

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian mengenai autofokus mikroskop digital umumnya berkembang pada tiga aspek, yaitu fungsi evaluasi fokus, strategi pencarian posisi fokus, dan mekanisme penggerak sumbu Z. Penelitian terdahulu pada subbab ini dipilih berdasarkan keterkaitannya dengan penggunaan metode Otsu, evaluasi ketajaman berbasis gradien dan Laplacian, pencarian fokus bertingkat, serta penerapannya pada sistem mikroskop bermotor. Perbandingan penelitian terdahulu disajikan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Perbandingan penelitian terdahulu

Judul Penelitian	Metode dan Hasil Utama	Keterkaitan dan Kesenjangan
Identifikasi Fokus Mikroskop Digital Menggunakan Metode Otsu (Putranto dkk) [7]	Posisi objek dipindai menggunakan motor stepper, sedangkan ambang Otsu digunakan sebagai indikator fokus pada rambut tunggal dan rambut banyak. Nilai ambang minimum ditemukan pada citra fokus, tetapi dipengaruhi proporsi objek–latar belakang dan pencahayaan.	Memiliki keterkaitan paling langsung dari sisi metode dan objek. Tugas Akhir ini menggunakan Otsu untuk segmentasi, sedangkan pposisi fokus ditentukan menggunakan <i>Focus Score</i> berbasis gradien dan Laplacian.
Variance Untuk Pencari Fokus Otomatis Mikroskop Digital (Winarno dkk) [8]	Posisi dengan nilai <i>Normalized Variance</i> maksimum dipilih sebagai fokus. Uji t berpasangan menghasilkan $p = 0,313$ sehingga tidak ditemukan perbedaan signifikan antara hasil program dan pengamat.	Menunjukkan penerapan autofokus berbasis citra pada mikroskop bermotor, tetapi menggunakan satu fungsi evaluasi dan satu mekanisme penggerak fokus.
Sistem Pemfokusan Otomatis pada Mikroskop	Membandingkan <i>Gaussian Derivative</i> , Tenengrad, <i>Squared Gradient</i> , dan <i>Gray Level Variance</i> pada 40 citra	Mendukung penggunaan informasi gradien untuk evaluasi ketajaman. Tugas Akhir ini menggabungkan

Digital Berbiaya Rendah Menggunakan Metode Gradient dan Statistics Based Focus Measurement Function (Hermawati dkk) [9]	mikrostruktur. Tiga fungsi berbasis gradien memberikan hasil pemilihan citra fokus yang lebih konsisten pada pengujian yang dilakukan.	gradien dan Laplacian setelah segmentasi Otsu serta tidak melakukan perbandingan formal antaroperator.
Automatic Focusing Method of Microscopes Based on Image Processing (Zhang dan Yao) [2]	Mengembangkan evaluasi fokus berbasis <i>wavelet</i> , pemilihan jendela fokus adaptif berdasarkan segmentasi dan distribusi tepi, serta algoritma <i>hill-climbing</i> yang diperbaiki untuk mengurangi gangguan <i>noise</i> dan ekstrem lokal.	Menjadi dasar penggunaan area evaluasi terpilih dan pencarian fokus bertingkat. Fungsi evaluasi dan strategi pencariannya berbeda dari sistem yang dikembangkan dalam Tugas Akhir ini.
Fast, High-Precision Autofocus on a Motorised Microscope (Knapper dkk) [3]	Mengevaluasi ketajaman berbasis Laplacian dan ukuran berkas JPEG serta mengembangkan prosedur <i>smart stack</i> untuk menangani <i>backlash</i> , <i>drift</i> , dan kesalahan posisi. Lebih dari 95% tumpukan citra menempatkan citra tertajam pada tiga posisi tengah.	Menunjukkan pentingnya penanganan gerakan mekanis dan verifikasi hasil fokus. Tugas Akhir ini menerapkan waktu stabilisasi, beberapa sampel citra, dan verifikasi kandidat pada penggerak makrometer dan mikrometer.
Quantitative Evaluation of Focus Measure Operators in Optical Microscopy (Piao dkk) [10]	Mengevaluasi sejumlah operator fokus melalui karakteristik kurva, sensitivitas, ketahanan terhadap gangguan, dan waktu komputasi. Hasilnya menunjukkan bahwa setiap operator memiliki karakteristik serta kompromi kinerja yang berbeda.	Memberikan landasan terbaru bahwa operator evaluasi harus dipilih sesuai karakteristik citra dan kebutuhan sistem. Tugas Akhir ini menguji fungsi gabungan yang dipilih pada objek dan perangkat aktual, bukan membandingkan seluruh operator.

Berdasarkan penelitian terdahulu, ketajaman citra dapat dievaluasi menggunakan informasi statistik, gradien, Laplacian, maupun transformasi *wavelet*. Namun, tidak terdapat satu fungsi evaluasi yang selalu memberikan kinerja terbaik pada seluruh kondisi. Respons operator dapat dipengaruhi oleh isi citra, ukuran area evaluasi, pencahayaan, *noise*, serta karakteristik perangkat akuisisi [5], [10]. Oleh karena itu, fungsi evaluasi perlu disesuaikan dengan objek dan kondisi sistem yang digunakan.

Penelitian Putranto dkk. [7] mempunyai keterkaitan paling langsung karena menggunakan metode Otsu serta objek rambut tunggal dan rambut banyak. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa nilai ambang Otsu berkaitan dengan perubahan fokus, tetapi juga dipengaruhi oleh proporsi piksel objek terhadap latar belakang dan intensitas pencahayaan. Berdasarkan keterbatasan tersebut, nilai ambang Otsu pada Tugas Akhir ini tidak digunakan sebagai satu-satunya penentu fokus. Metode Otsu digunakan untuk memisahkan objek dan latar belakang, sedangkan ketajaman citra dihitung pada tepi hasil segmentasi di dalam *region of interest* (ROI) menggunakan *Focus Score* berbasis gradien dan Laplacian.

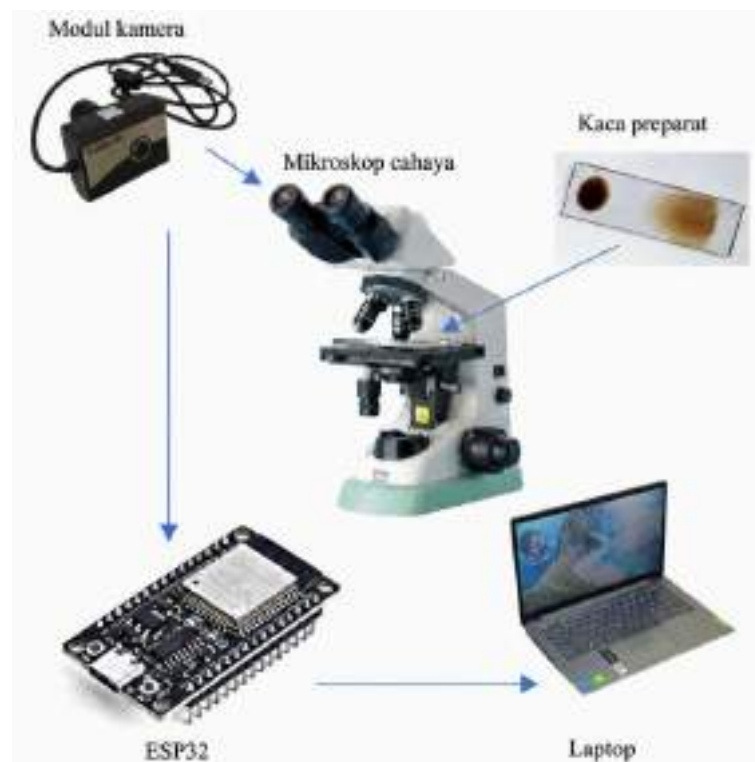
Perbedaan utama Tugas Akhir ini terletak pada integrasi segmentasi Otsu, evaluasi ketajaman pada tepi objek, pengendalian dua penggerak sumbu Z, pemilihan objektif, serta verifikasi kandidat fokus dalam satu sistem yang mengintegrasikan aplikasi komputer dan mikrokontroler ESP32. Pemindaian makrometer dilakukan pada objektif 4× dan 10×, kemudian pemindaian mikrometer dilanjutkan pada objektif terpilih untuk menyempurnakan posisi fokus. Dengan demikian, penelitian ini tidak berfokus pada perbandingan antaroperator, tetapi pada penerapan dan pengujian sistem autofokus bertingkat pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak.

2.2 Mikroskop Digital

Mikroskop digital merupakan sistem pengamatan yang mengintegrasikan sistem optik mikroskop dengan kamera digital, perangkat komputasi, dan perangkat lunak. Citra yang dibentuk oleh lensa objektif diterima oleh sensor kamera, dikonversi menjadi data piksel, kemudian dikirimkan ke perangkat komputasi untuk ditampilkan, disimpan, atau diolah [1], [11]. Integrasi tersebut

memungkinkan hasil pengamatan didokumentasikan dan dianalisis dalam bentuk citra digital, tidak hanya diamati secara langsung melalui lensa okuler [11].

Secara umum, mikroskop digital terdiri atas sumber pencahayaan, meja preparat, lensa objektif, kamera digital, perangkat komputasi, dan perangkat lunak. Cahaya yang melewati atau dipantulkan oleh preparat dikumpulkan oleh sistem optik untuk membentuk citra pada sensor kamera. Sensor kemudian mengubah informasi intensitas cahaya menjadi data digital yang dapat diteruskan menuju perangkat komputasi [1], [11]. Susunan komponen pendukung mikroskop digital ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Susunan komponen pendukung mikroskop digital [11]

Citra yang diperoleh melalui mikroskop digital dapat ditampilkan secara langsung, disimpan sebagai dokumentasi, dan diolah untuk memperoleh informasi tertentu. Pengolahan tersebut dapat mencakup peningkatan kualitas citra, segmentasi objek, pengukuran karakteristik citra, dan evaluasi tingkat ketajaman. Kemampuan ini menjadikan mikroskop digital sesuai untuk dikembangkan sebagai sistem pengamatan otomatis berbasis pengolahan citra.

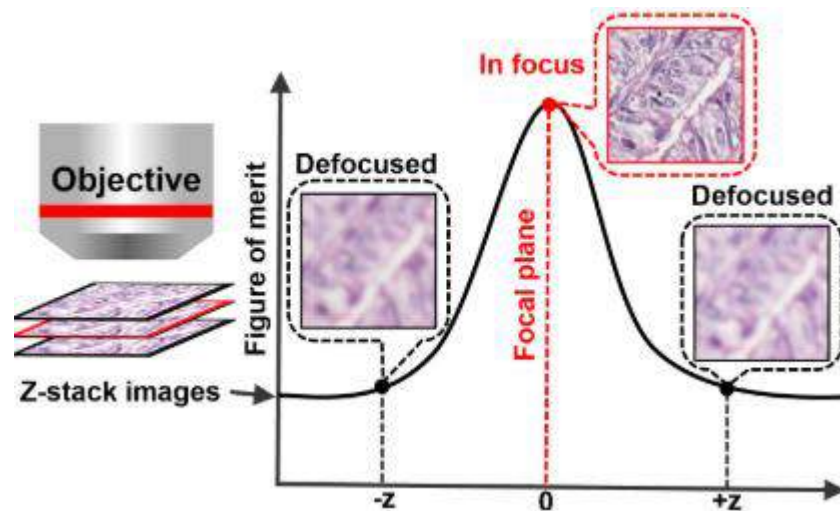
Dalam sistem autofokus berbasis citra, kamera memperoleh citra pada beberapa posisi sumbu Z. Setiap citra kemudian dievaluasi menggunakan fungsi pengukuran fokus untuk menghasilkan nilai yang merepresentasikan tingkat ketajamannya. Posisi yang menghasilkan nilai ketajaman terbaik digunakan sebagai kandidat posisi fokus [2]. Oleh karena itu, kamera dan perangkat komputasi tidak hanya berfungsi sebagai media dokumentasi, tetapi juga sebagai bagian dari mekanisme umpan balik dalam pengaturan fokus otomatis.

