

LAPORAN TUGAS AKHIR

RANCANG BANGUN KONTROL *AUTOFOCUS* UNTUK MIKROSKOP DIGITAL MENGGUNAKAN METODE OTSU BERBASIS MIKROKONTROLER ESP32

Diajukan Oleh:

Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa

40040322650055

TELAH DISETUJUI DAN DITERIMA DENGAN BAIK OLEH

Menyetujui,

Dosen Pembimbing



Ari Bawono Putranto, S.Si., M.Si

NIP. 198501252019031007

Mengetahui,

Ketua

Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi

Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi

Universitas Diponegoro

Semarang, 23 September 2026



Privo Sasmitoko, S.T., M.Eng

NIP. 197009161998021001

Semarang, 23 September 2026

HALAMAN PENGESAHAN

**RANCANG BANGUN KONTROL AUTOFOKUS UNTUK MIKROSKOP
DIGITAL MENGGUNAKAN METODE OTSU BERBASIS
MIKROKONTROLER ESP32**

Disusun Oleh:
Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa
40040322650055

Telah diujikan dan dinyatakan lulus oleh Tim Penguji pada tanggal

23 September 2026

Tim Penguji,
Pembimbing



Ari Bawono Putranto, S.Si., M.Si
NIP. 198501252019031007

Penguji 1

Penguji 2

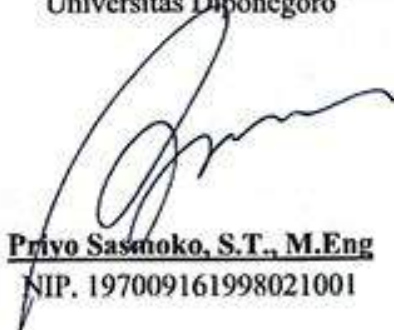


Megarini Hersa Putri, S.T., M.T.
NIP. 198902142020122012



Ahmad Ridlo Hanifudin Tahier S.Si., M.Si.
NIP. 199504152022041001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S.Tr Teknologi Rekayasa Otomasi
Departemen Teknologi Industri Sekolah Vokasi
Universitas Diponegoro



Priyo Sasnoko, S.T., M.Eng
NIP. 197009161998021001

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa
NIM : 40040322650055
Program Studi : Teknologi Rekayasa Otomasi
Judul Tugas Akhir : Rancang Bangun Kontrol Autofokus untuk Mikroskop Digital Menggunakan Metode Otsu Berbasis Mikrokontroler ESP32

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi. Sepanjang pengetahuan saya, tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dirujuk dalam naskah dan dicantumkan dalam daftar pustaka.

Apabila di kemudian hari Tugas Akhir ini terbukti mengandung plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor 17 Tahun 2010 dan peraturan perundang-undangan yang berlaku.

Semarang, 23 September 2026

Yang membuat pernyataan,



Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Rancang Bangun Kontrol Autofokus untuk Mikroskop Digital Menggunakan Metode Otsu Berbasis Mikrokontroler ESP32”. Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan pada Program Studi Teknologi Rekayasa Otomasi. Dalam proses pelaksanaan dan penyusunan Tugas Akhir ini, penulis memperoleh bantuan, bimbingan, dukungan, dan motivasi dari berbagai pihak:

1. Allah SWT yang telah memberikan kesehatan, kekuatan, dan kemudahan selama proses penyusunan Tugas Akhir.
2. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan, motivasi, serta kasih sayang yang tiada henti.
3. Ari Bawono Putranto, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan selama pelaksanaan Tugas Akhir dan penyusunan laporan.
4. Rekan-rekan Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi angkatan 2022 serta seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, informasi, dan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai bahan perbaikan dan pengembangan penelitian pada masa mendatang. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi bagi mahasiswa, peneliti, serta pihak lain yang berkepentingan.

