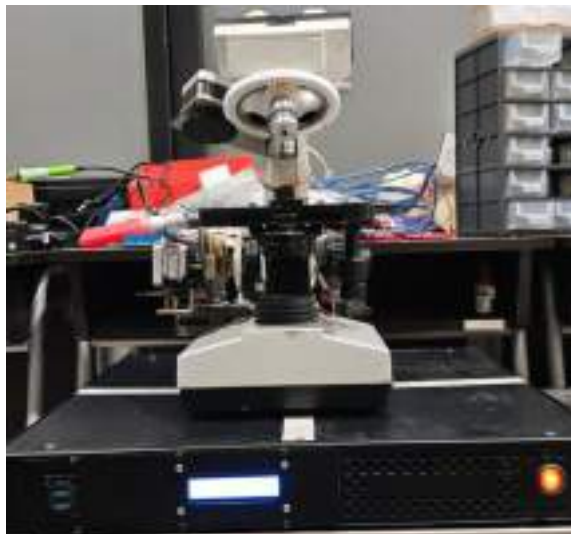


BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Implementasi Sistem

Berdasarkan hasil perancangan yang telah dijelaskan pada Bab III, sistem kontrol autofokus mikroskop digital telah direalisasikan dalam bentuk perangkat yang terintegrasi. Sistem terdiri atas mikroskop digital, kamera OptiLab, mekanisme penggerak makrometer dan mikrometer pada sumbu Z, mekanisme revolver objektif, perangkat kendali berbasis ESP32, serta aplikasi komputer sebagai pusat pengolahan citra dan pengendalian proses autofokus. Implementasi keseluruhan sistem ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Implementasi keseluruhan sistem kontrol autofocus mikroskop digital

Berdasarkan Gambar 4.1, perubahan posisi fokus dilakukan menggunakan mekanisme makrometer dan mikrometer. Makrometer digerakkan oleh motor NEMA 23 untuk menghasilkan perubahan posisi pada rentang yang lebih luas, sedangkan mikrometer digerakkan oleh motor NEMA 17 untuk menyempurnakan posisi fokus dengan interval pergerakan yang lebih kecil. Motor NEMA 17 lainnya digunakan untuk menggerakkan revolver sehingga sistem dapat berpindah antara objektif 4 $\times$ dan 10 $\times$. Implementasi mekanisme penggerak fokus pada sumbu Z ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Implementasi mekanisme penggerak fokus pada sumbu Z

Berdasarkan Gambar 4.2, motor makrometer dan mikrometer dihubungkan dengan driver TB6600 yang dikendalikan oleh ESP32 A. Mikrokontroler tersebut juga membaca kondisi dua sakelar batas, menjalankan proses penentuan posisi awal, menyimpan posisi logis makrometer dan mikrometer, serta menampilkan informasi sistem melalui LCD I²C 16×2. Sementara itu, ESP32 B mengendalikan motor NEMA 17 pada mekanisme revolver melalui TB6600 C. Pembagian fungsi tersebut memungkinkan mekanisme sumbu Z dan revolver dikendalikan secara terpisah, tetapi tetap bekerja secara terkoordinasi.

Kamera OptiLab mengirimkan citra preparat ke komputer melalui koneksi USB. Aplikasi yang dikembangkan menggunakan Embarcadero Delphi menampilkan citra kamera, melakukan konversi ke skala keabuan, menghitung nilai ambang Otsu dan Focus Score, mengatur urutan pemindaian, memverifikasi kandidat posisi fokus, serta menentukan objektif yang digunakan. Antarmuka aplikasi ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Antarmuka aplikasi kontrol autofocus mikroskop digital

Berdasarkan Gambar 4.3, antarmuka aplikasi menampilkan status koneksi ESP32, citra kamera secara waktu nyata, posisi makrometer dan mikrometer, nilai ambang Otsu, Focus Score, grafik pemindaian, serta tahap proses autofokus. Aplikasi juga menyediakan kendali manual untuk pemeriksaan sistem dan kendali otomatis untuk menjalankan seluruh tahapan pencarian fokus.

Komunikasi utama antara aplikasi dan ESP32 A dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol TCP. Aplikasi mengirimkan perintah gerakan dan pengaturan proses, sedangkan ESP32 A mengirimkan kembali informasi posisi logis, status gerakan, kondisi sakelar batas, dan penyelesaian perintah. Ketika diperlukan perpindahan objektif, ESP32 A meneruskan perintah kepada ESP32 B setelah makrometer dan mikrometer berada pada posisi aman.

Hasil implementasi menunjukkan bahwa perangkat akuisisi citra, penggerak sumbu Z, mekanisme revolver, perangkat kendali, dan aplikasi komputer telah diintegrasikan menjadi satu sistem. Fungsi setiap bagian dan kinerja integrasinya selanjutnya dievaluasi melalui pengujian sistem kontrol, pengolahan citra, algoritma autofokus bertingkat, serta pengujian pada variasi preparat.

4.2 Pengujian Sistem Kontrol Autofokus

Pengujian sistem kontrol autofokus dilakukan untuk mengevaluasi fungsi dasar perangkat keras dan komunikasi sebelum algoritma pencarian fokus diuji. Pengujian mencakup penentuan posisi awal dan respons sakelar batas, pengendalian pergerakan makrometer dan mikrometer, serta pertukaran perintah dan status antara aplikasi Delphi dan ESP32 A.

4.2.1 Pengujian Limit Dan Fungsi Homing

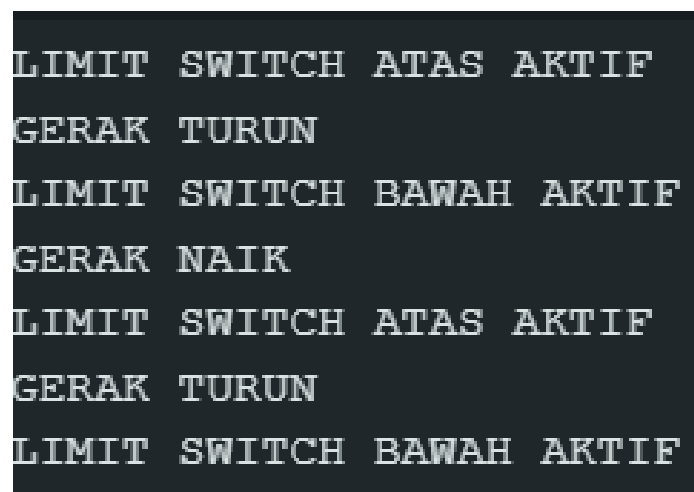
Pengujian homing dan batas pergerakan sumbu Z dilakukan untuk memastikan bahwa sistem dapat menentukan posisi referensi awal serta merespons pengaktifan sakelar batas atas dan bawah. Pengujian dilakukan dengan menggerakkan makrometer menuju setiap batas mekanis dan mengulangi pengaktifan masing-masing sakelar sebanyak dua kali. Parameter yang diamati meliputi status pembacaan sakelar dan respons penghentian motor. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Homing dan Limit Switch Sumbu Z

Percobaan	Jenis sakelar batas	Status Pembacaan	Respon Motor
1	Atas	Aktif	Berhenti
2	Bawah	Aktif	Berhenti
3	Atas	Aktif	Berhenti
4	Bawah	Aktif	Berhenti

Berdasarkan Tabel 4.1, sakelar batas atas dan bawah dapat terdeteksi pada seluruh percobaan. Ketika salah satu sakelar aktif, sistem menghentikan gerakan motor yang sedang berlangsung. Dalam proses homing, makrometer terlebih dahulu bergerak menuju batas atas, kemudian bergerak menuju batas bawah. Setelah sakelar batas bawah aktif, posisi tersebut ditetapkan oleh program sebagai posisi logis makrometer 0 langkah.

Perubahan status sakelar juga diamati melalui Serial Monitor. Pesan “LIMIT ATAS AKTIF” ditampilkan ketika sakelar batas atas terdeteksi, sedangkan pesan “LIMIT BAWAH AKTIF” ditampilkan ketika sakelar batas bawah terdeteksi. Hasil pembacaan tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.4.



```

LIMIT SWITCH ATAS AKTIF
GERAK TURUN
LIMIT SWITCH BAWAH AKTIF
GERAK NAIK
LIMIT SWITCH ATAS AKTIF
GERAK TURUN
LIMIT SWITCH BAWAH AKTIF

```

Gambar 4.4 Hasil pembacaan limit switch melalui Serial Monitor

Hasil pengujian menunjukkan bahwa fungsi pendeteksian batas dan penghentian motor telah berjalan sesuai dengan urutan homing yang dirancang. Namun, pengujian ini hanya membuktikan fungsi pembacaan sakelar dan respons sistem, bukan ketelitian posisi atau keterulangan jarak pengaktifan sakelar karena parameter tersebut tidak diukur menggunakan alat ukur eksternal.