2.3 Sistem Autofokus Mikroskop

Autofokus pada mikroskop merupakan proses pengaturan otomatis terhadap jarak relatif antara preparat dan sistem optik agar objek berada pada bidang fokus dan menghasilkan citra dengan tingkat ketajaman optimal. Pengaturan fokus dapat dilakukan dengan menggerakkan meja preparat atau unit optik sepanjang sumbu Z sehingga jarak antara preparat dan lensa objektif berubah [2], [4]. Ketelitian pengaturan posisi semakin penting pada lensa objektif dengan bukaan numerik atau *numerical aperture* (NA) tinggi karena kedalaman bidang fokusnya semakin sempit [4].

Berdasarkan sumber informasi yang digunakan, sistem autofokus dapat dibedakan menjadi pendekatan berbasis sinyal optik tambahan dan pendekatan berbasis citra. Pendekatan berbasis sinyal optik tambahan menggunakan informasi seperti jarak, pantulan cahaya, fase, atau karakteristik optik untuk memperkirakan posisi fokus. Pendekatan berbasis citra menentukan kondisi fokus dengan mengevaluasi citra yang diperoleh dari kamera tanpa memerlukan sensor jarak khusus [2], [4].

Pada autofokus berbasis citra, preparat atau unit optik dipindahkan ke sejumlah posisi sepanjang sumbu Z untuk memperoleh rangkaian citra yang disebut *z-stack*. Setiap citra kemudian dievaluasi menggunakan fungsi evaluasi fokus atau *focus measure* untuk menghasilkan nilai numerik yang merepresentasikan tingkat ketajaman citra. Hubungan antara posisi sumbu Z dan nilai evaluasi tersebut membentuk kurva fokus. Posisi yang menghasilkan nilai optimum pada kurva digunakan sebagai kandidat posisi fokus [4], [10]. Prinsip pemindaian aksial pada autofokus berbasis citra ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Prinsip pemindaian aksial pada autofokus berbasis citra [4]

Kurva evaluasi fokus yang baik umumnya mempunyai satu nilai ekstrem dominan atau mendekati bentuk *unimodal*. Nilainya berubah secara teratur ketika posisi bergerak mendekati dan menjauhi bidang fokus. Kurva tersebut juga perlu sensitif terhadap perubahan ketajaman di sekitar bidang fokus, memiliki rentang respons yang memadai, serta tidak menghasilkan banyak nilai ekstrem lokal [4], [10]. Karakteristik tersebut memudahkan algoritma pencarian dalam membedakan citra fokus dan citra tidak fokus.

Bentuk kurva fokus dapat dipengaruhi oleh tekstur objek, pencahayaan, *noise*, artefak optik, ukuran area evaluasi, dan karakteristik sensor kamera. Gangguan tersebut dapat menghasilkan nilai ekstrem lokal yang tidak mewakili posisi fokus terbaik. Oleh karena itu, fungsi evaluasi fokus perlu dipilih dengan mempertimbangkan karakteristik objek, kondisi akuisisi citra, ketahanan terhadap gangguan, dan kebutuhan waktu komputasi [4], [10].

Pencarian posisi fokus dapat dilakukan melalui pemindaian seluruh rentang, pencarian nilai ekstrem, atau pencarian bertingkat. Pemindaian seluruh rentang mengevaluasi banyak posisi sehingga peluang menemukan nilai optimum lebih besar, tetapi membutuhkan waktu gerak dan jumlah citra yang lebih banyak. Algoritma pencarian nilai ekstrem, seperti *hill-climbing*, dapat mengurangi jumlah posisi yang diperiksa, tetapi berisiko berhenti pada nilai ekstrem lokal. Pencarian bertingkat atau *coarse-to-fine* menggunakan langkah besar untuk memperkirakan

daerah fokus, kemudian menggunakan langkah yang lebih kecil untuk menyempurnakan posisi terpilih [2], [3].

Keandalan autofokus juga dipengaruhi oleh mekanisme penggerak sumbu Z. *Backlash*, *drift*, toleransi mekanik, getaran, dan waktu stabilisasi dapat menyebabkan posisi aktual berbeda dari posisi yang diperintahkan. Pengaruh tersebut dapat dikurangi dengan mendekati posisi dari arah yang konsisten, memberikan waktu stabilisasi setelah pergerakan, menerapkan kompensasi *backlash*, menggunakan beberapa sampel citra, serta memverifikasi kembali posisi fokus terpilih [3]. Dengan demikian, keberhasilan autofokus berbasis citra ditentukan oleh keterpaduan proses akuisisi citra, fungsi evaluasi fokus, strategi pencarian, dan pengendalian gerakan sumbu Z.

2.4 Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra digital merupakan serangkaian operasi komputasi terhadap citra yang direpresentasikan dalam bentuk data numerik. Citra digital tersusun atas sejumlah piksel yang memiliki koordinat dan nilai intensitas atau warna tertentu. Pengolahan tersebut dapat digunakan untuk memperbaiki kualitas citra, memisahkan objek dari latar belakang, serta memperoleh karakteristik tertentu yang diperlukan dalam proses analisis otomatis [11].

Pada autofokus berbasis citra, setiap citra yang diperoleh dari kamera diolah menjadi informasi numerik sehingga tingkat ketajamannya dapat dievaluasi dan dibandingkan. Proses awal yang umum digunakan meliputi konversi citra warna menjadi citra *grayscale*, pembentukan histogram intensitas, dan pemisahan piksel melalui proses *thresholding* [2], [12]. Ketiga proses tersebut menyederhanakan representasi citra dan menyediakan informasi intensitas yang diperlukan dalam segmentasi maupun evaluasi ketajaman.

2.4.1 Citra *Grayscale*

Citra warna pada ruang warna RGB direpresentasikan oleh tiga kanal, yaitu merah (*red*), hijau (*green*), dan biru (*blue*). Setiap piksel mempunyai tiga nilai yang menunjukkan intensitas masing-masing kanal. Citra *grayscale* hanya memiliki satu nilai intensitas pada setiap piksel sehingga tidak memuat informasi warna, tetapi tetap mempertahankan informasi tingkat terang dan gelap citra [7], [12].

Pada citra *grayscale* 8-bit, nilai intensitas berada pada rentang 0 sampai 255. Nilai 0 menunjukkan warna hitam, nilai 255 menunjukkan warna putih, sedangkan nilai di antara kedua batas tersebut menunjukkan tingkat keabuan. Konversi citra RGB menjadi citra *grayscale* dapat dilakukan menggunakan kombinasi berbobot dari ketiga kanal warna sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.1).

$$I_g(x, y) = \alpha R(x, y) + \beta G(x, y) + \gamma B(x, y) \quad (2.1)$$

Dengan $\alpha + \beta + \gamma = 1$ Salah satu pembobotan yang umum digunakan untuk merepresentasikan intensitas luminansi dinyatakan pada Persamaan (2.2) [12].

$$I_g(x, y) = 0,299R(x, y) + 0,587G(x, y) + 0,114B(x, y) \quad (2.2)$$

Keterangan:

$I_g(x, y)$: nilai intensitas citra *grayscale* pada koordinat (x, y) .

$R(x, y)$: nilai intensitas kanal merah pada koordinat (x, y) .

$G(x, y)$: nilai intensitas kanal hijau pada koordinat (x, y) .

$B(x, y)$: nilai intensitas kanal biru pada koordinat (x, y) .

α, β, γ : bobot masing-masing kanal warna.

y : koordinat vertikal atau baris piksel.

x : koordinat horizontal atau kolom piksel.

Pembobotan kanal diperlukan karena masing-masing komponen warna memberikan kontribusi yang berbeda terhadap tingkat kecerahan. Penggunaan satu kanal intensitas mengurangi jumlah data yang diolah dibandingkan citra RGB serta memudahkan pembentukan histogram dan penerapan proses berbasis nilai ambang [6], [12].

2.4.2 Histogram Citra

Histogram citra merupakan representasi distribusi piksel berdasarkan nilai intensitasnya. Pada histogram citra *grayscale*, sumbu horizontal menunjukkan tingkat keabuan, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan frekuensi atau jumlah piksel pada setiap tingkat keabuan [6], [11].

Citra *grayscale* 8-bit mempunyai 256 kemungkinan nilai intensitas, yaitu dari 0 sampai 255. Apabila n_i merupakan jumlah piksel pada tingkat keabuan ke- i

dan N merupakan jumlah seluruh piksel yang dianalisis, probabilitas kemunculan tingkat keabuan ke- i dapat dinyatakan menggunakan Persamaan (2.3) [6].

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad i = 0, 1, 2, \dots, L - 1 \quad (2.3)$$

Keterangan:

p_i : probabilitas piksel pada tingkat keabuan ke- i .

n_i : jumlah piksel pada tingkat keabuan ke- i .

N : jumlah seluruh piksel yang dianalisis.

i : indeks tingkat keabuan.

L : jumlah tingkat keabuan pada citra.

Karena p_i merupakan histogram yang telah dinormalisasi, jumlah probabilitas seluruh tingkat keabuan memenuhi Persamaan (2.4).

$$\sum_{i=0}^{L-1} p_i = 1 \quad (2.4)$$

Histogram memberikan informasi mengenai sebaran intensitas, tetapi tidak menunjukkan posisi spasial setiap piksel. Histogram yang terkonsentrasi pada daerah intensitas rendah menunjukkan dominasi piksel gelap, sedangkan histogram yang terkonsentrasi pada daerah intensitas tinggi menunjukkan dominasi piksel terang. Dua kelompok intensitas yang terpisah dapat merepresentasikan objek dan latar belakang. Namun, pada citra nyata, kedua kelompok tersebut dapat saling tumpang tindih akibat pencahayaan, kontras, dan derau sehingga nilai ambangnya perlu ditentukan menggunakan suatu kriteria tertentu [6].

2.4.3 Thresholding

Thresholding merupakan proses pengelompokan piksel berdasarkan perbandingan antara nilai intensitas piksel dan nilai ambang T . Proses tersebut menghasilkan citra biner yang terdiri atas dua kelas piksel. Salah satu kelas dapat digunakan untuk merepresentasikan objek, sedangkan kelas lainnya merepresentasikan latar belakang [6], [12].

Apabila $f(x, y)$ merupakan citra *grayscale* masukan dan $g(x, y)$ merupakan citra biner keluaran, proses thresholding biner terbalik dapat dinyatakan menggunakan Persamaan.

$$g(x, y) = \begin{cases} 255, & \text{jika } f(x, y) \leq T \\ 0, & \text{jika } f(x, y) > T \end{cases} \quad (2.5)$$

Keterangan:

$g(x, y)$: nilai piksel citra biner keluaran pada koordinat (x, y) .