Semarang, 23 September 2026



Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa

DAFTAR ISI

LAPORAN TUGAS AKHIR.....	Error! Bookmark not defined.
HALAMAN PENGESAHAN	i
SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
DAFTAR ISI.....	v
DAFTAR TABEL.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL	xii
INTISARI.....	xv
ABSTRACT	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Batasan Masalah.....	4
1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	5
BAB II DASAR TEORI.....	7
2.1 Tinjauan Pustaka	7
2.2 Mikroskop Digital	9
2.3 Sistem Autofokus Mikroskop	11
2.4 Pengolahan Citra Digital.....	13
2.4.1 Citra <i>Grayscale</i>	13
2.4.2 Histogram Citra	14
2.4.3 Thresholding	15
2.5 Metode Otsu	16
2.6 <i>Region of Interest</i> (ROI).....	19
2.7 Fungsi Evaluasi Fokus Berbasis Gradien dan Laplacian	21
2.7.1 Gradien Citra	22
2.7.2 Laplacian Citra	24
2.7.3 Pembentukan <i>Focus Score</i>	26
2.8 Perangkat Keras	27
2.8.1 Mikrokontroler ESP32	27

2.8.2	Kamera Optilab	29
2.8.3	<i>Limit Switch</i>	30
2.8.4	<i>Driver</i> TB6600.....	32
2.8.5	Motor Stepper.....	34
2.8.6	LCD I2C 16×2	36
2.8.7	LM2596.....	37
2.8.8	Power Supply	39
2.9	Komunikasi Data.....	41
2.9.1	Komunikasi Wi-Fi Berbasis TCP.....	41
2.9.2	Komunikasi Serial/UART	43
2.10	Perangkat Lunak.....	44
2.10.1	Embarcadero Delphi.....	44
2.10.2	OpenCV.....	45
2.10.3	Arduino IDE.....	46
BAB III	METODE PENELITIAN	48
3.1	Diagram Blok dan Diagram Alir Sistem.....	48
3.1.1	Diagram Blok Sistem	48
3.1.2	Diagram Alir Pengolahan Citra dan Perhitungan <i>Focus Score</i>	54
3.1.3	Diagram Alir Algoritma Autofokus Bertingkat	56
3.1.4	Diagram Alir Sistem Autofokus Otomatis Dua Objektif.....	58
3.2	Gambar 3D.....	61
3.3	Teknik Fabrikasi.....	62
3.3.1	Alat dan Bahan.....	63
3.3.2	Fabrikasi dan Modifikasi Mekanik	64
3.3.3	Perancangan Elektrikal.....	66
3.3.4	Implementasi Perangkat Lunak dan Sistem Kendali	69
BAB IV	PENGUJIAN DAN ANALISA	83
4.1	Hasil Implementasi Sistem.....	83
4.2	Pengujian Sistem Kontrol Autofokus.....	85
4.2.1	Pengujian Limit Dan Fungsi Homing	85
4.2.2	Pengujian Pergerakan Makrometer dan Mikrometer	87
4.2.3	Pengujian Komunikasi Aplikasi dengan ESP32	90
4.3	Pengujian Pengolahan Citra dan Focus Score.....	91
4.3.1	Pengujian Segmentasi Citra Menggunakan Metode Otsu.....	92

4.3.2	Pengujian Focus Score terhadap Perubahan Posisi Fokus	94
4.4	Pengujian Algoritma Autofokus Bertingkat	97
4.4.1	Pengujian Pemindaian Makrometer pada Objektif 4× dan 10×	97
4.4.2	Pengujian Penentuan Objektif Terpilih.....	99
4.4.3	Pengujian Pemindaian Mikrometer dan Verifikasi Posisi Fokus...	100
4.5	Pengujian Kinerja Sistem Autofokus pada Variasi Preparat.....	102
4.5.1	Pengujian Autofokus pada Preparat Rambut Tunggal.....	102
4.5.2	Pengujian Autofokus pada Preparat Rambut Banyak	109
BAB V	PENUTUP	117
5.1	Kesimpulan	117
5.2	Saran.....	117
DAFTAR PUSTAKA		119
LAMPIRAN		122