4.2.2 Pengujian Pergerakan Makrometer dan Mikrometer

Pengujian pergerakan makrometer dan mikrometer dilakukan untuk mengevaluasi penerimaan perintah posisi, arah pergerakan, serta penerapan batas posisi pada perangkat lunak. Sistem tidak menggunakan encoder atau sensor posisi tambahan. Oleh karena itu, istilah posisi pada pengujian ini menunjukkan posisi logis berdasarkan jumlah langkah yang diperintahkan dan disimpan oleh sistem kontrol, bukan hasil pengukuran perpindahan mekanis menggunakan alat ukur eksternal.

Pengujian pertama dilakukan pada makrometer menggunakan profil objektif 4×. Sistem diberikan beberapa target posisi dari 0 sampai batas maksimum 3.800 langkah serta satu target di luar batas. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Pergerakan Makrometer Objektif 4×

Percobaan	Target Posisi Makrometer (step)	Status	Keterangan
1	0	Berhasil	Posisi awal sistem
2	1000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
3	2000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
4	3000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
5	3800	Berhasil	Batas maksimum 4×
6	3900	Ditolak	Melebihi batas posisi

Berdasarkan Tabel 4.2, target pada rentang 0–3.800 langkah diterima dan dijalankan oleh sistem. Ketika target 3.900 langkah diberikan, sistem menolak perintah karena melebihi batas posisi profil objektif 4×. Dokumentasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.5.



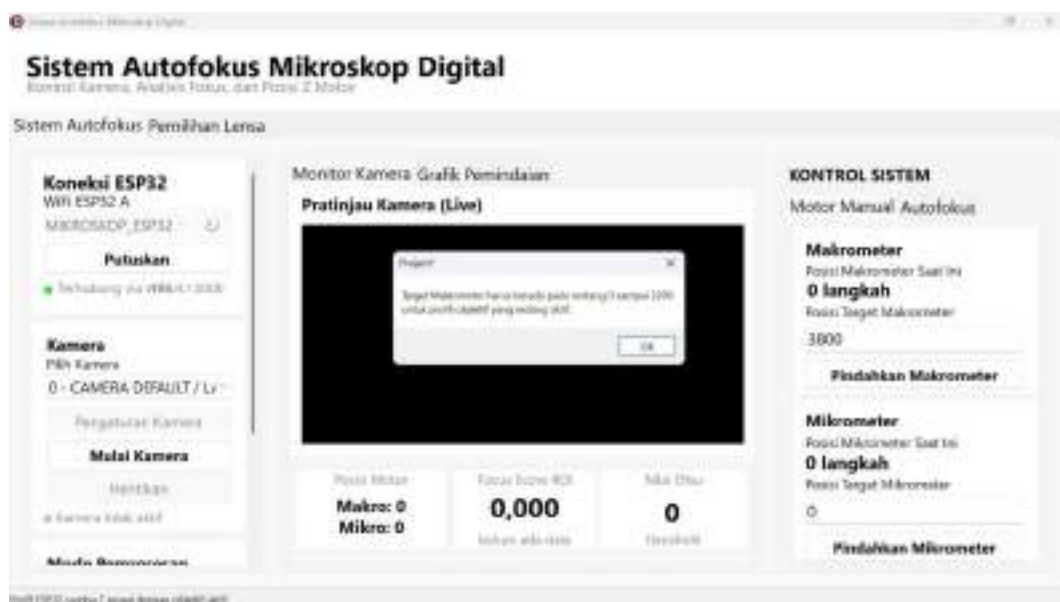
Gambar 4.5 Pengujian batas operasi makrometer objektif 4×

Pengujian berikutnya dilakukan pada makrometer menggunakan profil objektif 10× yang mempunyai batas maksimum 3.200 langkah. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Pergerakan Makrometer Objektif 10×

Percobaan	Target Posisi Makrometer (step)	Status	Keterangan
1	0	Berhasil	Posisi awal sistem
2	1000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
3	2000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
4	3000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
5	3200	Berhasil	Batas maksimum 10×
6	3800	Ditolak	Melebihi batas posisi

Berdasarkan Tabel 4.3, target pada rentang 0–3.200 langkah diterima oleh sistem, sedangkan target 3.800 langkah ditolak karena melebihi batas posisi profil objektif 10×. Dokumentasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Pengujian batas operasi makrometer objektif 10×

Pengujian mikrometer dilakukan pada rentang posisi logis –1.600 sampai 1.600 langkah. Target diberikan pada arah negatif dan positif untuk memeriksa fungsi pergerakan halus dan pembatasan posisi. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Pergerakan Mikrometer

Percobaan	Target Posisi Mikrometer (step)	Status	Keterangan
1	0	Berhasil	Posisi awal sistem
2	-1600	Berhasil	Batas maksimum arah negatif
3	-1000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
4	1000	Berhasil	Motor bergerak sesuai target
5	1600	Berhasil	Batas maksimum arah positif
6	-3200	Ditolak	Target melebihi rentang operasi

Berdasarkan Tabel 4.4, seluruh target dalam rentang -1.600 sampai 1.600 langkah diterima dan dijalankan oleh sistem. Target -3.200 langkah ditolak karena berada di luar rentang operasi mikrometer. Dokumentasi pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Pengujian batas operasi mikrometer

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat menerapkan batas posisi berdasarkan profil objektif dan menolak target di luar rentang yang telah ditetapkan. Pengujian ini membuktikan fungsi logika kendali dan batas perangkat lunak. Ketelitian perpindahan fisik, kehilangan langkah, dan keterulangan mekanis belum

dapat disimpulkan karena tidak dilakukan pengukuran menggunakan encoder atau alat ukur eksternal.

4.2.3 Pengujian Komunikasi Aplikasi dengan ESP32

Pengujian komunikasi dilakukan untuk mengevaluasi koneksi antara aplikasi Delphi dan ESP32 A serta respons pertukaran data saat jarak laptop terhadap sistem diubah. Parameter yang dicatat meliputi jarak, status koneksi Wi-Fi, target posisi makrometer, dan nilai posisi yang tercantum pada pengamatan.

Pada kondisi awal, aplikasi menampilkan status belum terhubung. Setelah proses koneksi dilakukan melalui jaringan Wi-Fi menggunakan protokol TCP, status aplikasi berubah menjadi terhubung. Perubahan status tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Hasil Pengujian Koneksi Aplikasi Delphi dengan ESP32: (a) Kondisi ESP32 belum terhubung, (b) Kondisi ESP32 berhasil terhubung

Pengujian jarak disusun dalam lima percobaan. Empat percobaan awal pada Tabel 4.5 berstatus terhubung pada jarak 204, 408, 612, dan 816 cm dengan target posisi makrometer berturut-turut 1.000, 2.000, 3.000, dan 2.000 langkah. Pada percobaan kelima dicatat kondisi tidak terhubung pada jarak 1.020 cm, setara dengan 17 ubin jika satu ubin berukuran 60 cm..

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Komunikasi Aplikasi Delphi dengan ESP32 Berdasarkan Variasi Jarak

Percobaan	Target Posisi Makrometer (step)	Posisi Aktual Makrometer (step)	Status
1	0	0	Terhubung
2	1000	1000	Terhubung
3	2000	2000	Terhubung

Percobaan	Target Posisi Makrometer (step)	Posisi Aktual Makrometer (step)	Status
4	3000	3000	Terhubung
5	2000	2000	Tidak Terhubung

Pada empat percobaan yang berstatus terhubung, nilai target dan posisi makrometer yang dicatat sama. Perintah menuju 3.000 langkah didokumentasikan melalui tampilan aplikasi dan LCD ESP32 pada Gambar 4.9. Percobaan kelima mencatat status tidak terhubung pada jarak sekitar 1.020 cm, sementara tabel masih memuat nilai posisi 1.000 langkah. Asal dan waktu pembacaan nilai tersebut perlu dipastikan sebelum dijelaskan sebagai hasil pengujian pada jarak tersebut.