$f(x, y)$: nilai intensitas citra *grayscale* pada koordinat (x, y) .

T : nilai ambang pemisah kedua kelas.

255 : nilai piksel putih pada citra biner 8-bit.

0 : nilai piksel hitam pada citra biner 8-bit.

Pada *thresholding* biner terbalik, piksel dengan intensitas lebih kecil atau sama dengan nilai ambang T diberi nilai 255, sedangkan piksel dengan intensitas lebih besar daripada T diberi nilai 0. Bentuk biner terbalik digunakan dalam penelitian ini karena objek rambut mempunyai intensitas yang lebih gelap daripada latar belakang sehingga piksel objek direpresentasikan sebagai piksel putih pada citra biner.

Ketepatan nilai ambang menentukan keberhasilan pemisahan kedua kelas. Nilai ambang yang kurang sesuai dapat menyebabkan piksel objek dikelompokkan sebagai latar belakang atau sebaliknya. Nilai ambang dapat ditetapkan secara manual maupun dihitung secara otomatis berdasarkan distribusi histogram. Salah satu pendekatan otomatis adalah metode Otsu, yang menentukan nilai ambang berdasarkan tingkat keterpisahan antarkelas pada histogram citra [12].

2.5 Metode Otsu

Metode Otsu merupakan metode penentuan nilai ambang global secara otomatis berdasarkan distribusi histogram citra *grayscale*. Metode ini bersifat nonparametrik dan tidak memerlukan data pelatihan. Nilai ambang diperoleh dengan mengevaluasi tingkat keterpisahan dua kelas piksel pada histogram. Kandidat ambang yang memaksimalkan variansi antarkelas dipilih sebagai nilai ambang optimal. Karena variansi total citra bersifat tetap, pemaksimalan variansi antarkelas setara dengan meminimalan variansi di dalam kelas [12], [13].

Pada citra *grayscale* dengan L tingkat keabuan, setiap kandidat nilai ambang k membagi piksel menjadi dua kelas. Kelas C_0 terdiri atas piksel dengan tingkat keabuan 0 sampai k , sedangkan kelas C_1 terdiri atas piksel dengan tingkat keabuan

$k + 1$ sampai $L - 1$. Pada citra 8-bit, nilai L sama dengan 256. Probabilitas kedua kelas dihitung menggunakan Persamaan (2.6) dan Persamaan (2.7).

$$\omega_{0(k)} = \sum_{i=0}^k p_i \quad (2.6)$$

$$\omega_{1(k)} = \sum_{i=k+1}^{L-1} p_i = 1 - \omega_{0(k)} \quad (2.7)$$

Keterangan:

$\omega_{0(k)}$: probabilitas kelas C_0 pada kandidat ambang k .

$\omega_{1(k)}$: probabilitas kelas C_1 pada kandidat ambang k .

p_i : probabilitas kemunculan piksel pada tingkat keabuan ke- i .

i : indeks tingkat keabuan.

k : kandidat nilai ambang yang dievaluasi.

L : jumlah tingkat keabuan.

Rata-rata intensitas setiap kelas diperoleh dari jumlah intensitas berbobot probabilitas yang dibagi dengan probabilitas kelasnya. Rata-rata kelas C_0 dan C_1 masing-masing dinyatakan menggunakan Persamaan (2.8) dan Persamaan (2.9).

$$\mu_{0(k)} = \frac{\sum_{i=0}^k i p_i}{\omega_{0(k)}} \quad (2.8)$$

$$\mu_{1(k)} = \frac{\sum_{i=k+1}^{L-1} i p_i}{\omega_{1(k)}} \quad (2.9)$$

Keterangan:

$\mu_{0(k)}$: rata-rata intensitas piksel kelas C_0 .

$\mu_{1(k)}$: rata-rata intensitas piksel kelas C_1 .

i : nilai tingkat keabuan.

p_i : probabilitas piksel pada tingkat keabuan ke- i .

Variansi antarkelas menunjukkan tingkat keterpisahan antara rata-rata intensitas kedua kelas. Nilainya dihitung berdasarkan probabilitas kelas dan selisih rata-rata intensitas sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.10) [6].

$$\sigma_B^2(k) = \omega_0(k)\omega_1(k)[\mu_0(k) - \mu_1(k)]^2 \quad (2.10)$$

Keterangan:

$\sigma_B^2(k)$: variansi antarkelas pada kandidat ambang k .

$\omega_0(k)$: probabilitas kelas C_0 .

$\omega_1(k)$: probabilitas kelas C_1 .

$\mu_0(k)$: rata-rata intensitas kelas C_0 .

$\mu_1(k)$: rata-rata intensitas kelas C_1 .

Nilai ambang optimal dipilih dari kandidat k yang menghasilkan variansi antarkelas terbesar. Kandidat yang menyebabkan salah satu kelas tidak mempunyai anggota tidak digunakan dalam proses pemilihan. Penentuan nilai ambang optimal dinyatakan menggunakan Persamaan (2.11).

$$T_{\text{Otsu}} = \arg \max_{\substack{0 \leq k \leq L-2 \\ \omega_0(k) > 0, \omega_1(k) > 0}} \sigma_B^2(k) \quad (2.11)$$

Keterangan:

T_{Otsu} : nilai ambang optimal yang dihasilkan metode Otsu.

$\arg \max$: operasi untuk menentukan nilai yang menghasilkan nilai maksimum.

$\sigma_B^2(k)$: variansi antarkelas pada kandidat ambang k .

Proses perhitungan dilakukan terhadap seluruh kandidat ambang dalam rentang efektif histogram. Metode Otsu hanya memerlukan probabilitas dan rata-rata kumulatif tingkat keabuan sehingga perhitungannya relatif sederhana. Nilai ambang yang diperoleh selanjutnya dapat digunakan untuk membentuk citra biner dengan mengelompokkan piksel berintensitas kurang dari atau sama dengan ambang ke dalam C_0 , sedangkan piksel berintensitas lebih besar daripada ambang dikelompokkan ke dalam C_1 . Penentuan kelas yang merepresentasikan objek atau latar belakang bergantung pada karakteristik terang dan gelap objek yang diamati.

Contoh binerisasi citra rambut tunggal menggunakan metode Otsu ditunjukkan pada Gambar 2.3. Pada citra tersebut, nilai ambang $T = 97$ memisahkan rambut sebagai kelompok piksel gelap dan latar belakang sebagai kelompok piksel terang [7].



Gambar 2.3 Hasil binerisasi citra rambut tunggal menggunakan nilai ambang Otsu $T = 97$ [7]

Kinerja metode Otsu dipengaruhi oleh bentuk distribusi histogram. Pemisahan umumnya lebih baik ketika intensitas objek dan latar belakang membentuk dua kelompok yang dapat dibedakan. Sebaliknya, tumpang tindih distribusi intensitas, pencahayaan yang tidak merata, *noise*, serta perbedaan proporsi jumlah piksel objek dan latar belakang dapat menyebabkan nilai ambang bergeser [6], [7]. Penelitian pada citra mikroskop rambut tunggal dan kumpulan rambut juga menunjukkan bahwa nilai ambang dapat berbeda meskipun citra berada dalam kondisi fokus karena komposisi piksel objek dan latar belakangnya tidak sama [7].

Secara konseptual, nilai yang dihasilkan metode Otsu merepresentasikan ambang pemisah kelas intensitas, bukan ukuran ketajaman citra secara langsung. Nilai ambang dapat berubah ketika distribusi intensitas berubah, tetapi perubahan tersebut belum tentu hanya disebabkan oleh perubahan fokus. Oleh karena itu, metode Otsu lebih tepat digunakan sebagai metode segmentasi objek dan latar belakang, sedangkan tingkat ketajaman citra dinilai menggunakan fungsi evaluasi fokus.

2.6 *Region of Interest (ROI)*

Region of Interest (ROI) merupakan bagian terbatas dari citra yang dipilih sebagai area utama untuk dianalisis. Dalam autofokus berbasis citra, ROI dapat berfungsi sebagai jendela evaluasi fokus atau *focusing window*, yaitu area tempat fungsi evaluasi fokus dihitung. Penggunaan ROI memungkinkan analisis diarahkan pada bagian citra yang mengandung struktur objek, tekstur, atau tepi yang relevan tanpa harus memproses seluruh bidang citra [2], [5].

Tidak seluruh bagian citra memberikan informasi yang sama terhadap perubahan fokus. Area yang mengandung tepi dan tekstur umumnya menunjukkan perubahan intensitas yang lebih jelas ketika citra bergerak mendekati atau menjauhi bidang fokus. Sebaliknya, latar belakang yang relatif seragam hanya menyediakan sedikit informasi ketajaman dan dapat menyebabkan nilai evaluasi lebih mudah dipengaruhi oleh derau (*noise*) [5], [13]. Oleh karena itu, ROI perlu mencakup struktur objek yang memadai serta menghindari bagian citra yang tidak relevan.

ROI berbentuk persegi panjang dapat direpresentasikan berdasarkan koordinat awal, lebar, dan tinggi area sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.12).

$$\mathcal{R} = \{(x, y) \in \mathbb{Z}^2 \mid x_0 \leq x < x_0 + w, y_0 \leq y < y_0 + h\} \quad (2.12)$$

Keterangan:

$\mathcal{R}$: himpunan piksel yang termasuk dalam ROI.

x_0 : koordinat horizontal awal ROI.

y_0 : koordinat vertikal awal ROI.

w : lebar ROI dalam satuan piksel.

h : tinggi ROI dalam satuan piksel.

x : koordinat horizontal piksel.

y : koordinat vertikal piksel.

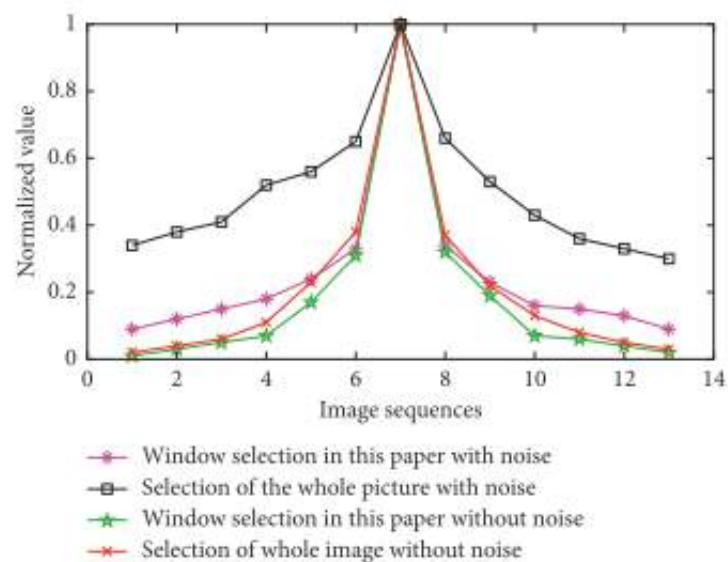
$\mathbb{Z}^2$: pasangan koordinat piksel berupa bilangan bulat.