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan penelitian terdahulu	7
Tabel 2.2 Spesifikasi utama papan pengembangan ESP32	28
Tabel 2.3 Spesifikasi kamera mikroskop digital OptiLab	30
Tabel 2.4 Spesifikasi <i>microswitch</i> KW12-3.....	32
Tabel 2.5 Modul driver motor TB6600	33
Tabel 2.6 Rentang karakteristik umum motor stepper NEMA 17 dan NEMA 23	36
Tabel 2.7 Spesifikasi LCD I ² C 16×2	37
Tabel 2.8 Karakteristik IC LM2596S-ADJ	38
Tabel 2.9 Karakteristik catu daya SSS-60-12.....	40
Tabel 3.1 Komponen penyusun sistem autofokus mikroskop digital.....	63
Tabel 3.2 Karakteristik roda gigi pada mekanisme penggerak	65
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Homing dan Limit Switch Sumbu Z.....	86
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Pergerakan Makrometer Objektif 4×	87
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Pergerakan Makrometer Objektif 10×	88
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Pergerakan Mikrometer	89
Tabel 4.5 Hasil Pengujian Komunikasi Aplikasi Delphi dengan ESP32	90
Tabel 4.6 Hasil Nilai Threshold Otsu Pada Setiap Kondisi Pengujian	94
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Focus Score terhadap Perubahan Posisi Fokus.....	97
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Parameter Penentuan Objektif	99
Tabel 4.9 Hasil Penentuan Objektif Terpilih.....	100
Tabel 4.10 Hasil Pemindaian Mikrometer dan Verifikasi Posisi Fokus	101
Tabel 4.11 Hasil pemindaian makrometer pada preparat rambut tunggal.....	103
Tabel 4.12 Hasil akhir autofokus pada preparat rambut tunggal.....	105
Tabel 4.13 Hasil pemindaian makrometer pada preparat rambut banyak	109
Tabel 4.14 Hasil penilaian objektif pada preparat rambut banyak.....	111

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Susunan komponen pendukung mikroskop digital [11]	10
Gambar 2.2 Prinsip pemindaian aksial pada autofokus berbasis citra [4].....	12
Gambar 2.3 Hasil binerisasi citra rambut tunggal menggunakan nilai ambang Otsu $T = 97$ [7]	19
Gambar 2.4 Perbandingan kinerja pemilihan jendela fokus dan seluruh citra pada kondisi dengan dan tanpa derau [2]	21
Gambar 2.5 ESP32 30 pin berbasis ESP-WROOM-32 [18]	28
Gambar 2.6 Kamera mikroskop digital OptiLab	30
Gambar 2.7 Microswitch KW12-3 dengan aktuator tuas beroda [22]	31
Gambar 2.8 Modul Driver Motor TB6600 [23]	33
Gambar 2.9 Motor stepper: (a) NEMA 17 dan (b) NEMA 23 [27], [28]	35
Gambar 2.10 LCD 16×2 dengan modul antarmuka I ² C [32]	37
Gambar 2.11 Modul LM2596 [35]	39
Gambar 2.12 Catu daya SSS-60-12	40
Gambar 2.13 Topologi komunikasi Wi-Fi berbasis TCP antara komputer dan ESP32 [40]	42
Gambar 2.14 Struktur frame data UART [41].....	43
Gambar 2.15 Tampilan antarmuka Embarcadero Delphi	45
Gambar 2.16 OpenCV [46]	46
Gambar 2.17 Antarmuka Arduino IDE pada pemrograman ESP32 [48]	47
Gambar 3.1 Diagram blok sistem kontrol autofokus mikroskop digital	48
Gambar 3.2 Diagram alir pengolahan citra dan perhitungan Focus Score	55
Gambar 3.3 Diagram alir tahap persiapan dan pemindaian makrometer	57
Gambar 3.4 Diagram alir pemindaian awal objektif 4× dan 10×	59
Gambar 3.5 Desain 3D keseluruhan sistem autofokus mikroskop digital.....	61
Gambar 3.6 Identifikasi bagian penyusun desain 3D sistem autofokus mikroskop digital.....	62
Gambar 3.7 Desain 3D roda gigi mekanisme revolver	66
Gambar 3.8 Wiring diagram pengawatan sistem autofokus mikroskop digital ..	67
Gambar 3.9 Skematik rangkaian PCB sistem kendali autofokus	68