Gambar 4.9 Hasil Pengujian Perintah Komunikasi ESP32 dan Delphi

Berdasarkan status pada Tabel 4.5, koneksi tercatat berhasil pada jarak 204 sampai 816 cm dan tidak terhubung pada jarak 1.020 cm. Dengan demikian, 816 cm merupakan jarak terjauh yang dicatat berhasil pada kelima kondisi uji tersebut, bukan batas maksimum teknis ESP32. Nilai posisi 1.000 langkah pada percobaan kelima tidak dapat digunakan sendiri sebagai bukti bahwa balasan baru diterima melalui Wi-Fi saat koneksi gagal. Pengujian ini belum mengevaluasi waktu tunda, kehilangan paket, atau ketelitian posisi fisik motor karena parameter tersebut tidak diukur.

4.3 Pengujian Pengolahan Citra dan Focus Score

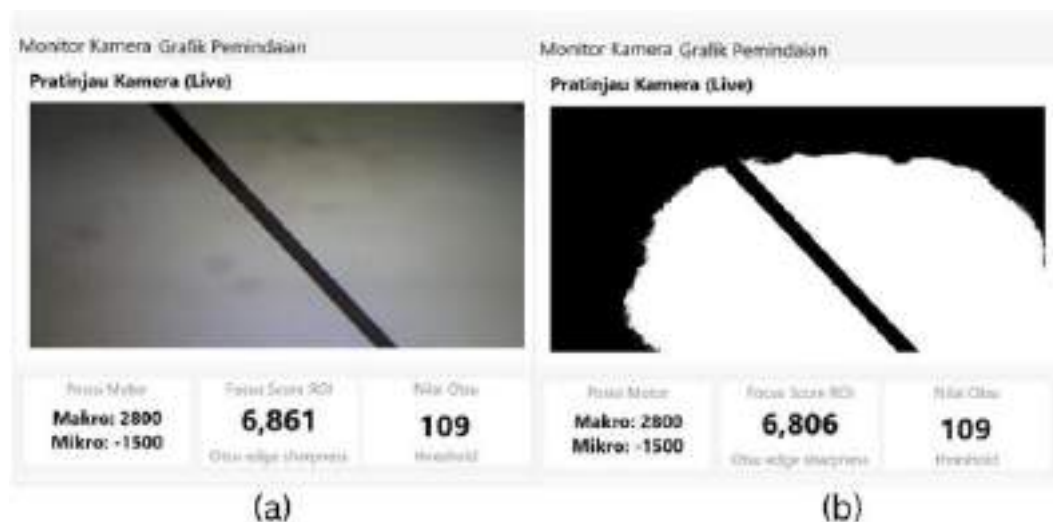
Pengujian pengolahan citra dilakukan untuk mengevaluasi fungsi segmentasi Otsu dan respons Focus Score terhadap perubahan posisi sumbu Z. Pengujian

segmentasi membandingkan hasil pemisahan objek dan latar belakang pada variasi jumlah rambut dan objektif, sedangkan pengujian Focus Score mengamati perubahan nilai evaluasi selama pemindaian makrometer dan mikrometer. Nilai ambang Otsu digunakan dalam proses segmentasi, sementara penentuan kandidat fokus didasarkan pada Focus Score.

4.3.1 Pengujian Segmentasi Citra Menggunakan Metode Otsu

Pengujian segmentasi Otsu dilakukan pada empat kondisi, yaitu rambut tunggal menggunakan objektif 4× dan 10× serta rambut banyak menggunakan objektif 4× dan 10×. Hasil segmentasi dievaluasi secara visual dengan membandingkan citra asli dan citra hasil segmentasi. Pengujian ini tidak menggunakan citra acuan berlabel sehingga hasilnya digunakan untuk menilai fungsi segmentasi secara kualitatif, bukan menghitung akurasi segmentasi.

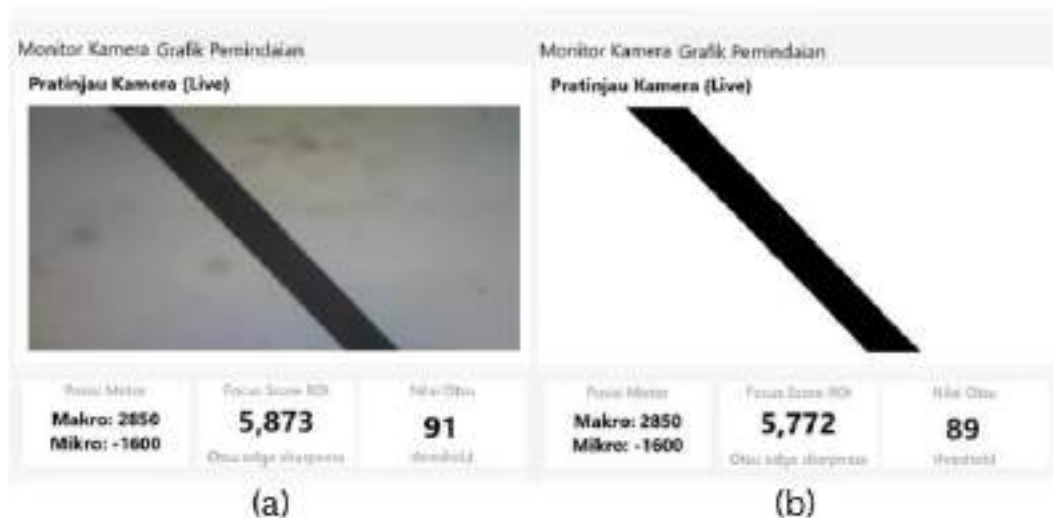
Pada preparat rambut tunggal menggunakan objektif 4×, sistem memperoleh nilai ambang Otsu sebesar 109. Secara visual, objek rambut dan latar belakang membentuk daerah yang berbeda pada citra hasil segmentasi, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Tunggal Objektif 4×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu

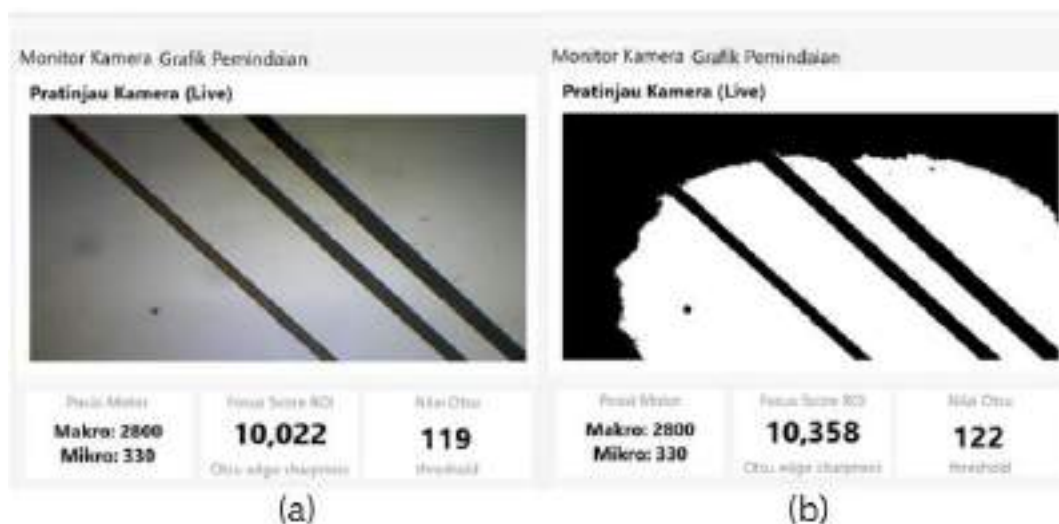
Pada objektif 10×, nilai ambang yang diperoleh sebesar 91. Perubahan nilai tersebut menunjukkan bahwa distribusi intensitas citra berubah akibat perbedaan

bidang pandang dan proporsi objek terhadap latar belakang. Hasil segmentasi ditunjukkan pada Gambar 4.11.



