkinkan proses pemindaian, pemilihan lensa, dan pergantian posisi revolver berlangsung dalam satu rangkaian sistem secara otomatis.

3. Analisis karakteristik fokus citra pada lensa objektif 4× dan 10× berhasil dilakukan menggunakan hasil *focus score* dan nilai Otsu yang diperoleh selama proses pemindaian. Pada lima pengujian objek rambut banyak, rata-rata *focus score* makro objektif 4× sebesar 6,450 dan objektif 10× sebesar 3,825, dengan hasil akhir sistem memilih objektif 4× pada seluruh pengujian. Pada lima pengujian objek rambut tunggal, objektif 10× menghasilkan rata-rata *focus score* makro sebesar 7,026 dan seluruh pengujian menghasilkan objektif 10× sebagai lensa terpilih. Hasil analisis juga menunjukkan bahwa nilai Otsu tidak digunakan secara langsung dengan aturan nilai terbesar sebagai penentu lensa. Nilai Otsu digunakan sebagai nilai ambang dalam pengolahan citra untuk membantu menentukan bagian tepi objek yang digunakan pada perhitungan *focus score*. Selanjutnya, hasil pemindaian kedua objektif dievaluasi melalui kualitas relatif dan nilai lokal di sekitar posisi fokus terbaik sebelum program menentukan objektif 4× atau 10×.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan sebagai pertimbangan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Sistem pergantian lensa dapat dikembangkan dengan menambahkan sensor posisi pada mekanisme revolver untuk mendeteksi posisi objektif secara langsung. Pada sistem yang digunakan saat ini, posisi objektif masih ditentukan berdasarkan status logika program. Penambahan sensor posisi dapat memberikan verifikasi posisi fisik objektif 4× dan 10× sehingga ketepatan posisi revolver dapat diketahui secara langsung setelah proses pergantian lensa.
2. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan variasi lensa objektif selain 4× dan 10×. Penambahan objektif dengan perbesaran yang berbeda memerlukan pengembangan pada mekanisme revolver, parameter pemindaian, serta logika pemilihan lensa sehingga sistem dapat melakukan pemilihan perbesaran secara otomatis pada lebih banyak tingkat perbesaran.