Gambar 4.1 Implementasi keseluruhan sistem kontrol autofocus mikroskop digital	83
Gambar 4.2 Implementasi mekanisme penggerak fokus pada sumbu Z	84
Gambar 4.3 Antarmuka aplikasi kontrol autofocus mikroskop digital	84
Gambar 4.4 Hasil pembacaan limit switch melalui Serial Monitor	86
Gambar 4.5 Pengujian batas operasi makrometer objektif 4×.....	87
Gambar 4.6 Pengujian batas operasi makrometer objektif 10×.....	88
Gambar 4.7 Pengujian batas operasi mikrometer	89
Gambar 4.8 Hasil Pengujian Koneksi Aplikasi Delphi dengan ESP32: (a) Kondisi ESP32 belum terhubung, (b) Kondisi ESP32 berhasil terhubung.....	90
Gambar 4.9 Hasil Pengujian Perintah Posisi Makrometer 3000 Langkah: (a) Tampilan aplikasi Delphi, (b) Kondisi mekanisme mikroskop, (c) Tampilan LCD ESP32.....	91
Gambar 4.10 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Tunggal Objektif 4×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu	92
Gambar 4.11 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Tunggal Objektif 10×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu	93
Gambar 4.12 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Banyak Objektif 4×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu	93
Gambar 4.13 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Banyak Objektif 10×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu	94
Gambar 4.14 Hasil Grafik Focus Score Makrometer Objektif 4×	95
Gambar 4.15 Hasil Grafik Nilai Otsu Makrometer Objektif 4×.....	95
Gambar 4.16 Hasil Grafik Focus Score Mikrometer Objektif 4×	96
Gambar 4.17 Hasil Grafik Nilai Otsu Mikrometer Objektif 4×	96
Gambar 4.18 Kurva Focus Score pemindaian makrometer pada objektif.....	98
Gambar 4.19 Hasil Grafik Nilai Otsu Makrometer Objektif 4× Sistem Autofokus Otomatis.....	98
Gambar 4.20 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif 10× ..	100
Gambar 4.21 Kurva Focus Score pemindaian makrometer dalam lima percobaan preparat rambut tunggal: (a) objektif 4×; (b) objektif 10×.....	104

Gambar 4.22 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif 10× dalam lima percobaan preparat rambut tunggal.....	106
Gambar 4.23 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 1 preparat rambut tunggal	107
Gambar 4.24 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 2 preparat rambut Tunggal	107
Gambar 4.25 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 3 preparat rambut Tunggal	108
Gambar 4.26 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 4 preparat rambut Tunggal	108
Gambar 4.27 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 5 preparat rambut Tunggal	108
Gambar 4.28 Kurva Focus Score pemindaian makrometer dalam lima percobaan preparat rambut banyak: (a) objektif 4×; (b) objektif 10×	110
Gambar 4.29 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif terpilih dalam lima percobaan preparat rambut banyak	112
Gambar 4.30 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 1 preparat rambut Banyak	114
Gambar 4.31 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 2 preparat rambut Banyak	114
Gambar 4.32 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 3 preparat rambut Banyak	115
Gambar 4.33 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 4 preparat rambut Banyak	115
Gambar 4. 34 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 5 preparat rambut Banyak	115

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

Singkatan	Kepanjangan/Keterangan
AC	Alternating Current (arus bolak-balik)
ADC	Analog-to-Digital Converter
AP	Access Point
BR/EDR	Basic Rate/Enhanced Data Rate
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
COM	Common; terminal bersama pada microswitch
CPU	Central Processing Unit
DAC	Digital-to-Analog Converter
DC	Direct Current (arus searah)
DIP	Dual In-line Package; jenis sakelar konfigurasi pada driver
DIR	Direction; terminal kendali arah putaran motor
ENA	Enable; terminal untuk mengaktifkan atau menonaktifkan keluaran driver
ESP32	Seri system-on-chip/mikrokontroler 32-bit dari Espressif Systems
fps	Frame per Second
GPIO	General-Purpose Input/Output
GND	Ground; titik referensi tegangan rangkaian
I ² C	Inter-Integrated Circuit
I ² S	Inter-IC Sound
I420	Format video planar 4:2:0 dengan komponen luminansi dan krominansi yang disimpan terpisah
IC	Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
JPEG	Joint Photographic Experts Group
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
NC/N-C	Normally Closed; kontak tertutup pada kondisi normal
NEMA	National Electrical Manufacturers Association; acuan ukuran rangka motor stepper

Singkatan	Kepanjangan/Keterangan
NO/N-O	Normally Open; kontak terbuka pada kondisi normal
OpenCV	Open Source Computer Vision Library
PCB	Printed Circuit Board
PUL	Pulse; terminal masukan pulsa langkah motor
PWM	Pulse-Width Modulation
RGB	Red, Green, Blue
RGB24	Format citra RGB 24-bit dengan 8 bit pada setiap kanal warna
RMS	Root Mean Square
ROI	Region of Interest
RMT	Remote Control Peripheral
ROM	Read-Only Memory
RX	Receive; jalur penerimaan data
SAR	Successive Approximation Register
SCL	Serial Clock
SDA	Serial Data
SMPS	Switch-Mode Power Supply
SoC	System-on-Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
SRAM	Static Random-Access Memory
SSID	Service Set Identifier
STA	Station; perangkat yang terhubung ke access point
TCP	Transmission Control Protocol
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
TX	Transmit; jalur pengiriman data
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
USB	Universal Serial Bus
VAC	Tegangan arus bolak-balik dalam satuan volt
VCC	Tegangan catu positif rangkaian
VCL	Visual Component Library
VDC	Tegangan arus searah dalam satuan volt