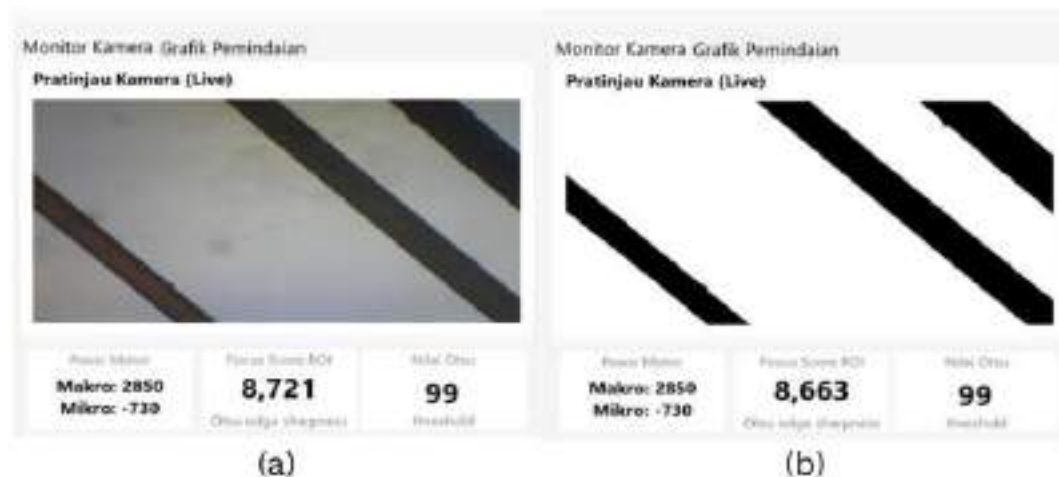
Gambar 4.11 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Tunggal Objektif 10×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu

Pada preparat rambut banyak menggunakan objektif 4×, nilai ambang Otsu yang diperoleh sebesar 119. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Banyak Objektif 4×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu

Pada preparat rambut banyak menggunakan objektif 10×, nilai ambang Otsu yang diperoleh sebesar 99. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 Hasil Segmentasi Otsu Rambut Banyak Objektif 10×: (a) Citra asli, (b) Hasil segmentasi Otsu

Nilai ambang Otsu yang diperoleh dari seluruh kondisi pengujian kemudian dirangkum untuk memudahkan analisis perbandingan antar variasi preparat dan objektif, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Nilai Threshold Otsu Pada Setiap Kondisi Pengujian

Jenis Preparat	Objektif	Threshold Otsu
Rambut tunggal	4×	109
Rambut tunggal	10×	91
Rambut banyak	4×	119
Rambut banyak	10×	99

Berdasarkan Tabel 4.6, nilai ambang Otsu berada pada rentang 91–119 dan berubah mengikuti kondisi citra. Metode Otsu dapat menghasilkan nilai ambang secara otomatis pada seluruh kondisi yang diuji. Berdasarkan pemeriksaan visual, objek rambut dan latar belakang dapat dibedakan pada citra hasil segmentasi. Akan tetapi, hasil tersebut tidak boleh dinyatakan sebagai akurasi segmentasi karena tidak dilakukan perbandingan terhadap citra acuan berlabel.

4.3.2 Pengujian Focus Score terhadap Perubahan Posisi Fokus

Pengujian ini dilakukan untuk mengamati perubahan Focus Score ketika posisi makrometer dan mikrometer diubah. Data pada subbab ini diperoleh dari satu rangkaian pengujian khusus menggunakan objektif 4×, sedangkan pengujian keseluruhan algoritma autofokus dibahas secara terpisah pada Subbab 4.4.

Pada pemindaian makrometer, sistem bergerak pada rentang 0–3.700 langkah dan menghitung Focus Score pada setiap posisi. Kurva hasil pemindaian ditunjukkan pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Hasil Grafik Focus Score Makrometer Objektif 4x

Nilai Focus Score meningkat ketika posisi makrometer mendekati daerah puncak dan menurun setelah daerah tersebut dilewati. Nilai maksimum diperoleh pada posisi 2.800 langkah dengan Focus Score sebesar 7,677. Posisi tersebut digunakan sebagai acuan awal pemindaian mikrometer.

Nilai ambang Otsu pada setiap posisi makrometer ditunjukkan pada Gambar 4.15. Ambang tersebut memisahkan piksel rambut yang lebih gelap dari latar belakang yang lebih terang. Perbedaan kelas antara piksel bertetangga menandai tepi rambut di dalam ROI, yang digunakan dalam perhitungan Focus Score. Karena nilai Otsu berubah mengikuti distribusi intensitas citra, posisi fokus terbaik ditentukan dari puncak Focus Score pada Gambar 4.14, bukan dari nilai Otsu tertinggi.



Gambar 4.15 Hasil Grafik Nilai Otsu Makrometer Objektif 4x

Pemindaian mikrometer dilakukan pada rentang -1.600 sampai 1.600 langkah. Kurva hasil pemindaian ditunjukkan pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Hasil Grafik Focus Score Mikrometer Objektif 4×

Nilai maksimum pemindaian mikrometer diperoleh pada posisi -180 langkah dengan Focus Score sebesar 7,709. Nilai ambang Otsu pada posisi tersebut sebesar 121,2. Perubahan nilai ambang Otsu selama pemindaian mikrometer ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Hasil Grafik Nilai Otsu Mikrometer Objektif 4×

Ringkasan hasil pemindaian makrometer dan mikrometer ditunjukkan pada Tabel 4.7, yang memuat nilai Focus Score, posisi logis sumbu Z, serta nilai ambang Otsu pada setiap tahap pemindaian. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan perubahan kualitas fokus secara bertahap dari proses pemindaian makrometer hingga mikrometer, sehingga dapat terlihat hubungan antara posisi sumbu Z dan peningkatan nilai Focus Score pada sistem autofokus yang dikembangkan.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Focus Score terhadap Perubahan Posisi Fokus

Parameter Pengujian	Pemindaian Makro	Pemindaian Mikro
Rentang pemindaian	0 – 3700 langkah	-1600–1600 langkah
Posisi fokus terbaik	2800 langkah	-180 langkah
Focus Score maksimum	7,677	7,709
Nilai Otsu pada titik fokus	119,4	121,2

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perubahan posisi sumbu Z menghasilkan kurva Focus Score dengan daerah nilai maksimum tertentu. Pemindaian makrometer menentukan daerah pencarian awal, sedangkan pemindaian mikrometer mempersempit pencarian di sekitar daerah tersebut. Nilai maksimum yang diperoleh merupakan nilai relatif tertinggi dalam rentang pemindaian yang diuji, bukan ukuran ketajaman absolut karena tidak dilakukan perbandingan terhadap posisi fokus acuan eksternal.

4.4 Pengujian Algoritma Autofokus Bertingkat

Pengujian algoritma autofocus bertingkat dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menjalankan setiap tahapan pencarian fokus otomatis sesuai dengan algoritma yang telah dirancang. Pengujian mencakup pemindaian makrometer pada objektif 4× dan 10×, penentuan objektif terpilih, pemindaian mikrometer kasar dan halus, serta verifikasi kandidat posisi fokus. Data pada subbab ini digunakan untuk menjelaskan fungsi dan hubungan setiap tahap algoritma, sedangkan keterulangan kinerja sistem berdasarkan beberapa percobaan dibahas secara terpisah pada Subbab 4.5.

4.4.1 Pengujian Pemindaian Makrometer pada Objektif 4× dan 10×

Pengujian dimulai dari posisi makrometer dan mikrometer 0 langkah dengan objektif 4×. Pemindaian makrometer dilakukan menggunakan interval 50 langkah. Pada setiap posisi, sistem memberikan waktu stabilisasi selama 500 ms dan mengambil sembilan bingkai citra. Satu Focus Score tertinggi dan satu terendah dikeluarkan, kemudian tujuh nilai lainnya dirata-ratakan. Tiga posisi dengan nilai tertinggi selanjutnya diverifikasi menggunakan 15 bingkai citra setelah waktu stabilisasi 800 ms.

Hasil pemindaian objektif 4× ditunjukkan pada Gambar 4.18. Proses ini dilakukan untuk memastikan nilai Focus Score yang diperoleh stabil dan representatif sebelum dilakukan penentuan kandidat posisi fokus.



Gambar 4.18 Kurva Focus Score pemindaian makrometer pada objektif

Nilai tertinggi pada objektif 4× diperoleh pada posisi makrometer 2.800 langkah dengan Focus Score sebesar 7,425. Posisi tersebut disimpan sebagai kandidat posisi makrometer terbaik untuk objektif 4×.