Berdasarkan cara penentuannya, ROI dapat dibedakan menjadi ROI tetap dan ROI adaptif. ROI tetap mempunyai posisi serta ukuran yang sama pada seluruh rangkaian citra dan sesuai digunakan ketika letak objek relatif konsisten. ROI adaptif ditentukan berdasarkan informasi citra, seperti hasil segmentasi, distribusi tepi, atau posisi objek. Zhang dan Yao menggunakan hasil segmentasi dan distribusi piksel tepi untuk memilih area yang memiliki informasi dominan sebagai jendela fokus [2].

Ukuran ROI memengaruhi jumlah informasi citra, ketahanan terhadap derau, dan beban komputasi. ROI yang terlalu kecil dapat kehilangan sebagian struktur objek dan menjadi lebih sensitif terhadap derau atau pergeseran objek. Sebaliknya, ROI yang terlalu luas dapat memasukkan lebih banyak latar

belakang, mengurangi keterarahan evaluasi, dan menambah jumlah piksel yang diproses. Penelitian menunjukkan bahwa pengaruh ukuran jendela juga berbeda menurut karakteristik objek dan jenis operator evaluasi fokus yang digunakan [5], [13].

Dalam pengujian Zhang dan Yao, penggunaan jendela fokus dan seluruh citra menghasilkan kurva yang relatif serupa pada kondisi tanpa derau. Setelah derau ditambahkan, kurva yang dihitung dari seluruh citra mengalami kenaikan respons pada daerah tidak fokus, sedangkan penggunaan jendela fokus menghasilkan puncak utama yang lebih mudah dibedakan [2]. Perbandingan tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Perbandingan kinerja pemilihan jendela fokus dan seluruh citra pada kondisi dengan dan tanpa derau [2]

Pemilihan ROI pada akhirnya perlu mempertimbangkan kandungan informasi objek, ukuran area, karakteristik operator evaluasi fokus, dan kondisi derau citra. Kriteria penentuan ROI juga perlu diterapkan secara konsisten pada rangkaian citra agar perubahan nilai evaluasi terutama merepresentasikan perubahan ketajaman, bukan perubahan area yang dianalisis [2], [5], [13].

2.7 Fungsi Evaluasi Fokus Berbasis Gradien dan Laplacian

Fungsi evaluasi fokus atau *focus measure* merupakan fungsi yang mengubah informasi ketajaman pada citra menjadi suatu nilai numerik. Pada autofocus

berbasis citra, nilai tersebut dihitung terhadap citra yang diperoleh dari sejumlah posisi sepanjang sumbu Z. Hubungan antara posisi sumbu Z dan nilai evaluasi fokus membentuk kurva fokus. Untuk fungsi yang nilainya meningkat seiring bertambahnya ketajaman, posisi yang menghasilkan nilai maksimum digunakan sebagai kandidat posisi fokus [3], [5], [14].

Operator evaluasi fokus berbasis turunan memanfaatkan perubahan intensitas spasial pada citra. Proses defokus menyebabkan batas objek dan detail halus menjadi lebih kabur sehingga kandungan frekuensi spasial tinggi berkurang. Akibatnya, perbedaan intensitas antara piksel yang berdekatan menjadi lebih kecil. Gradien mengukur perubahan intensitas melalui turunan pertama, sedangkan Laplacian mengukur perubahan intensitas lokal melalui turunan kedua [5], [13], [14].

Fungsi evaluasi fokus yang baik diharapkan mempunyai nilai ekstrem utama yang berdekatan dengan bidang fokus, rentang respons yang memadai, bentuk puncak yang dapat dibedakan, dan jumlah nilai ekstrem lokal yang sedikit. Namun, respons suatu fungsi juga dipengaruhi oleh tekstur objek, kontras, pencahayaan, ukuran area evaluasi, resolusi citra, dan derau (*noise*). Oleh karena itu, operator yang memberikan hasil baik pada suatu objek atau sistem pencitraan belum tentu menghasilkan respons yang sama pada kondisi lainnya [5], [10], [14].

Nilai evaluasi fokus merupakan ukuran relatif, bukan ukuran ketajaman absolut yang berlaku untuk seluruh citra dan konfigurasi optik. Perbandingan paling tepat dilakukan terhadap rangkaian citra yang diperoleh dari objek, perbesaran, ROI, dan pengaturan kamera yang sama. Perbedaan kepadatan struktur, jumlah tepi, pencahayaan, atau perbesaran dapat mengubah skala nilai meskipun citra sama-sama berada dalam kondisi fokus [3], [5], [10].

2.7.1 Gradien Citra

Gradien citra menunjukkan besar dan arah perubahan intensitas pada suatu piksel. Gradien dua dimensi mempunyai komponen horizontal dan vertikal. Pada citra yang fokus, perpindahan intensitas pada batas objek umumnya terjadi lebih tajam sehingga respons gradiennya lebih besar. Sebaliknya, pengaburan akibat

defokus memperhalus perpindahan intensitas dan menurunkan respons gradien [5], [13], [14].

Komponen gradien dapat dihitung menggunakan beda pusat tak ternormalisasi. Komponen horizontal dan vertikal masing-masing dinyatakan menggunakan Persamaan (2.13) dan Persamaan (2.14).

$$G_x(x, y) = I(x + 1, y) - I(x - 1, y) \quad (2.13)$$

$$G_y(x, y) = I(x, y + 1) - I(x, y - 1) \quad (2.14)$$

Keterangan:

$G_x(x, y)$: komponen gradien arah horizontal pada koordinat (x, y) .

$G_y(x, y)$: komponen gradien arah vertikal pada koordinat (x, y) .

$I(x, y)$: nilai intensitas citra *grayscale* pada koordinat (x, y) .

x : koordinat horizontal atau posisi kolom piksel.

y : koordinat vertikal atau posisi baris piksel.

Pada pendekatan beda pusat yang dinormalisasi, kedua selisih tersebut dapat dibagi dengan dua ketika jarak antarpiksel dianggap satu satuan. Penghilangan faktor konstan tersebut hanya mengubah skala respons gradien dan tidak mengubah posisi nilai maksimum selama bentuk perhitungan yang sama digunakan pada seluruh citra.

Besar gradien diperoleh dengan menggabungkan komponen horizontal dan vertikal sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.15).

$$G(x, y) = \sqrt{G_x^2(x, y) + G_y^2(x, y)} \quad (2.15)$$

Keterangan:

$G(x, y)$: besar gradien pada koordinat (x, y) .

$G_x(x, y)$: komponen gradien arah horizontal.

$G_y(x, y)$: komponen gradien arah vertikal.

Nilai evaluasi fokus berbasis gradien dapat dibentuk dari energi gradien pada piksel yang termasuk dalam himpunan evaluasi ($\mathcal{E}$). Apabila ($N_{\mathcal{E}}$) merupakan jumlah piksel dalam himpunan tersebut, nilai evaluasi gradien dalam bentuk root mean square (RMS) dapat dinyatakan menggunakan Persamaan (2.16).

$$F_{\text{grad}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\mathcal{E}}} \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} [G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)]}, \quad N_{\mathcal{E}} > 0 \quad (2.16)$$

Keterangan:

F_{grad} : nilai evaluasi fokus berbasis gradien.

$\mathcal{E}$: himpunan piksel yang digunakan dalam evaluasi.

$N_{\mathcal{E}}$: jumlah piksel dalam himpunan $\mathcal{E}$.

$(x, y) \in \mathcal{E}$: piksel pada koordinat (x, y) yang termasuk himpunan evaluasi

$\sum$: operasi penjumlahan terhadap seluruh piksel dalam $\mathcal{E}$.

Himpunan ($\mathcal{E}$) dapat mencakup seluruh piksel di dalam ROI atau hanya piksel yang mengandung informasi struktural, seperti batas objek hasil segmentasi biner. Penggunaan RMS mengurangi ketergantungan langsung nilai evaluasi terhadap jumlah piksel karena jumlah energi dibagi dengan ($N_{\mathcal{E}}$). Prinsip kuadrat respons gradien tersebut sejalan dengan operator energi gradien dan *Tenengrad*, yang memberikan kontribusi lebih besar kepada perubahan intensitas yang kuat [5], [14].

Nilai F_{grad} yang tinggi menunjukkan adanya perubahan intensitas dan tepi yang relatif kuat. Meskipun demikian, gradien juga memberikan respons terhadap tekstur berfrekuensi tinggi, derau sensor, dan artefak citra. Pemilihan area evaluasi dan karakteristik piksel yang dianalisis perlu dilakukan secara konsisten agar perubahan nilainya lebih mencerminkan perubahan ketajaman [5], [10], [14].

2.7.2 Laplacian Citra

Laplacian merupakan operator turunan kedua yang menunjukkan perubahan lokal pada gradien intensitas. Operator tersebut memberikan respons besar pada bagian citra yang mengalami perubahan intensitas secara cepat, seperti tepi, garis, dan detail halus. Karena detail tersebut umumnya lebih kuat pada citra fokus, energi Laplacian dapat digunakan sebagai fungsi evaluasi focus [3], [5], [13].

Pada citra digital, respons Laplacian dapat dihitung menggunakan hubungan antara satu piksel pusat dan empat piksel tetangganya. Salah satu bentuk diskritnya dinyatakan melalui Persamaan (2.17).

$$L(x, y) = 4I(x, y) - I(x - 1, y) - I(x + 1, y) - I(x, y - 1) - I(x, y + 1) \quad (2.17)$$

Keterangan:

- $L(x, y)$: respons Laplacian pada koordinat (x, y) .
 $I(x, y)$: nilai intensitas piksel pusat.
 $I(x - 1, y)$: nilai intensitas piksel di sebelah kiri.
 $I(x + 1, y)$: nilai intensitas piksel di sebelah kanan.
 $I(x, y - 1)$: nilai intensitas piksel di sebelah atas.
 $I(x, y + 1)$: nilai intensitas piksel di sebelah bawah.

Sebagian literatur menggunakan susunan dengan tanda yang berlawanan, yaitu jumlah keempat piksel tetangga dikurangi empat kali piksel pusat. Kedua konvensi tersebut hanya menghasilkan perbedaan tanda. Perbedaan itu tidak memengaruhi fungsi evaluasi yang menggunakan nilai absolut atau kuadrat respons Laplacian.

Respons Laplacian pada piksel yang dipilih dapat digabungkan menggunakan RMS sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.18).

$$F_{\text{lap}} = \sqrt{\frac{1}{N_{\mathcal{E}}} \sum_{(x,y) \in \mathcal{E}} L^2(x, y)}, \quad N_{\mathcal{E}} > 0 \quad (2.18)$$

Keterangan:

- F_{lap} : nilai evaluasi fokus berbasis Laplacian.
 $\mathcal{E}$: himpunan piksel yang digunakan dalam evaluasi.
 $N_{\mathcal{E}}$: jumlah piksel dalam himpunan $\mathcal{E}$.
 $L(x, y)$: respons Laplacian pada koordinat (x, y) .

Nilai F_{lap} yang tinggi menunjukkan bahwa area yang dianalisis mempunyai perubahan intensitas lokal dan detail yang kuat. Pendekatan tersebut sesuai dengan prinsip energi Laplacian, yaitu menjumlahkan kuadrat respons turunan kedua sebagai ukuran ketajaman citra [3], [5].

Karena menggunakan turunan kedua, Laplacian lebih peka terhadap derau dan artefak lokal dibandingkan operator turunan pertama. Piksel rusak, gangguan akuisisi, serta resolusi digital yang terlalu tinggi dibandingkan resolusi optik dapat menghasilkan respons yang besar meskipun tidak merepresentasikan fokus. Oleh sebab itu, nilai Laplacian perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan ROI, resolusi citra, karakteristik objek, dan kestabilan proses akuisisi [3], [5], [10].