Simbol	Keterangan	Satuan
$I_g(x,y)$	Nilai intensitas citra grayscale pada koordinat piksel (x,y)	—
$R(x,y)$	Nilai intensitas kanal merah pada koordinat piksel (x,y)	—
$G(x,y)$	Nilai intensitas kanal hijau pada Persamaan	—
$B(x,y)$	Nilai intensitas kanal biru pada koordinat piksel (x,y)	—
α, β, γ	Bobot kanal merah, hijau, dan biru pada konversi citra grayscale	—
x, y	Koordinat piksel pada citra	piksel
p_i	Probabilitas piksel pada tingkat keabuan ke-i	—
n_i	Jumlah piksel pada tingkat keabuan ke-i	piksel
N	Jumlah seluruh piksel yang dianalisis	piksel
i	Indeks atau nilai tingkat keabuan	—
L	Jumlah tingkat keabuan pada citra	—
$f(x,y)$	Nilai intensitas citra masukan pada proses thresholding	—
$g(x,y)$	Nilai piksel citra biner hasil thresholding	—
T	Nilai ambang pemisah dua kelas intensitas	—
C_0, C_1	Kelas piksel pertama dan kedua pada metode Otsu	—
k	Kandidat nilai ambang yang dievaluasi	—
$\omega_0(k), \omega_1(k)$	Probabilitas kelas C_0 dan C_1 pada kandidat ambang k	—
$\mu_0(k), \mu_1(k)$	Rata-rata intensitas piksel kelas C_0 dan C_1	—
$\sigma_B^2(k)$	Variansi antarkelas pada kandidat ambang k	—
T_{Otsu}	Nilai ambang optimal yang dihasilkan metode Otsu	—

INTISARI

RANCANG BANGUN KONTROL *AUTOFOCUS* UNTUK MIKROSKOP DIGITAL MENGGUNAKAN METODE OTSU BERBASIS MIKROKONTROLER ESP32

Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa

Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Otomasi, Sekolah Vokasi,
Universitas Diponegoro

Pemfokusan manual pada mikroskop digital bergantung pada penilaian operator sehingga posisi fokus dapat berbeda pada pengamatan berulang. Penelitian ini bertujuan merancang sistem kontrol autofokus berbasis ESP32, menerapkan segmentasi Otsu dan *Focus Score* berbasis gradien dan Laplacian, serta mengevaluasi kinerjanya pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak. Sistem mengintegrasikan kamera Optilab, aplikasi Delphi-OpenCV, komunikasi Wi-Fi TCP, penggerak makrometer dan mikrometer sumbu Z, serta revolver objektif 4× dan 10×. Pencarian fokus dilakukan melalui pemindaian makrometer pada kedua objektif, pemilihan objektif berdasarkan karakteristik kurva, pemindaian mikrometer kasar dan halus, serta verifikasi kandidat. Metode Otsu menghasilkan nilai ambang 91–119 dan secara visual dapat membedakan objek rambut dari latar belakang. Sistem menyelesaikan 10 dari 10 percobaan. Pada rambut tunggal, objektif 10× dipilih pada lima percobaan dengan rata-rata *Focus Score* akhir 14,804 dan koefisien variasi 1,89%. Pada rambut banyak, objektif 4× dipilih empat kali dengan rata-rata *Focus Score* akhir 15,729 dan koefisien variasi 3,20%, sedangkan objektif 10× dipilih satu kali dengan nilai akhir 17,611. Posisi makrometer logis ditetapkan secara konsisten, sedangkan posisi mikrometer akhir masih bervariasi. Hasil tersebut menunjukkan keberhasilan operasional 100%, bukan akurasi fokus terhadap acuan eksternal.

Kata Kunci: Autofokus; Mikroskop digital; Metode Otsu; *Focus Score*; ESP32.