Setelah pemindaian objektif 4× selesai, sistem menggerakkan makrometer dan mikrometer menuju posisi aman sebelum memindahkan revolver ke objektif 10×. Pemindaian objektif 10× kemudian dilakukan menggunakan prosedur pengambilan dan pengolahan citra yang sama. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Hasil Grafik Nilai Otsu Makrometer Objektif 4× Sistem Autofokus Otomatis

Pada objektif 10×, nilai tertinggi diperoleh pada posisi makrometer 2.850 langkah dengan Focus Score sebesar 7,721. Dengan demikian, pemindaian

makrometer menghasilkan kandidat posisi 2.800 langkah untuk objektif 4× dan 2.850 langkah untuk objektif 10×. Meskipun nilai puncak objektif 10× lebih tinggi, keputusan objektif tidak ditentukan hanya berdasarkan perbandingan nilai puncak karena kedua objektif mempunyai karakteristik respons citra yang berbeda.

4.4.2 Pengujian Penentuan Objektif Terpilih

Pengujian penentuan objektif terpilih menggunakan data numerik hasil pemindaian makrometer objektif 4× dan 10× yang membentuk kurva pada Gambar 4.18 dan Gambar 4.19. Pengujian ini dilakukan untuk mengevaluasi kesesuaian keputusan sistem dengan kriteria pemilihan objektif yang telah ditetapkan. Penentuan objektif tidak hanya didasarkan pada nilai Focus Score puncak, tetapi juga mempertimbangkan median seluruh hasil pemindaian, kualitas relatif kurva, dan rata-rata Focus Score pada rentang ± 100 langkah di sekitar posisi puncak. Hasil pengolahan parameter penentuan objektif ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Parameter Penentuan Objektif

Parameter	Objektif 4×	Objektif 10×
Posisi puncak makrometer (langkah)	2800	2850
Focus Score puncak	7,425	7,721
Median Focus Score	0,296	0,399
Kualitas relatif kurva	24,084	18,351
Rata-rata lokal pada rentang ± 100 langkah	2,576	2,330

Berdasarkan Tabel 4.8, posisi puncak pemindaian objektif 4× diperoleh pada posisi makrometer 2.800 langkah dengan Focus Score sebesar 7,425. Sementara itu, posisi puncak objektif 10× diperoleh pada posisi 2.850 langkah dengan Focus Score sebesar 7,721. Median Focus Score objektif 4× sebesar 0,296, sedangkan median objektif 10× sebesar 0,399.

Hasil pengolahan data menghasilkan kualitas relatif kurva sebesar 24,084 pada objektif 4× dan 18,351 pada objektif 10×. Rata-rata Focus Score pada rentang ± 100 langkah di sekitar posisi puncak sebesar 2,576 untuk objektif 4× dan 2,330 untuk objektif 10×. Berdasarkan parameter tersebut, diperoleh rasio kualitas relatif objektif 10× terhadap objektif 4× sebesar 0,762 dan rasio rata-rata lokal sebesar

0,904. Hasil perbandingan kedua rasio dengan kriteria penentuan objektif ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Hasil Penentuan Objektif Terpilih

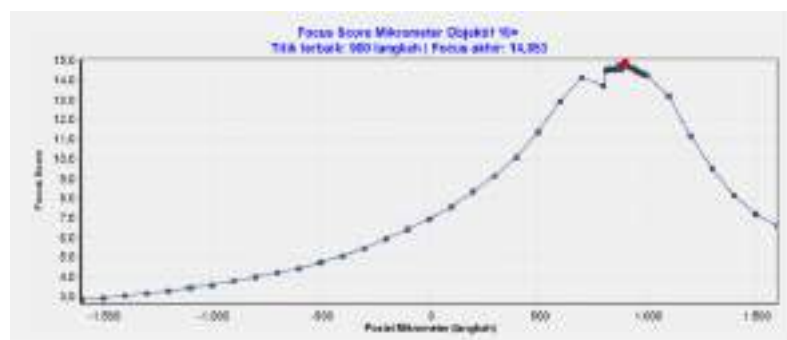
Parameter Keputusan	Hasil	Nilai Ambang	Status
Rasio kualitas relatif 10× terhadap 4×	0,762	$\geq 0,60$	Memenuhi
Rasio rata-rata lokal 10× terhadap 4×	0,904	$\geq 0,70$	Memenuhi
Objektif terpilih	10×	terpenuhi	Terpilih

Objektif 10× dipilih apabila rasio kualitas relatif sekurang-kurangnya 0,60 atau rasio rata-rata lokal sekurang-kurangnya 0,70. Rasio kualitas relatif sebesar 0,762 dan rasio rata-rata lokal sebesar 0,904 memenuhi kedua nilai ambang tersebut. Oleh karena itu, keputusan aplikasi memilih objektif 10× telah sesuai dengan aturan yang diterapkan dalam algoritma.

Hasil ini memvalidasi kesesuaian keputusan program terhadap kriteria algoritma. Hasil tersebut tidak menyatakan bahwa objektif 10× selalu lebih baik untuk semua preparat karena keputusan tetap bergantung pada karakteristik kurva yang diperoleh pada setiap pengujian.

4.4.3 Pengujian Pemindaian Mikrometer dan Verifikasi Posisi Fokus

Setelah objektif 10× dipilih, makrometer digerakkan menuju posisi terbaik 2.850 langkah. Pemindaian mikrometer kemudian dilakukan dalam dua tahap. Pemindaian kasar dijalankan pada rentang -1.600 sampai 1.600 langkah dengan interval 100 langkah, sedangkan pemindaian halus dilakukan pada rentang 800 – 1.000 langkah dengan interval 10 langkah setelah posisi terbaik pemindaian kasar diperoleh di sekitar 900 langkah. Pengujian pemindaian mikrometer dan verifikasi posisi fokus ditunjukkan pada Gambar 4.20.



Gambar 4.20 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif 10×

Berdasarkan Gambar 4.20, Focus Score meningkat ketika mikrometer mendekati daerah fokus dan membentuk daerah nilai tinggi pada rentang sekitar 870–920 langkah. Setelah pemindaian halus selesai, sistem menyimpan tiga kandidat dengan nilai tertinggi. Setiap kandidat diverifikasi menggunakan 15 bingkai citra setelah waktu stabilisasi 800 ms. Hasil pemindaian dan verifikasi ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil Pemindaian Mikrometer dan Verifikasi Posisi Fokus

Parameter	Hasil
Objektif terpilih	10×
Posisi makrometer acuan	2850 langkah
<i>Focus Score</i> makrometer	7,721
Rentang pemindaian mikrometer kasar	–1600 sampai 1600 langkah
Interval pemindaian kasar	100 langkah
Posisi terbaik hasil pemindaian kasar	900 langkah
Rentang pemindaian mikrometer halus	800 sampai 1000 langkah
Interval pemindaian halus	10 langkah
Jumlah kandidat yang diverifikasi	3 posisi
Jumlah <i>frame</i> verifikasi	15 <i>frame</i> per kandidat
Posisi mikrometer akhir	900 langkah
<i>Focus Score</i> akhir	14,853
Nilai Otsu akhir	91,000
Status proses	Selesai

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa posisi mikrometer 900 langkah menghasilkan Focus Score tertinggi sebesar 14,853 sehingga ditetapkan sebagai posisi fokus akhir. Sebelum menuju posisi tersebut, sistem bergerak ke posisi 890 langkah dan kemudian mendekati 900 langkah dari arah yang sama sebagai kompensasi kelonggaran mekanis.

Dibandingkan dengan Focus Score makrometer sebesar 7,721, nilai akhir meningkat sebesar 7,132 atau 92,371%. Nilai ambang Otsu pada posisi akhir sebesar 91,000 digunakan sebagai informasi hasil segmentasi dan tidak menjadi dasar langsung pemilihan posisi fokus.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem dapat menjalankan pemindaian kasar, pemindaian halus, verifikasi kandidat, kompensasi kelonggaran mekanis, dan pergerakan menuju posisi fokus akhir. Posisi makrometer 2.850 langkah dan mikrometer 900 langkah merupakan koordinat logis yang disimpan oleh sistem pada objektif 10 $\times$, bukan hasil pengukuran posisi fisik menggunakan encoder.