2.7.3 Pembentukan *Focus Score*

Gradien dan Laplacian memberikan informasi ketajaman berdasarkan karakteristik yang berbeda. Gradien menunjukkan kekuatan perubahan intensitas melalui turunan pertama, sedangkan Laplacian menunjukkan perubahan lokal melalui turunan kedua. Kedua nilai yang telah dinyatakan dalam bentuk nonnegatif dapat digabungkan menggunakan model penjumlahan berbobot.

Bentuk umum penggabungan nilai evaluasi gradien dan Laplacian menjadi *Focus Score* dinyatakan melalui Persamaan (2.19).

$$F = s(F_{\text{grad}} + \lambda F_{\text{lap}}), \quad \lambda \geq 0, s > 0 \quad (2.19)$$

Keterangan:

F : nilai fungsi evaluasi fokus gabungan atau *Focus Score*.

F_{grad} : nilai evaluasi fokus berbasis gradien.

F_{lap} : nilai evaluasi fokus berbasis Laplacian.

λ : bobot relatif komponen Laplacian terhadap komponen gradien.

s : faktor penskalaan nilai akhir.

Bobot λ digunakan untuk menyeimbangkan kontribusi kedua komponen, terutama apabila respons gradien dan Laplacian mempunyai rentang nilai yang berbeda. Faktor digunakan untuk mengubah skala nilai agar lebih mudah disajikan atau diolah. Selama bernilai positif dan diterapkan secara konstan, faktor (s) tidak mengubah urutan nilai maupun posisi maksimum pada kurva fokus.

Persamaan (2.19) merupakan model agregasi berbobot, bukan operator baku yang disalin secara utuh dari satu sumber. Dasar ilmiahnya berasal dari penggunaan energi gradien dan energi Laplacian sebagai fungsi evaluasi focus [3], [5], [13], [14]. Nilai bobot perlu dipilih secara konsisten agar salah satu komponen tidak mendominasi hanya karena mempunyai rentang numerik yang lebih besar.

Nilai *Focus Score* yang lebih tinggi menunjukkan bahwa area evaluasi mempunyai respons gradien dan Laplacian gabungan yang lebih kuat. Dalam satu rangkaian citra dengan objek dan kondisi akuisisi yang tetap, posisi

dengan nilai maksimum dapat digunakan sebagai kandidat posisi fokus. Namun, nilai maksimum lokal yang disebabkan oleh derau, perubahan pencahayaan, atau artefak tetap dapat terjadi. Oleh karena itu, *Focus Score* harus dipahami sebagai ukuran relatif dalam satu rangkaian akuisisi, bukan sebagai nilai ketajaman absolut yang dapat langsung dibandingkan antara objek, perbesaran, atau pengaturan kamera yang berbeda [3], [5], [10].

2.8 Perangkat Keras

Perangkat keras merupakan komponen fisik yang mendukung pengoperasian sistem autofokus mikroskop digital. Komponen tersebut meliputi unit pengendali, akuisisi citra, penggerak, pendeteksi batas, penampil informasi, dan pengatur catu daya. Fungsi dan karakteristik setiap komponen dijelaskan pada anak subbab berikutnya.

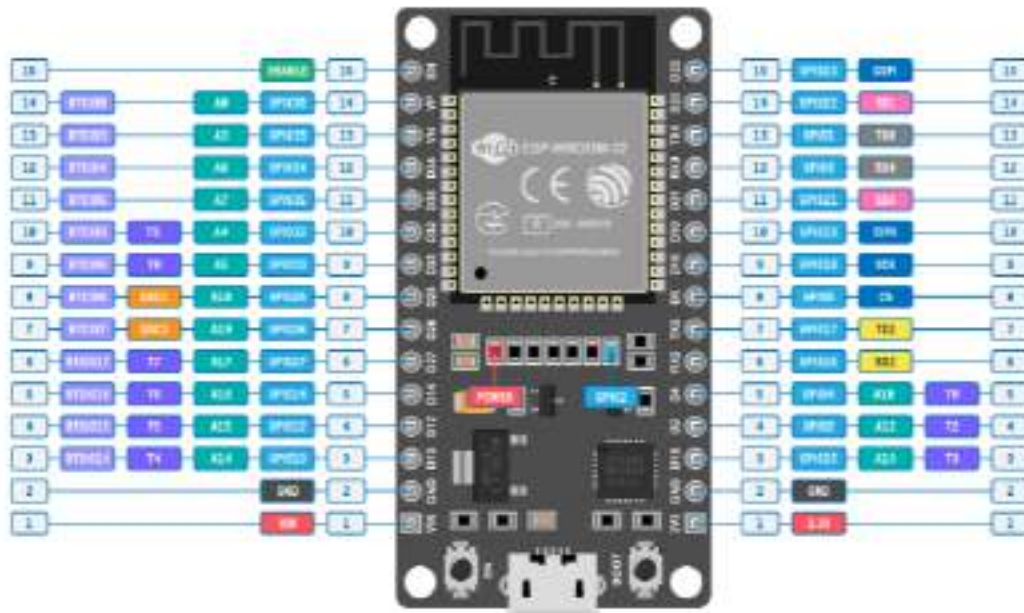
2.8.1 Mikrokontroler ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler dalam bentuk *system-on-chip* (SoC) yang dikembangkan oleh Espressif Systems. SoC tersebut mengintegrasikan unit pemroses, memori, periferal masukan-keluaran, serta konektivitas Wi-Fi dan Bluetooth. Pada papan pengembangan, SoC ESP32 ditempatkan dalam modul ESP-WROOM-32 bersama memori *flash*, antena PCB, dan osilator. Papan pengembangan kemudian menambahkan regulator tegangan, antarmuka USB, tombol *enable* dan *boot*, serta pin *header* agar modul mudah diprogram dan dihubungkan dengan perangkat lain [15], [16].

ESP-WROOM-32 menggunakan CPU Xtensa LX6 32-bit dua inti dengan frekuensi hingga 240 MHz. Modul ini memiliki ROM 448 KB, SRAM 520 KB, SPI *flash* 4 MB, Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n pada pita 2,4 GHz, serta Bluetooth v4.2 BR/EDR dan Bluetooth Low Energy [15]. Selain itu, SoC ESP32 menyediakan ADC, DAC, UART, SPI, I²C, I²S, PWM, pencacah pulsa, dan *remote control peripheral* (RMT) [17].

Papan yang digunakan merupakan varian 30 pin berbasis modul ESP-WROOM-32. Pin pada papan bersifat multifungsi, tetapi tidak seluruhnya memiliki kemampuan yang sama. GPIO34, GPIO35, GPIO36, dan GPIO39 hanya dapat digunakan sebagai masukan. Oleh karena itu, fungsi setiap GPIO perlu diperhatikan

ketika papan dihubungkan dengan sensor, penggerak, atau perangkat komunikasi [18]. Berikut tampilan mikrokontroler ESP32 ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 ESP32 30 pin berbasis ESP-WROOM-32 [18]

ESP32 memiliki karakteristik teknis yang mendukung penggunaannya sebagai perangkat kendali, terutama dalam aspek kemampuan pemrosesan, kapasitas memori, konektivitas nirkabel, dan periferal masukan-keluaran. Spesifikasi teknis utama ESP32-WROOM-32 disajikan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Spesifikasi utama papan pengembangan ESP32

Parameter	Spesifikasi
Jenis papan	Papan pengembangan ESP32 30 pin
Modul utama	ESP-WROOM-32 dengan antenna PCB
SoC	ESP32-D0WDQ6
Unit pemroses	Xtensa LX6 32-bit, dua inti
Frekuensi maksimum	240 MHz
Memori internal	ROM 448 KB dan SRAM 520 KB
Memori <i>flash</i>	SPI <i>flash</i> 4 MB
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n, pita 2,4 GHz
Bluetooth	Bluetooth v4.2 BR/EDR dan Bluetooth Low Energy

Parameter	Spesifikasi
Tegangan kerja modul	3,0–3,6 V; nominal 3,3 V
GPIO pada papan	25 GPIO dibawa ke <i>header</i> ; GPIO34, GPIO35, GPIO36, dan GPIO39 hanya sebagai masukan
ADC dan DAC	ADC SAR 12-bit hingga 18 kanal serta dua DAC 8-bit pada SoC
Antarmuka komunikasi	Tiga UART, empat SPI, dua I ² C, dan dua I ² S
Periferal kendali	LED PWM, Motor PWM, pencacah pulsa, dan RMT
Fasilitas papan	USB Type-C, tombol <i>enable</i> , tombol <i>boot</i> , regulator tegangan, dan dua baris pin <i>header</i>

Kemampuan ADC, DAC, dan antarmuka pada tabel merupakan kemampuan SoC. Tidak seluruh kanal dapat digunakan secara bersamaan karena sebagian pin memiliki fungsi yang saling berbagi. Pada sistem autofocus, ESP32 digunakan sebagai unit pengendali gerakan dan komunikasi perangkat keras, sedangkan pengolahan citra serta perhitungan Focus Score dilakukan pada komputer.

2.8.2 Kamera Optilab

Kamera mikroskop digital merupakan perangkat akuisisi citra yang dipasang pada jalur optik mikroskop untuk menangkap bayangan objek dan mengubahnya menjadi data digital. Kamera dengan sensor *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS) menggunakan susunan piksel peka cahaya untuk mengubah energi cahaya menjadi sinyal listrik. Sinyal tersebut kemudian dibaca dan dikonversi menjadi data citra yang dapat ditampilkan serta diolah menggunakan komputer [19].

Kamera OptiLab dapat dihubungkan dengan mikroskop dan komputer melalui antarmuka USB. Perangkat ini memungkinkan objek mikroskopis ditampilkan secara langsung, diambil sebagai foto, dan direkam dalam bentuk video [20]. Dalam sistem autofocus berbasis citra, hasil tangkapan kamera menjadi masukan untuk mengevaluasi tingkat ketajaman pada setiap posisi fokus. Oleh karena itu, resolusi, laju bingkai, pencahayaan, dan kestabilan akuisisi citra dapat

memengaruhi informasi ketajaman yang diperoleh. Berikut tampilan kamera OptiLab ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Kamera mikroskop digital OptiLab

Karakteristik teknis Kamera OptiLab meliputi jenis sensor, resolusi citra, laju bingkai, format video, dan antarmuka komunikasi sebagaimana disajikan pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi kamera mikroskop digital OptiLab

Parameter	Spesifikasi
Jenis perangkat	Kamera mikroskop digital OptiLab berbasis USB
Jenis sensor	Sensor CMOS warna
Resolusi nominal	Hingga 5 MP
Resolusi video	Hingga 1280 × 960 piksel
Resolusi foto	Hingga 2560 × 1920 piksel
Frame rate	Hingga 30 fps
Format video	RGB24 dan I420
Antarmuka komunikasi	USB 2.0 dan kompatibel dengan USB 1.1
Konsumsi arus	Kurang dari 400 mA
Kontrol otomatis	<i>Automatic exposure</i> dan <i>automatic white balance</i>
Sistem operasi	Windows XP dan Windows Vista
Fitur tambahan	<i>Low-light sensitivity</i> dan <i>backlight compensation</i>

2.8.3 Limit Switch

Limit switch merupakan sakelar elektromekanis yang digunakan untuk mendeteksi ketika suatu bagian bergerak telah mencapai posisi atau batas tertentu.