ABSTRACT

DESIGN AND DEVELOPMENT OF ESP32 MICROCONTROLLER-BASED AUTOFOCUS CONTROL FOR A DIGITAL MICROSCOPE USING THE OTSU METHOD

Fawaz Zaidhan Wafdan Isnandiwa

Automation Engineering Technology Study Program, Vocational School,
Diponegoro University

Manual focusing in digital microscopy depends on operator judgment and can vary between observations. This study developed an ESP32-based autofocus system using Otsu segmentation and a gradient- and Laplacian-based *Focus Score*, then evaluated it on single- and multiple-hair specimens. The system integrated an Optilab camera, a Delphi-OpenCV application, Wi-Fi TCP communication, Z-axis coarse- and fine-focus drives, and an objective turret for 4× and 10× magnifications. Focus searching included scans with both objectives, objective selection, coarse and fine scans of the fine-focus drive, and candidate verification. Otsu produced thresholds of 91–119 and visually distinguished hair from the background. The system completed all 10 trials. For the single-hair specimen, the 10× objective was selected in all five trials, with a mean final *Focus Score* of 14.804 and a coefficient of variation of 1.89%. For the multiple-hair specimen, 4× was selected in four trials, with a mean final *Focus Score* of 15.729 and a coefficient of variation of 3.20%, while 10× was selected once with a final score of 17.611. Logical coarse-focus positions were consistent, whereas final fine-focus positions varied. The 100% rate represents operational completion, not accuracy against an external focus reference.

Keywords: *Autofocus; Digital microscope; Otsu method; Focus Score; ESP32.*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mikroskop merupakan perangkat optik untuk mengamati objek berukuran kecil yang tidak dapat dilihat dengan jelas oleh mata secara langsung. Perkembangan kamera digital dan perangkat komputasi memungkinkan citra hasil pengamatan mikroskop ditampilkan, disimpan, dan diolah melalui komputer. Integrasi kamera, perangkat lunak, serta aktuator selanjutnya membuka peluang pengembangan mikroskop digital yang tidak hanya melakukan akuisisi citra, tetapi juga menjalankan sebagian proses pengamatan secara otomatis [1].

Salah satu tahapan penting dalam pengamatan mikroskopis adalah menentukan posisi fokus. Pada mikroskop konvensional, fokus diperoleh dengan mengatur makrometer dan mikrometer berdasarkan penilaian visual pengguna. Cara tersebut bergantung pada keterampilan operator sehingga posisi fokus yang diperoleh dapat berbeda. Pada perbesaran yang lebih tinggi, kedalaman fokus juga semakin sempit sehingga perubahan kecil pada posisi sumbu Z dapat menurunkan ketajaman citra. Kondisi ini membuat pemfokusan manual kurang efisien, terutama ketika pengamatan dilakukan secara berulang [2], [3].

Permasalahan tersebut dapat diatasi melalui autofokus berbasis citra. Secara umum, sistem mengakuisisi citra pada sejumlah posisi sumbu Z, menghitung nilai evaluasi fokus pada setiap citra, kemudian memilih posisi yang menghasilkan tingkat ketajaman terbaik [2], [4]. Tingkat ketajaman direpresentasikan dengan fungsi evaluasi fokus (*focus measure*). Operator berbasis gradien dan Laplacian dapat digunakan untuk menilai perubahan intensitas serta detail lokal citra, tetapi kinerjanya tetap dipengaruhi oleh karakteristik objek, kontras, derau, dan area citra yang dievaluasi [5].

Penilaian ketajaman perlu diarahkan pada bagian citra yang mewakili objek agar tekstur atau derau pada latar belakang tidak mendominasi hasil pengukuran. Metode Otsu dapat menentukan nilai ambang secara otomatis dari histogram tingkat keabuan dengan memaksimalkan keterpisahan antarkelas piksel [6]. Penelitian Bawono dkk. menunjukkan bahwa nilai ambang Otsu memiliki

hubungan dengan perubahan fokus pada citra rambut tunggal dan kumpulan rambut. Namun, nilai tersebut juga dipengaruhi oleh proporsi piksel objek terhadap latar belakang dan intensitas pencahayaan [7]. Oleh karena itu, nilai ambang Otsu pada Tugas Akhir ini tidak digunakan sebagai satu-satunya penentu fokus, melainkan sebagai dasar segmentasi untuk membatasi penilaian ketajaman pada tepi objek.