4.5 Pengujian Kinerja Sistem Autofokus pada Variasi Preparat

Pengujian kinerja dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan operasional sistem dalam menjalankan autofocus secara berulang pada preparat rambut tunggal dan rambut banyak. Setiap percobaan dimulai dari posisi makrometer 0 langkah, mikrometer 0 langkah, dan objektif 4 $\times$ tanpa penyesuaian fokus secara manual. Parameter pengujian meliputi keberhasilan penyelesaian proses, objektif terpilih, posisi logis akhir, Focus Score akhir, nilai ambang Otsu, dan perubahan visual citra. Persentase keberhasilan pada pengujian ini menunjukkan keberhasilan sistem menyelesaikan urutan autofocus, bukan akurasi terhadap posisi fokus acuan eksternal.

4.5.1 Pengujian Autofokus pada Preparat Rambut Tunggal

Pengujian autofocus pada preparat rambut tunggal dilakukan sebanyak lima kali untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam menyelesaikan rangkaian pencarian fokus secara berulang. Setiap percobaan dimulai dari kondisi awal yang sama, yaitu posisi makrometer 0 langkah, posisi mikrometer 0 langkah, dan objektif 4 $\times$. Preparat rambut tunggal digunakan pada seluruh percobaan dan tidak dilakukan penyesuaian fokus secara manual selama proses berlangsung.

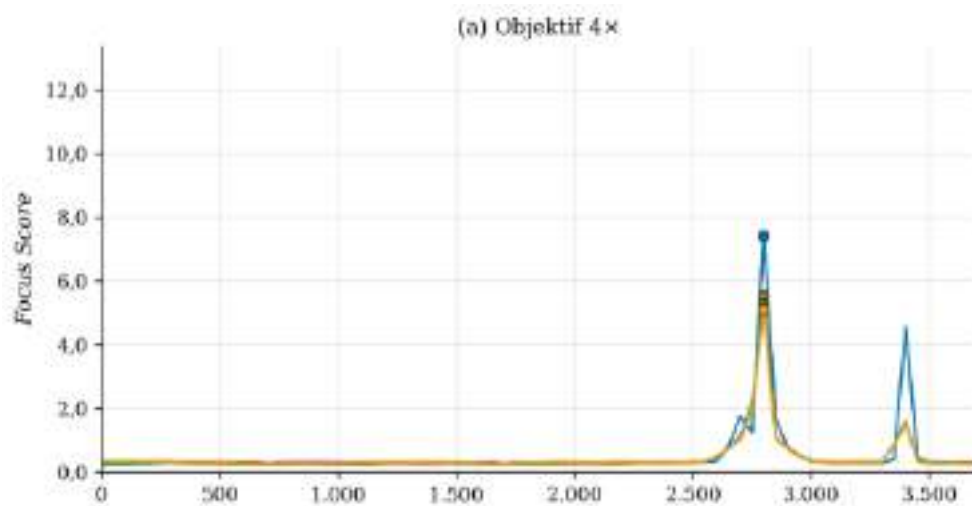
Pemindaian makrometer dilakukan terlebih dahulu pada objektif 4 $\times$ dalam rentang 0–3.700 langkah dan pada objektif 10 $\times$ dalam rentang 0–3.200 langkah menggunakan interval 50 langkah. Pada setiap posisi, sistem memberikan waktu stabilisasi selama 500 ms dan mengambil sembilan bingkai citra. Satu nilai Focus Score tertinggi dan satu terendah dikeluarkan, kemudian tujuh nilai lainnya dirata-ratakan. Tiga posisi dengan nilai tertinggi selanjutnya diverifikasi menggunakan 15 bingkai citra setelah waktu stabilisasi 800 ms. Objektif terpilih ditentukan dari rasio kualitas relatif kurva dan rasio rata-rata lokal di sekitar puncak. Setelah objektif ditetapkan, sistem melanjutkan pemindaian mikrometer kasar, pemindaian

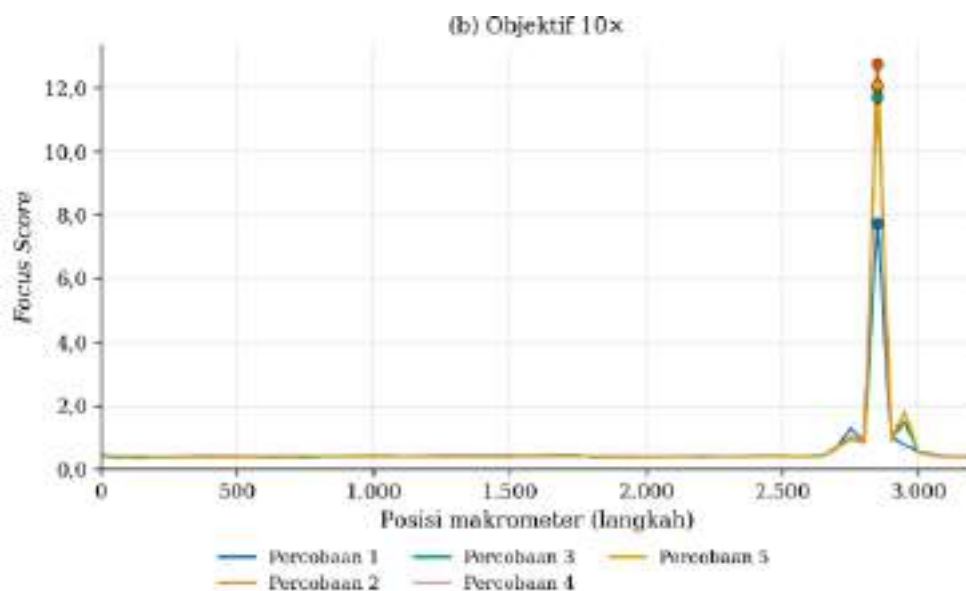
mikrometer halus, dan verifikasi kandidat posisi akhir. Hasil pemindaian makrometer ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Hasil pemindaian makrometer pada preparat rambut tunggal

Percobaan	Posisi makrometer 4× (langkah)	Focus Score makro 4×	Posisi makrometer 10× (langkah)	Focus Score makro 10×	Objektif terpilih
1	2800	7,425	2850	7,721	10×
2	2800	5,528	2850	12,742	10×
3	2800	5,278	2850	11,709	10×
4	2800	5,158	2850	12,004	10×
5	2800	5,096	2850	12,077	10×

Kurva Focus Score makrometer pada lima percobaan ditunjukkan pada Gambar 4.21. Grafik dibagi menjadi dua bagian, yaitu objektif 4× pada Gambar 4.21(a) dan objektif 10× pada Gambar 4.21(b). Sumbu horizontal menunjukkan posisi makrometer berdasarkan langkah motor, sedangkan sumbu vertical menunjukkan nilai Focus Score. Setiap warna kurva mewakili satu percobaan sehingga perbandingan antar percobaan dapat terlihat jelas. Seluruh kurva dibentuk dari tabel 4.11 sesuai urutan pemindaian. Penanda lingkaran menunjukkan posisi terbaik hasil verifikasi. Grafik menunjukkan kenaikan nilai menuju fokus, puncak, dan penurunan setelah melewati titik fokus tanpa pengolahan tambahan data





Gambar 4.21 Kurva Focus Score pemindaian makrometer dalam lima percobaan preparat rambut tunggal: (a) objektif 4 $\times$; (b) objektif 10 $\times$

Berdasarkan Tabel 4.11 dan Gambar 4.21, posisi makrometer terbaik pada objektif 4 $\times$ selalu diperoleh pada 2.800 langkah, sedangkan posisi terbaik pada objektif 10 $\times$ selalu diperoleh pada 2.850 langkah. Simpangan baku posisi logis pada kedua objektif sebesar 0 langkah. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma menetapkan koordinat logis yang sama pada lima percobaan. Meskipun demikian, hasil tersebut tidak langsung membuktikan keterulangan posisi mekanis karena sistem tidak menggunakan encoder atau alat ukur posisi eksternal.

Kurva pada kedua objektif memperlihatkan kenaikan Focus Score ketika makrometer mendekati daerah fokus dan penurunan setelah daerah puncak terlewati. Pada objektif 4 $\times$, nilai puncak berada pada rentang 5,096–7,425. Pada objektif 10 $\times$, nilai puncak berada pada rentang 7,721–12,742. Percobaan 1 pada objektif 4 $\times$ juga memperlihatkan kenaikan sekunder di sekitar 3.400 langkah, tetapi nilainya tetap lebih rendah daripada puncak utama pada 2.800 langkah sehingga tidak dipilih sebagai posisi terbaik.