Perubahan posisi mekanis diterima oleh aktuator, kemudian diteruskan menuju mekanisme internal untuk mengubah hubungan kontak listrik. Pada *microswitch*, perpindahan kontak berlangsung melalui mekanisme *snap-action* sehingga kontak dapat berpindah dengan cepat setelah aktuator mencapai titik operasinya [21].

Jenis *limit switch* yang digunakan adalah *microswitch* KW12-3 dengan nomor produk 101411. Komponen ini dilengkapi tuas logam dengan roda pada bagian ujungnya. Sakelar akan aktif ketika tuas menerima gaya dari bagian mekanis dan kembali ke kondisi awal ketika gaya tersebut dilepaskan [22]. KW12-3 menyediakan kontak *normally open* (NO) dan *normally closed* (NC). Pada kondisi aktuator tidak ditekan, terminal *common* (COM) terhubung dengan NC, sedangkan ketika aktuator ditekan, kontak berpindah sehingga COM terhubung dengan NO [21].

Pada sistem penggerak, *limit switch* dapat ditempatkan pada ujung lintasan untuk mendeteksi batas gerakan dan memberikan sinyal kepada sistem pengendali. Penggabungan *limit switch* dengan motor *stepper* memungkinkan titik ekstrem suatu sumbu diketahui sehingga pergerakan dapat dilakukan dalam rentang yang telah ditentukan [24]. Pada sistem autofokus mikroskop digital, komponen ini digunakan untuk mendeteksi batas atas dan batas bawah pergerakan sumbu Z serta mendukung penentuan posisi acuan pada proses *homing*. Berikut tampilan Microswitch KW12-3 ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Microswitch KW12-3 dengan aktuator tuas beroda [22]

KW12-3 mempunyai karakteristik teknis yang mencakup konfigurasi kontak, kemampuan arus, ukuran fisik, dan massa sebagaimana disajikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Spesifikasi *microswitch* KW12-3

Parameter	Spesifikasi
Model	KW12-3
Nomor produk	101411
Jenis komponen	<i>Microswitch</i>
Jenis aktuator	Tuas beroda atau <i>roller lever</i>
Konfigurasi kontak	N/O dan N/C
Arus maksimum	5 A
Dimensi	20 × 10 × 6 mm
Massa	5 g

2.8.4 *Driver* TB6600

Driver motor *stepper* merupakan perangkat elektronik yang berfungsi sebagai penghubung antara mikrokontroler dan motor *stepper*. Sinyal logika yang dihasilkan mikrokontroler tidak dapat secara langsung menggerakkan kumparan motor karena memiliki daya yang terbatas. Oleh karena itu, *driver* mengubah sinyal kendali menjadi aliran arus pada kumparan motor sehingga rotor dapat bergerak dan mempertahankan posisi secara bertahap. TB6600 tipe DRI0043 digunakan untuk mengendalikan motor *stepper* bipolar dua fase serta dilengkapi isolasi *optocoupler* pada bagian masukan [23].

Pengendalian gerakan dilakukan melalui terminal PUL, DIR, dan ENA. Terminal PUL menerima pulsa yang menentukan jumlah langkah motor, sedangkan frekuensi pulsa memengaruhi kecepatan putar. Terminal DIR menentukan arah putaran dan terminal ENA digunakan untuk mengaktifkan atau menonaktifkan keluaran *driver*. Setiap terminal kendali terdiri atas pasangan positif dan negatif, yaitu PUL+/PUL−, DIR+/DIR−, serta ENA+/ENA− [23].

TB6600 memiliki enam sakelar DIP untuk mengatur resolusi *microstep* dan arus keluaran. SW1–SW3 digunakan untuk memilih resolusi langkah, sedangkan SW4–SW6 digunakan untuk mengatur arus sesuai dengan kebutuhan motor. Pengaturan *microstep* membagi satu langkah penuh menjadi beberapa langkah yang lebih kecil sehingga resolusi gerakan meningkat dan perpindahan motor menjadi lebih halus. Pada varian DRI0043, dokumentasi perangkat mencantumkan

TB67S109AFTG sebagai IC penggerak internal. IC tersebut menggunakan kendali arus konstan berbasis PWM dan mendukung resolusi hingga 1/32 langkah [24].

Dalam sistem autofokus mikroskop digital, *driver* TB6600 menerima sinyal kendali dari ESP32 dan mengatur arus pada kumparan motor *stepper*. Proses tersebut memungkinkan arah, kecepatan, dan jumlah langkah pergerakan mekanisme pemfokusan dikendalikan sesuai dengan kebutuhan sistem. Berikut tampilan Modul driver motor TB6600 ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Modul Driver Motor TB6600 [23]

Dari Gambar 2.8, berikut spesifikasi dari modul *driver* TB6600 tipe DRI0043 disajikan pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Modul driver motor TB6600

Parameter	Spesifikasi
Jenis perangkat	<i>Microstep driver motor stepper</i>
Jenis motor	Motor <i>stepper</i> bipolar dua fase
Tegangan catu daya	9–42 VDC
Arus masukan	0–5 A
Arus keluaran	0,5–4,0 A
Tegangan sinyal kendali	3,3–24 V
Terminal kendali	PUL+/PUL–, DIR+/DIR–, dan ENA+/ENA–
Pengaturan <i>microstep</i>	1, 2/A, 2/B, 4, 8, 16, dan 32
Pengaturan arus	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 2,8; 3,0; dan 3,5 A
Jumlah sakelar DIP	Enam sakelar

Parameter	Spesifikasi
Daya maksimum	160 W
Isolasi sinyal	<i>Optocoupler</i> berkecepatan tinggi
Perlindungan	Polaritas terbalik, panas berlebih, arus berlebih, dan hubung singkat
Suhu pengoperasian	−10 hingga 45 °C
IC penggerak pada DRI0043	<i>TB67S109AFTG</i>

2.8.5 Motor Stepper

Motor stepper merupakan aktuator elektromekanis yang mengubah pulsa listrik menjadi perpindahan sudut secara bertahap. Setiap pulsa yang diterima menyebabkan rotor bergerak sebesar sudut langkah tertentu. Jumlah pulsa menentukan besar perpindahan sudut, sedangkan frekuensi pulsa memengaruhi kecepatan putaran motor [25].

Motor stepper tersusun atas stator, rotor, dan kumparan fase. Stator menghasilkan medan magnet ketika kumparannya dialiri arus, sedangkan rotor bergerak mengikuti perubahan posisi medan magnet tersebut. Pada motor stepper hibrida, rotor menggunakan magnet permanen dan struktur bergigi sehingga dapat menghasilkan perpindahan sudut yang relatif kecil serta mempertahankan posisi ketika kumparan masih dialiri arus [26].

Motor stepper umumnya dikendalikan menggunakan sistem *open-loop*. Pada sistem tersebut, posisi rotor ditentukan berdasarkan jumlah pulsa yang diberikan tanpa menggunakan sensor untuk mengukur posisi aktual rotor. Pengendalian ini relatif sederhana, tetapi motor dapat kehilangan langkah apabila beban yang diterima melebihi kemampuan torsiya [27]. Jumlah step dalam satu putaran penuh dapat menggunakan persamaan (2.20).

$$N_s = \frac{360^\circ}{\theta_s} \quad (2.20)$$

Keterangan:

N_s : jumlah langkah penuh dalam satu putaran.

θ_s : sudut langkah motor (°/step).

Pada mode *full-step*, setiap pulsa menghasilkan satu langkah penuh sesuai dengan sudut langkah dasar motor. Sementara itu, mode *microstep* membagi satu langkah penuh menjadi beberapa langkah yang lebih kecil melalui pengaturan arus pada setiap fase motor. Jumlah pulsa yang diperlukan dalam satu putaran pada mode *microstep* dapat dihitung menggunakan persamaan (2.21).

$$N_{p,rev} = M \times N_s \quad (2.21)$$

Keterangan:

$N_{p,rev}$: jumlah pulsa dalam satu putaran.

M : faktor pembagian *microstep*.

N_s : jumlah langkah penuh dalam satu putaran.

Peningkatan faktor microstep memperbesar jumlah pulsa yang diperlukan dalam satu putaran. Penggunaan microstep dapat meningkatkan resolusi gerakan serta membantu mengurangi getaran dan kebisingan motor, khususnya pada kecepatan rendah [27].

NEMA 17 dan NEMA 23 merupakan kelompok motor stepper yang dibedakan berdasarkan ukuran rangkanya. Meskipun mempunyai prinsip kerja yang sama, karakteristik kelistrikan dan mekanisnya dapat berbeda bergantung pada seri motor, seperti sudut langkah, arus nominal, torsi penahan, resistansi, induktansi, dan massa. Berikut tampilan motor stepper NEMA 23 dan NEMA 17 ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Motor stepper: (a) NEMA 17 dan (b) NEMA 23 [27], [28]

NEMA 17 dan NEMA 23 menunjukkan standar ukuran rangka motor, bukan satu model dengan spesifikasi kelistrikan dan mekanis yang sama. Oleh karena itu, Tabel 2.6 menyajikan rentang karakteristik umum motor stepper NEMA 17 dan NEMA 23 berdasarkan sumber yang digunakan. Spesifikasi aktual dapat berbeda bergantung pada seri dan produsen motor.

Tabel 2.6 Rentang karakteristik umum motor stepper NEMA 17 dan NEMA 23

Parameter	Spesifikasi NEMA17	Spesifikasi NEMA 23
Sudut langkah	1,8°	1,8°
Arus nominal per fase	1,7 A	0,62–4,2 A
Torsi penahan	40 N·cm	40–280 N·cm
Resistansi per fase	1,5 Ω	0,4–13 Ω
Induktansi per fase	2,8 mH	1,2–28 mH
Massa	280 g	470–1.700 g

2.8.6 LCD I2C 16×2

Liquid Crystal Display (LCD) I2C 16×2 merupakan modul penampil karakter yang memiliki 16 kolom dan dua baris sehingga dapat menampilkan hingga 32 karakter. Setiap bidang karakter tersusun atas matriks titik 5×8 yang membentuk huruf, angka, dan simbol [29], [30].

Pengaturan tampilan dilakukan oleh pengendali yang kompatibel dengan HD44780U. Pengendali tersebut menyediakan memori tampilan, pembangkit karakter, pengaturan kursor, dan rangkaian penggerak LCD. Pertukaran data antara pengendali dan perangkat luar dapat dilakukan menggunakan antarmuka paralel 4-bit atau 8-bit [29].