Berdasarkan permasalahan tersebut, Tugas Akhir ini merancang dan membangun sistem kontrol autofokus pada mikroskop digital berbasis mikrokontroler ESP32. Aplikasi komputer melakukan akuisisi citra, segmentasi menggunakan metode Otsu, serta menghitung *Focus Score* dari komponen gradien dan Laplacian pada *region of interest* (ROI). ESP32 mengendalikan penggerak makrometer dan mikrometer pada sumbu Z, sedangkan pencarian fokus dilakukan secara bertingkat melalui pemindaian kasar, pemindaian halus, dan verifikasi kandidat posisi terbaik. Sistem juga diintegrasikan dengan penelitian dari saudara Faiz Athallah Wiraraksa yang berjudul “Pengembangan Sistem Kontrol Otomatis Perbesaran Mikroskop Digital Berbasis Pengolahan Citra Dan ESP32”. Pada penelitian saudara Faiz Athallah Wiraraksa berfokus pada pemilihan objektif 4× dan 10× sebagai subsistem pendukung.

Pengujian dilakukan pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak menggunakan objektif 4× dan 10×. Kinerja sistem ditinjau berdasarkan keberhasilan penyelesaian proses autofokus, posisi fokus yang diperoleh, nilai *Focus Score*, dan konsistensi hasil pada pengujian berulang. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan diharapkan dapat mengurangi ketergantungan pada pengaturan fokus manual serta menghasilkan proses pencarian fokus yang lebih terukur pada mikroskop digital.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, permasalahan dalam Tugas Akhir ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun sistem kontrol autofokus pada mikroskop digital yang mengintegrasikan penggerak makrometer dan

mikrometer pada sumbu Z berbasis mikrokontroler ESP32 dengan proses akuisisi dan pengolahan citra melalui aplikasi komputer?

2. Bagaimana menerapkan metode Otsu untuk melakukan segmentasi objek terhadap latar belakang serta menggunakan *Focus Score* berbasis gradien dan Laplacian pada tepi objek dalam proses pencarian fokus secara bertingkat?
3. Bagaimana kinerja sistem autofokus pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak berdasarkan keberhasilan operasional, pemilihan objektif 4× atau 10×, posisi logis makrometer dan mikrometer, nilai *Focus Score* akhir, serta konsistensi hasil pengujian berulang?

1.3 Tujuan

Berdasarkan rumusan masalah yang telah diuraikan, tujuan pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem kontrol autofokus pada mikroskop digital yang mengintegrasikan penggerak makrometer dan mikrometer pada sumbu Z berbasis mikrokontroler ESP32 dengan proses akuisisi dan pengolahan citra melalui aplikasi komputer.
2. Menerapkan metode Otsu untuk melakukan segmentasi objek terhadap latar belakang serta menggunakan *Focus Score* berbasis gradien dan Laplacian pada tepi objek dalam proses pemindaian makrometer, pemilihan objektif, pemindaian mikrometer, dan verifikasi kandidat posisi fokus.
3. Menganalisis kinerja sistem autofokus pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak berdasarkan keberhasilan operasional, pemilihan objektif 4× atau 10×, posisi logis makrometer dan mikrometer, nilai *Focus Score* akhir, serta konsistensi hasil pengujian berulang.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan alternatif penerapan sistem kontrol autofokus pada mikroskop digital melalui pengendalian penggerak makrometer dan mikrometer pada sumbu Z secara otomatis.

2. Menyediakan informasi pencarian fokus yang terukur melalui penyajian citra, nilai ambang Otsu, *Focus Score*, posisi logis sumbu Z, objektif terpilih, dan kurva hasil pemindaian.
3. Menjadi referensi teknis bagi mahasiswa atau peneliti dalam mengembangkan sistem autofokus mikroskop digital yang mengintegrasikan pengolahan citra, evaluasi ketajaman, pemilihan objektif, dan pengendalian gerakan berbasis mikrokontroler ESP32.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan dalam Tugas Akhir ini lebih terarah dan sesuai dengan sistem yang dikembangkan, batasan masalah ditetapkan sebagai berikut:

1. Sistem berfokus pada pengendalian autofokus melalui pergerakan makrometer dan mikrometer pada sumbu Z berbasis mikrokontroler ESP32. Pergerakan meja preparat pada sumbu X dan Y dilakukan secara manual.
2. Akuisisi citra menggunakan kamera mikroskop digital Optilab, sedangkan pengolahan citra dan pengaturan proses autofokus dilakukan melalui aplikasi komputer yang dikembangkan menggunakan Embarcadero Delphi dengan dukungan OpenCV. Parameter kamera, seperti *exposure*, *gain*, dan *white balance*, tidak dikendalikan atau dikunci secara otomatis oleh sistem.
3. Metode Otsu digunakan untuk menentukan nilai ambang dan melakukan segmentasi objek terhadap latar belakang. Hasil segmentasi dievaluasi secara visual tanpa menggunakan citra acuan berlabel sehingga tidak dinyatakan sebagai akurasi segmentasi. Penilaian ketajaman dan penentuan kandidat posisi fokus menggunakan *Focus Score* berbasis gradien dan Laplacian pada tepi objek di dalam ROI.
4. Mode autofokus otomatis dibatasi pada penggunaan objektif 4× dan 10×. Pemindaian makrometer dilakukan pada kedua objektif, sedangkan pemindaian mikrometer hanya dilakukan pada objektif terpilih. Subsistem revolver digunakan sebagai pendukung integrasi sehingga perancangan mekanik dan kerjanya tidak dianalisis secara mendalam.
5. Objek pengujian dibatasi pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak. Pengujian autofokus dilakukan sebanyak lima percobaan pada masing-masing

preparat. Setiap percobaan dimulai dari posisi makrometer 0 langkah, mikrometer 0 langkah, dan objektif 4× tanpa penyesuaian fokus secara manual selama proses berlangsung.

6. Kinerja sistem ditinjau berdasarkan keberhasilan penyelesaian proses, pemilihan objektif, posisi logis makrometer dan mikrometer, nilai *Focus Score* akhir, serta konsistensi hasil pengujian berulang. Penelitian tidak mengukur posisi fisik menggunakan encoder, keterulangan mekanis, akurasi terhadap acuan fokus eksternal, maupun waktu penyelesaian proses. Sistem juga tidak dibandingkan secara formal dengan pemfokusan manual atau metode autofokus lainnya. Persentase keberhasilan hanya menyatakan keberhasilan operasional sistem.
7. Penelitian tidak membahas diagnosis atau analisis medis terhadap objek rambut serta tidak menguji secara terpisah pengaruh ketebalan, jenis, dan penempatan rambut terhadap hasil autofokus.

1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Sistematika penulisan laporan Tugas Akhir ini disusun untuk memberikan gambaran umum mengenai alur pembahasan, ruang lingkup, serta tahapan penelitian yang dilakukan sehingga memudahkan pembaca dalam memahami isi laporan secara keseluruhan. Laporan Tugas Akhir ini disusun dalam beberapa bab yang saling berkaitan.

BAB I PENDAHULUAN, berisi latar belakang, perumusan masalah, tujuan Tugas Akhir, manfaat Tugas Akhir, pembatasan masalah, dan sistematika laporan Tugas Akhir.

BAB II DASAR TEORI, menguraikan penelitian terdahulu dan teori yang mendukung pengembangan sistem autofokus mikroskop digital. Pembahasan mencakup mikroskop digital, sistem autofokus, pengolahan citra digital, metode Otsu, *region of interest* (ROI), fungsi evaluasi fokus berbasis gradien dan Laplacian, perangkat keras, komunikasi data, serta perangkat lunak yang digunakan.

BAB III METODE PENELITIAN, menjelaskan proses perancangan dan pembangunan sistem kontrol autofokus. Pembahasan meliputi diagram blok dan

diagram alir sistem, desain tiga dimensi, serta teknik fabrikasi yang mencakup perancangan mekanik, elektrik, dan perangkat lunak. Bab ini juga menjelaskan algoritma pengolahan citra, pengendalian pergerakan makrometer dan mikrometer pada sumbu Z, serta integrasi sistem dengan subsistem pemilihan objektif.

BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA, menyajikan hasil implementasi serta pengujian sistem kontrol autofokus. Pengujian mencakup fungsi perangkat keras, proses *homing*, pergerakan makrometer dan mikrometer, komunikasi aplikasi dengan ESP32, segmentasi citra menggunakan metode Otsu, perubahan *Focus Score* terhadap posisi sumbu Z, algoritma autofokus bertingkat, serta kinerja autofokus pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak. Hasil pengujian dianalisis berdasarkan keberhasilan operasional, pemilihan objektif, posisi makrometer dan mikrometer yang dihitung berdasarkan jumlah langkah motor, nilai *Focus Score* hasil verifikasi kandidat terpilih, serta konsistensi hasil pengujian berulang.

BAB V PENUTUP, berisi kesimpulan dan saran. Kesimpulan disusun berdasarkan hasil pengujian dan analisis untuk menjawab perumusan masalah serta tujuan Tugas Akhir, sedangkan saran memuat rekomendasi bagi pengembangan sistem selanjutnya.