Pemilihan objektif tidak hanya menggunakan perbandingan nilai puncak absolut. Berdasarkan perhitungan dari data kurva, rasio kualitas relatif objektif 10 $\times$ terhadap 4 $\times$ berada pada rentang 0,762–1,878, sedangkan rasio rata-rata lokal berada pada rentang 0,904–1,691. Seluruh nilai melampaui ambang rasio kualitas

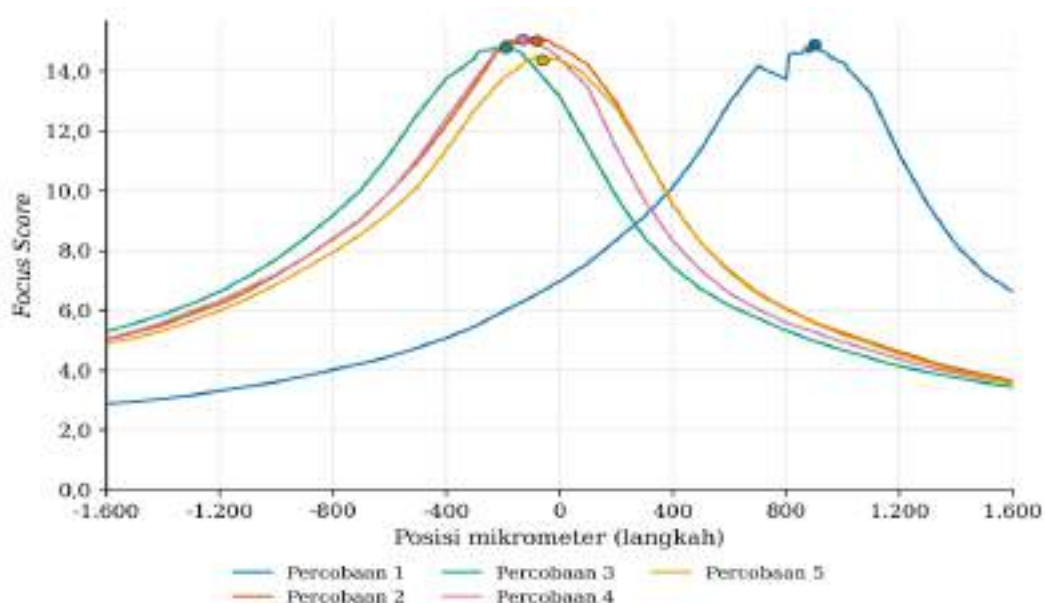
relatif 0,60 dan ambang rasio rata-rata lokal 0,70. Oleh karena itu, sistem memilih objektif 10× pada lima dari lima percobaan dan menggunakan posisi makrometer 2.850 langkah sebagai dasar pemindaian mikrometer.

Pemindaian mikrometer dilakukan pada objektif 10× dalam rentang −1.600 sampai 1.600 langkah. Pemindaian kasar menggunakan interval 100 langkah, kemudian pemindaian halus dilakukan dalam rentang ± 100 langkah di sekitar kandidat terbaik menggunakan interval 10 langkah. Tiga kandidat dengan nilai tertinggi diverifikasi kembali sebelum salah satu posisi ditetapkan sebagai hasil akhir. Hasil pemindaian mikrometer dan verifikasi akhir ditunjukkan pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Hasil akhir autofokus pada preparat rambut tunggal

Percobaan	Objektif terpilih	Posisi mikrometer akhir (langkah)	Focus Score akhir	Nilai ambang Otsu akhir	Status
1	10×	900	14,853	91,000	Selesai
2	10×	−80	15,003	91,154	Selesai
3	10×	−190	14,761	88,308	Selesai
4	10×	−130	15,053	92,000	Selesai
5	10×	−60	14,350	87,769	Selesai

Kurva Focus Score mikrometer pada lima percobaan ditunjukkan pada Gambar 4.22. Sumbu horizontal menunjukkan posisi mikrometer berdasarkan jumlah langkah motor, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan nilai Focus Score pada setiap posisi. Setiap warna kurva mewakili satu percobaan sehingga perbedaan letak dan bentuk daerah nilai tinggi dapat diamati secara langsung. Kurva tersebut dibentuk dari titik pemindaian kasar dan halus yang tercatat pada tabel 4.12. Pemindaian kasar menunjukkan kecenderungan perubahan nilai pada rentang yang lebih luas, sedangkan pemindaian halus menghasilkan titik yang lebih rapat di sekitar kandidat posisi terbaik. Kerapatan titik di sekitar puncak berasal dari penggunaan interval 10 langkah pada pemindaian halus, sehingga merupakan bagian dari prosedur pengukuran, bukan hasil interpolasi atau penghalusan data.



Gambar 4.22 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif 10× dalam lima percobaan preparat rambut tunggal

Lima percobaan digunakan untuk mengevaluasi keterulangan hasil sebagai gambaran awal kepresisian keluaran autofokus. Berdasarkan Tabel 4.12 dan Gambar 4.22, Percobaan 2 sampai 5 membentuk daerah nilai tinggi pada koordinat negatif dengan posisi akhir masing-masing -80, -190, -130, dan -60 langkah. Percobaan 1 membentuk daerah nilai tinggi pada koordinat positif dan menghasilkan posisi akhir 900 langkah. Secara keseluruhan, posisi mikrometer akhir berada pada rentang -190 sampai 900 langkah dengan rata-rata 88 langkah, median -80 langkah, dan simpangan baku sampel 456,695 langkah. Variasi tersebut menunjukkan perbedaan koordinat logis yang dipilih sistem, tetapi tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai kesalahan posisi fisik tanpa pengukuran menggunakan encoder atau acuan eksternal.

Nilai Focus Score akhir berada pada rentang 14,350–15,053 dengan rata-rata 14,804, simpangan baku sampel 0,279, dan koefisien variasi 1,89%. Jika dibandingkan dengan nilai puncak makrometer pada objektif 10×, pemindaian mikrometer meningkatkan Focus Score pada seluruh percobaan dengan peningkatan sebesar 2,261–7,132. Hasil ini menunjukkan bahwa tahap mikrometer mampu memperoleh kandidat fokus dengan nilai evaluasi lebih tinggi daripada hasil pemindaian makrometer pada kondisi pengujian yang digunakan.

Nilai ambang Otsu akhir berada pada rentang 87,769–92,000 dengan rata-rata 90,046. Nilai tersebut dicatat sebagai informasi kondisi segmentasi citra pada posisi akhir dan tidak digunakan secara langsung sebagai dasar penentuan fokus. Posisi fokus akhir tetap ditetapkan berdasarkan hasil verifikasi Focus Score.

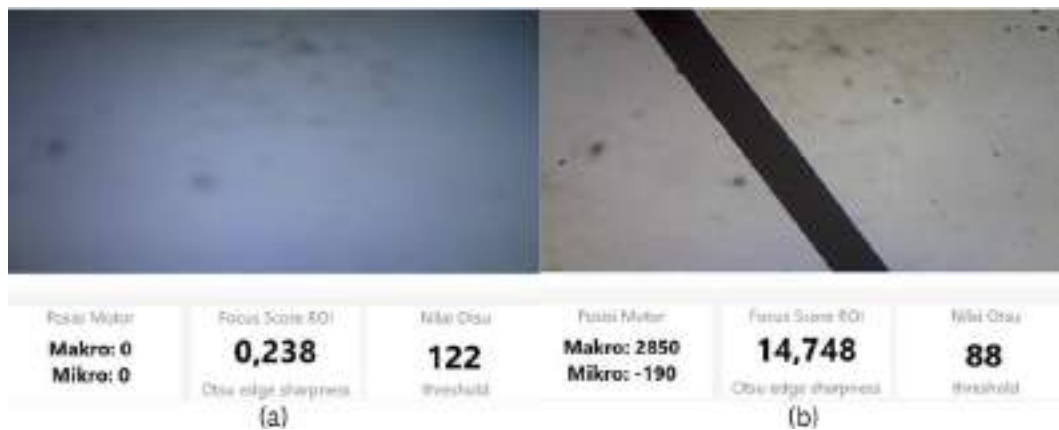
Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada setiap percobaan ditunjukkan pada Gambar 4.23 sampai 4.27. Pada citra awal, rambut belum terlihat jelas karena sistem masih berada pada posisi makrometer dan mikrometer 0 langkah. Setelah proses autofokus selesai, objek rambut tampak sebagai bidang gelap dengan batas tepi yang lebih jelas terhadap latar belakang. Nilai Focus Score yang terlihat pada panel antarmuka dalam gambar merupakan pembacaan sesaat ketika tangkapan layar dibuat, sedangkan nilai pada Tabel 4.12 merupakan hasil verifikasi yang tersimpan dalam Ringkasan.csv. Oleh karena itu, perbedaan nilai di antara keduanya tidak digunakan sebagai perubahan data hasil akhir.