Untuk mengubah antarmuka paralel menjadi komunikasi I2C, LCD dilengkapi modul ekspander PCF8574. IC tersebut menerima data serial melalui jalur *serial data* (SDA) dan *serial clock* (SCL), kemudian meneruskannya dalam bentuk sinyal paralel menuju pengendali LCD. PCF8574 menyediakan delapan jalur masukan/keluaran P0–P7, sedangkan alamat komunikasinya ditentukan oleh kondisi A0, A1, dan A2 [31]. Modul LCD I²C umumnya mempunyai empat terminal, yaitu VCC, GND, SDA, dan SCL, serta potensiometer untuk mengatur kontras tampilan [30]. Berikut tampilan LCD 16×2 ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 LCD 16×2 dengan modul antarmuka I²C [32]

Tabel 2.7 Spesifikasi LCD I²C 16×2

Parameter	Keterangan
Jenis tampilan	LCD karakter alfanumerik
Kapasitas tampilan	16 karakter × 2 baris
Matriks karakter	5 × 8 titik
Pengendali LCD	Kompatibel dengan HD44780U
Ekspander masukan/keluaran	PCF8574, 8-bit
Jalur komunikasi	I2C melalui SDA dan SCL
Tegangan modul acuan	5 V
Terminal modul	VCC, GND, SDA, dan SCL
Alamat I2C umum	0x27
Pengaturan kontras	Potensiometer

2.8.7 LM2596

LM2596 merupakan rangkaian terpadu regulator tegangan *switching* yang bekerja sebagai konverter DC–DC tipe *step-down* atau *buck*. Konverter *buck* digunakan untuk menghasilkan tegangan keluaran DC yang lebih rendah daripada tegangan masukannya melalui proses pensaklaran. Proses tersebut melibatkan penyimpanan dan pelepasan energi pada induktor serta penggunaan dioda dan kapasitor untuk mempertahankan aliran arus dan mengurangi perubahan tegangan pada sisi keluaran [33], [34].

LM2596 mengintegrasikan fungsi aktif yang diperlukan untuk mengendalikan proses pensaklaran pada konverter *buck*. IC ini menggunakan osilator internal dengan frekuensi nominal 150 kHz dan dirancang untuk memberikan arus beban hingga 3 A. LM2596 tersedia dalam versi keluaran tetap

3,3 V, 5 V, dan 12 V serta versi *adjustable*. Pada versi *adjustable*, tegangan keluaran dapat diatur pada rentang 1,2–37 V, sedangkan rentang tegangan masukan operasinya mencapai 4,5–40 V [33].

Pengaturan tegangan keluaran pada LM2596 versi *adjustable* dilakukan melalui pin *feedback*. Tegangan keluaran diumpankan kembali menuju rangkaian pengendali melalui pembagi resistif sehingga regulator dapat menyesuaikan proses pensaklaran untuk mempertahankan tegangan pada nilai yang ditentukan. Selain rangkaian internal tersebut, pengoperasian LM2596 memerlukan komponen eksternal berupa induktor, *catch diode*, kapasitor masukan, dan kapasitor keluaran. Pemilihan komponen eksternal tersebut memengaruhi karakteristik kerja regulator, termasuk kestabilan dan riak tegangan keluaran [33].

LM2596 juga memiliki fungsi perlindungan berupa pembatas arus (*current-limit protection*) dan penghentian akibat temperatur berlebih (*thermal shutdown*). Karakteristik tersebut memberikan perlindungan terhadap kondisi operasi yang dapat menyebabkan arus atau temperatur internal melebihi batas kerja perangkat [33]. Ringkasan karakteristik utama LM2596 disajikan pada Tabel 2.8.

Tabel 2.8 Karakteristik IC LM2596S-ADJ

Parameter	Keterangan
Jenis konverter	DC–DC <i>step-down</i> (<i>buck</i>)
Rentang tegangan masukan	4,5–40 VDC
Versi tegangan keluaran tetap	3,3 V; 5 V; dan 12 V
Rentang keluaran versi <i>adjustable</i>	1,2–37 VDC
Arus beban	3A
Frekuensi pensaklaran nominal	150 kHz
Komponen eksternal utama	nduktor, <i>catch diode</i> , kapasitor masukan, dan kapasitor keluaran
Proteksi internal	<i>Current limit</i> dan <i>thermal shutdown</i>

Modul regulator tegangan berbasis LM2596 yang digunakan sebagai penurun tegangan pada sistem ditunjukkan pada Gambar 2.11. Modul tersebut mengintegrasikan IC LM2596 dengan induktor, dioda, kapasitor, dan komponen pengatur tegangan keluaran [33].



Gambar 2.11 Modul LM2596 [35]

2.8.8 Power Supply

Catu daya merupakan perangkat yang berfungsi mengubah dan mengatur energi listrik sehingga menghasilkan tegangan dan arus yang sesuai dengan kebutuhan beban. Pada sistem elektronika yang menggunakan sumber dari jaringan listrik, catu daya AC–DC melakukan konversi tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah *switch mode power supply* (SMPS), yaitu catu daya yang mengatur proses konversi energi melalui kerja sakelar semikonduktor pada frekuensi tertentu [36].

SMPS memiliki beberapa topologi yang pemilihannya bergantung pada jenis masukan, tegangan keluaran, daya, kebutuhan isolasi, serta karakteristik beban. Pada catu daya AC–DC berdaya rendah, *flyback converter* merupakan salah satu topologi yang dapat digunakan karena memungkinkan proses konversi sekaligus isolasi antara sisi masukan dan keluaran [37]. Secara umum, tegangan AC disearahkan menjadi tegangan DC, kemudian energi diproses melalui rangkaian pensaklaran dan diteruskan menuju sisi keluaran. Tegangan keluaran dipantau melalui rangkaian umpan balik agar proses pensaklaran dapat dikendalikan sehingga keluaran tetap berada pada nilai yang ditentukan [37].

Karakteristik catu daya ditentukan oleh beberapa parameter, terutama tegangan masukan, tegangan keluaran, arus keluaran, dan kemampuan daya. Parameter lain seperti *output-voltage ripple*, regulasi beban, efisiensi, serta temperatur kerja juga digunakan untuk mengevaluasi karakteristik suatu catu daya apabila informasi tersebut tersedia pada lembar data perangkat [36]. Hubungan daya keluaran dengan tegangan dan arus dapat dinyatakan sebagai hasil perkalian

tegangan keluaran dan arus keluaran. Dengan keluaran nominal 12 VDC dan 5 A, catu daya mempunyai kapasitas daya nominal sebesar 60 W.

Catu daya yang digunakan adalah *switching power supply* model SSS-60-12. Berdasarkan informasi pada label perangkat, catu daya tersebut mempunyai masukan nominal 220 VAC $\pm 15\%$ dengan frekuensi 50/60 Hz serta menghasilkan keluaran 12 VDC dengan arus nominal 5 A. Berikut tampilan catu daya SSS-60-12 ditunjukkan pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Catu daya SSS-60-12

Dari Gambar 2.12, berikut spesifikasi dari catu daya SSS-60-12 disajikan pada Tabel 2.9.

Tabel 2.9 Karakteristik catu daya SSS-60-12

Parameter	Keterangan
Model	SSS-60-12
Jenis catu daya	<i>Switching power supply</i> AC–DC
Tegangan masukan	220 VAC $\pm 15\%$
Frekuensi masukan	50/60 Hz
Tegangan keluaran	12 VDC
Arus keluaran nominal	5 A
Daya keluaran nominal	60 W

Nilai tegangan masukan, frekuensi, tegangan keluaran, dan arus keluaran pada tabel merupakan informasi yang tercantum pada label perangkat. Daya keluaran nominal sebesar 60 W diperoleh dari hasil perkalian tegangan keluaran 12 V dengan arus keluaran 5 A. Nilai *ripple*, efisiensi, regulasi tegangan, dan

karakteristik proteksi tidak dicantumkan karena tidak tersedia pada label perangkat maupun lembar data resmi yang dapat diverifikasi.

2.9 Komunikasi Data

Komunikasi data merupakan proses pertukaran informasi antara dua atau lebih perangkat melalui media komunikasi dengan aturan atau protokol tertentu. Pada sistem berbasis mikrokontroler, komunikasi data memungkinkan perangkat pengendali bertukar perintah, status, parameter, maupun hasil pemrosesan dengan perangkat lain. Pertukaran data dapat dilakukan melalui media berkabel maupun nirkabel sesuai dengan kebutuhan sistem.

ESP32 memiliki kemampuan komunikasi nirkabel melalui Wi-Fi serta menyediakan antarmuka komunikasi serial yang dapat digunakan untuk pertukaran data dengan perangkat eksternal. Penggunaan ESP32 pada sistem pemantauan dan kendali berbasis *Internet of Things* juga menunjukkan pemanfaatan komunikasi TCP/IP sebagai bagian dari pertukaran informasi antara perangkat kendali dan sistem pemantauan [38]. Pada sistem autofokus mikroskop digital, komunikasi data digunakan untuk membentuk hubungan dua arah antara aplikasi komputer dan mikrokontroler ESP32. Komunikasi Wi-Fi berbasis TCP digunakan sebagai jalur utama pengiriman perintah dan status, sedangkan komunikasi serial USB/UART disediakan sebagai jalur cadangan untuk pengujian dan pemeriksaan perangkat.

2.9.1 Komunikasi Wi-Fi Berbasis TCP

Wi-Fi merupakan teknologi jaringan nirkabel yang memungkinkan perangkat melakukan pertukaran data melalui gelombang radio. ESP32 mendukung Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dan dapat dioperasikan dalam beberapa mode, di antaranya *station* (STA) dan *access point* (AP). Pada mode *station*, ESP32 terhubung ke jaringan Wi-Fi yang telah tersedia, sedangkan pada mode *access point* atau *Soft-AP*, ESP32 membentuk jaringan Wi-Fi yang dapat digunakan oleh perangkat lain untuk melakukan koneksi [39].

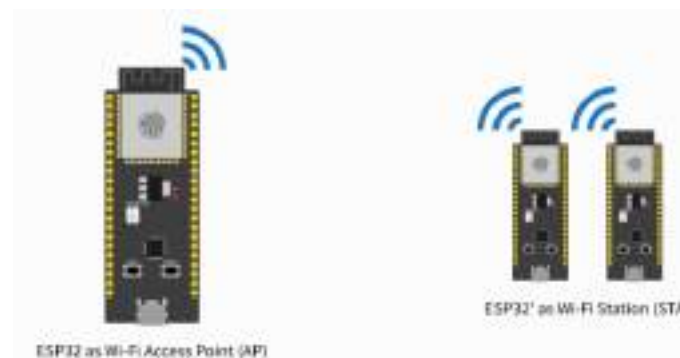
Pada mode *Soft-AP*, ESP32 menyediakan jaringan dengan identitas *Service Set Identifier* (SSID) dan dapat memiliki alamat IP pada jaringan lokal. Perangkat lain yang terhubung bertindak sebagai *station* dan memperoleh jalur komunikasi menuju ESP32. Konfigurasi tersebut memungkinkan hubungan langsung antara

ESP32 dan perangkat komputasi tanpa memerlukan *access point* atau router tambahan [39].

Pertukaran data pada jaringan Wi-Fi dapat dilakukan menggunakan *Transmission Control Protocol* (TCP). TCP merupakan protokol transport berbasis koneksi yang menyediakan layanan aliran byte secara andal dan berurutan. Keandalan tersebut didukung oleh penggunaan nomor urut, pemeriksaan kesalahan, pengakuan penerimaan, serta pengiriman ulang data ketika terjadi kehilangan selama proses transmisi [40].

Hubungan TCP dibentuk antara dua titik akhir yang dikenali melalui alamat jaringan dan nomor *port*. Salah satu perangkat dapat bertindak sebagai *server* yang menunggu permintaan koneksi pada *port* tertentu, sedangkan perangkat lainnya bertindak sebagai *client* yang memulai koneksi. Setelah hubungan terbentuk, data dapat dipertukarkan secara dua arah melalui koneksi yang sama [40]. TCP memperlakukan data sebagai aliran byte sehingga batas antara satu pesan dan pesan lainnya perlu ditentukan pada tingkat aplikasi menggunakan aturan pembungkai pesan yang konsisten.

Pada sistem autofocus, ESP32 berperan sebagai *access point* sekaligus TCP *server*, sedangkan aplikasi pada komputer terhubung sebagai *station* dan TCP *client*. Hubungan tersebut memungkinkan aplikasi mengirimkan perintah kendali dan menerima informasi status perangkat melalui jaringan Wi-Fi lokal. Susunan konseptual komunikasi Wi-Fi berbasis TCP ditunjukkan pada Gambar 2.13.



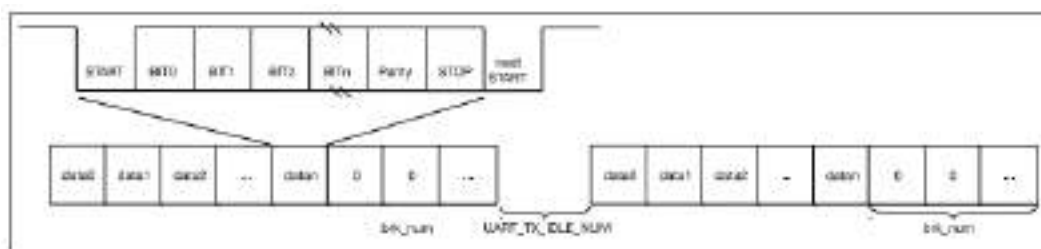
Gambar 2.13 Topologi komunikasi Wi-Fi berbasis TCP antara komputer dan ESP32 [40]

2.9.2 Komunikasi Serial/UART

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART) merupakan antarmuka komunikasi serial asinkron yang mengirimkan data secara berurutan tanpa menggunakan sinyal *clock* bersama antara perangkat pengirim dan penerima. Sinkronisasi komunikasi dilakukan berdasarkan laju transmisi yang telah ditentukan. Oleh karena itu, parameter seperti *baud rate*, jumlah bit data, paritas, dan jumlah bit berhenti perlu dikonfigurasi secara sesuai pada kedua perangkat [41].

UART menggunakan jalur TX (*transmit*) untuk mengirimkan data dan RX (*receive*) untuk menerima data. Pada komunikasi dua arah, TX dari satu perangkat dihubungkan dengan RX perangkat lainnya. UART pada ESP32 mendukung komunikasi *full-duplex* sehingga proses pengiriman dan penerimaan data dapat dilakukan melalui jalur yang terpisah [41].

Data UART dikirim dalam bentuk *frame*. Satu *frame* diawali dengan bit START, kemudian diikuti sejumlah bit data, bit paritas apabila digunakan, dan diakhiri dengan kondisi STOP. Bit START menandai awal pengiriman karakter, sedangkan bit STOP menunjukkan berakhirnya satu *frame*. Paritas dapat digunakan sebagai mekanisme sederhana untuk mendeteksi kesalahan bit selama proses penerimaan data [41]. Struktur dasar *frame* UART ditunjukkan pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Struktur frame data UART [41]

Pada papan pengembangan ESP32 yang dilengkapi jembatan USB-to-UART, jalur serial dapat dihubungkan dengan komputer melalui antarmuka USB. Dokumentasi papan ESP32-DevKitC menunjukkan bahwa jembatan USB-to-UART berfungsi sebagai penghubung komunikasi antara komputer dan modul ESP32 [42]. Dengan hubungan tersebut, komunikasi serial dapat digunakan tanpa membentuk jaringan nirkabel.

Pada sistem autofokus, komunikasi serial USB/UART disediakan sebagai jalur cadangan untuk mengirimkan perintah, menerima status perangkat, dan melakukan pemeriksaan program ketika koneksi berkabel diperlukan. Pengujian utama komunikasi aplikasi dengan ESP32 dalam penelitian ini dilakukan melalui Wi-Fi berbasis TCP, sedangkan kinerja komunikasi serial tidak diuji secara terpisah. Berbeda dengan TCP, UART pada tingkat perangkat keras tidak menyediakan mekanisme koneksi, pengurutan ulang paket, maupun retransmisi data secara otomatis sehingga pengaturan format pesan dan penanganan kesalahan dilakukan pada tingkat aplikasi.

2.10 Perangkat Lunak

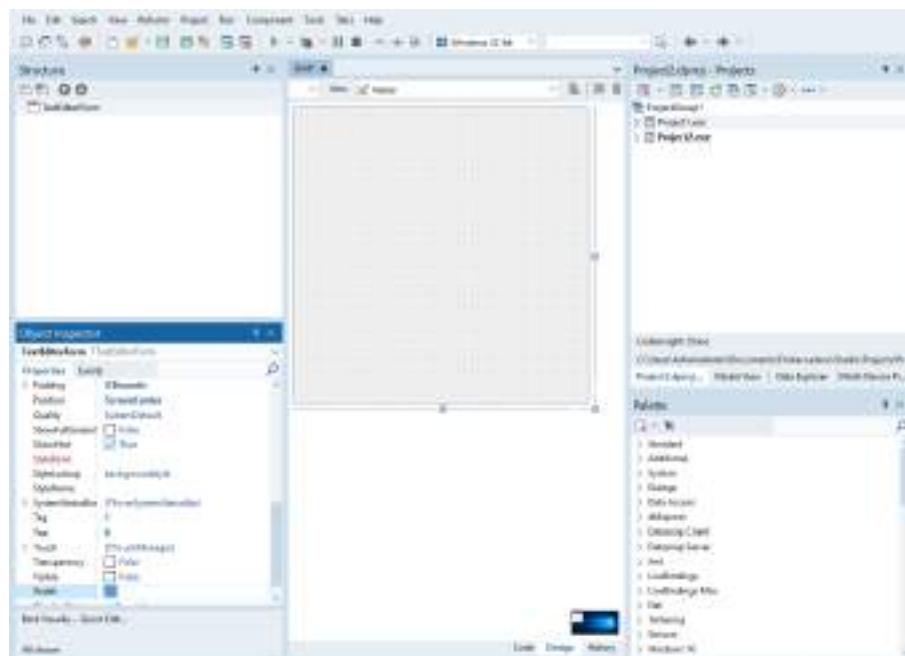
Perangkat lunak merupakan komponen yang menyediakan lingkungan pengembangan dan fungsi komputasi untuk menjalankan program pada komputer maupun mikrokontroler. Pada sistem yang dikembangkan, perangkat lunak digunakan untuk membangun antarmuka aplikasi, melakukan pengolahan citra digital, serta mengembangkan program kendali pada mikrokontroler. Perangkat lunak yang digunakan terdiri atas Embarcadero Delphi, OpenCV, dan Arduino IDE.

2.10.1 Embarcadero Delphi

Embarcadero Delphi merupakan lingkungan pengembangan perangkat lunak yang menggunakan bahasa pemrograman Object Pascal. Lingkungan pengembangannya terintegrasi dengan berbagai fasilitas, seperti *Code Editor*, *Form Designer*, *Tool Palette*, *Object Inspector*, pengelolaan proyek, kompiler, dan *debugger*. Fasilitas tersebut memungkinkan proses perancangan antarmuka dan penulisan program dilakukan dalam satu lingkungan pengembangan [43].

Pengembangan aplikasi desktop berbasis Windows pada Delphi didukung oleh *Visual Component Library* (VCL). VCL merupakan kumpulan kelas dan komponen visual maupun nonvisual yang dapat digunakan dalam pembuatan aplikasi Windows. Komponen visual meliputi elemen antarmuka seperti *form*, tombol, label, dan kotak masukan, sedangkan komponen nonvisual menyediakan fungsi yang tidak ditampilkan secara langsung pada antarmuka. Komponen tersebut dapat diatur melalui properti dan *event* sehingga aplikasi dapat memberikan respons terhadap interaksi pengguna maupun kejadian tertentu [44].

Karakteristik tersebut menjadikan Delphi sesuai digunakan untuk membangun aplikasi desktop yang membutuhkan antarmuka grafis dan pengelolaan proses secara terintegrasi. Pada sistem autofokus mikroskop digital, Delphi digunakan sebagai lingkungan pengembangan aplikasi komputer yang menghubungkan fungsi antarmuka pengguna dengan proses pengolahan data dan citra. Tampilan dari antarmuka Embarcadero Delphi ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Tampilan antarmuka Embarcadero Delphi

2.10.2 OpenCV

OpenCV atau *Open Source Computer Vision Library* merupakan pustaka perangkat lunak sumber terbuka yang menyediakan berbagai fungsi untuk pengolahan citra dan visi komputer. OpenCV disusun secara modular. Modul *core* menyediakan struktur data dan fungsi dasar, *imgproc* menyediakan fungsi pengolahan citra, sedangkan *videoio* mendukung proses masukan dan keluaran data video dari berkas maupun perangkat akuisisi [45].

Data citra pada OpenCV dapat direpresentasikan menggunakan struktur matriks sehingga nilai setiap piksel dapat diakses dan diproses secara komputasional. Modul pengolahan citra menyediakan operasi seperti konversi ruang warna, penyaringan citra, transformasi geometris, pembentukan histogram,

dan *thresholding*. OpenCV juga menyediakan penerapan *thresholding* otomatis menggunakan metode Otsu, yaitu penentuan nilai ambang berdasarkan distribusi intensitas pada citra [45], [46].

Ketersediaan fungsi akuisisi dan pengolahan citra memungkinkan OpenCV digunakan sebagai pustaka pendukung pada aplikasi berbasis visi komputer. Pada sistem autofokus mikroskop digital, OpenCV digunakan untuk mendukung akuisisi serta pengolahan citra yang diperlukan dalam evaluasi kondisi fokus.



Gambar 2.16 OpenCV [46]

2.10.3 Arduino IDE

Arduino *Integrated Development Environment* atau Arduino IDE merupakan perangkat lunak yang menyediakan lingkungan untuk menulis, memverifikasi, mengompilasi, dan mengunggah program menuju papan mikrokontroler. Arduino IDE menyediakan editor kode, pemilihan jenis papan dan port komunikasi, pengelolaan pustaka, proses verifikasi serta pengunggahan program, dan fasilitas *Serial Monitor* untuk mengamati pertukaran data serial [47].

Pemrograman ESP32 melalui lingkungan Arduino memerlukan platform Arduino-ESP32 yang menyediakan dukungan terhadap perangkat keras dan periferal ESP32. Platform tersebut dapat dipasang melalui *Boards Manager*. Setelah platform tersedia, jenis papan ESP32 dan port komunikasi dapat dipilih sehingga program dapat dikompilasi dan diunggah menuju mikrokontroler [48].

Arduino IDE sesuai digunakan pada pengembangan sistem berbasis mikrokontroler karena menyediakan proses penulisan, kompilasi, pengunggahan, dan pemeriksaan program dalam satu lingkungan. Pada sistem autofokus mikroskop digital, Arduino IDE digunakan sebagai lingkungan pengembangan

program yang dijalankan pada mikrokontroler ESP32. Tampilan antarmuka pada Arduino IDE ditunjukkan pada Gambar 2.17.



Gambar 2.17 Tampilan antarmuka Arduino IDE [48]