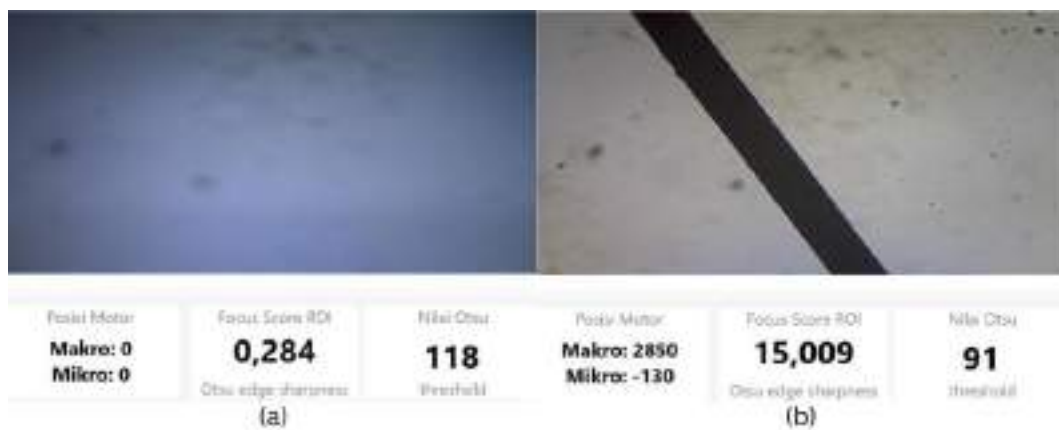
Gambar 4.23 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 1 preparat rambut tunggal



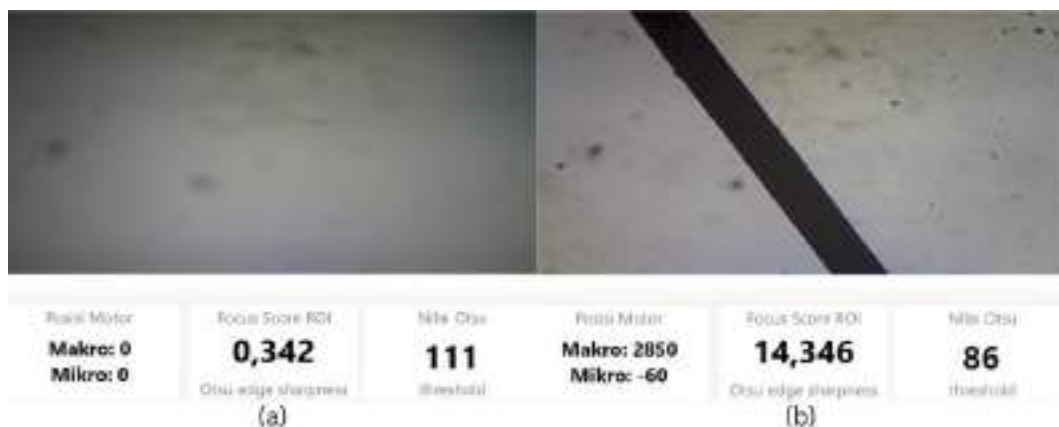
Gambar 4.24 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 2 preparat rambut Tunggal



Gambar 4.25 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 3 preparat rambut Tunggal



Gambar 4.26 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 4 preparat rambut Tunggal



Gambar 4.27 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 5 preparat rambut Tunggal

Secara keseluruhan, sistem menyelesaikan proses autofocus pada lima dari lima percobaan sehingga tingkat keberhasilan operasional pada preparat rambut tunggal sebesar 100%. Objektif 10× dipilih pada seluruh percobaan, posisi

makrometer terbaik ditetapkan secara konsisten pada 2.850 langkah, dan pemindaian mikrometer menghasilkan Focus Score akhir dengan koefisien variasi 1,89%. Meskipun kualitas fokus akhir relatif stabil berdasarkan nilai evaluasi citra, posisi mikrometer akhir masih menunjukkan variasi antarpengujian. Keberhasilan ini menunjukkan penyelesaian proses autofokus pada kondisi pengujian, bukan akurasi fokus terhadap acuan eksternal maupun keterulangan posisi mekanis secara fisik.

4.5.2 Pengujian Autofokus pada Preparat Rambut Banyak

Evaluasi autofokus pada preparat rambut banyak menggunakan lima data percobaan pertama, yaitu Percobaan 1–5. Jumlah data tersebut disetarakan dengan pengujian preparat rambut tunggal pada Subbab 4.5.1. Setiap percobaan dimulai dari kondisi awal yang sama, yaitu posisi makrometer 0 langkah, posisi mikrometer 0 langkah, dan objektif 4×. Preparat rambut banyak digunakan pada seluruh percobaan dan tidak dilakukan penyesuaian fokus secara manual selama proses berlangsung.

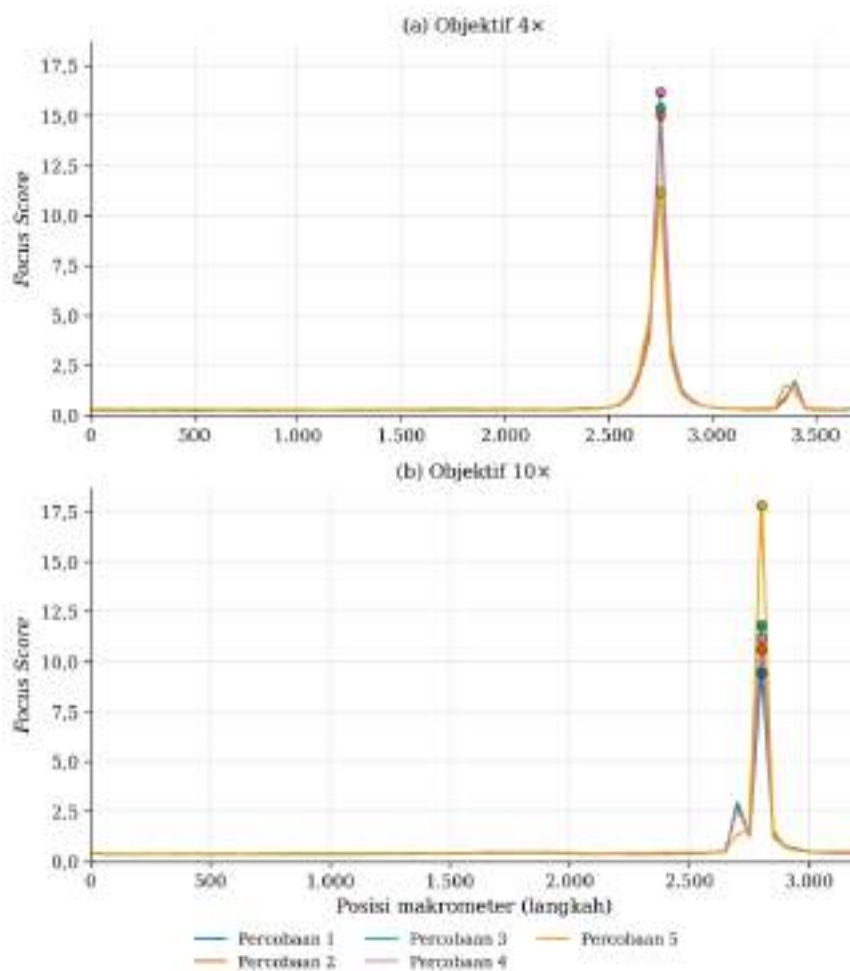
Pemindaian makrometer dilakukan pada objektif 4× dalam rentang 0–3.700 langkah dan pada objektif 10× dalam rentang 0–3.200 langkah menggunakan interval 50 langkah. Pada setiap posisi, sistem memberikan waktu stabilisasi selama 500 ms dan mengambil sembilan bingkai citra. Satu nilai Focus Score tertinggi dan satu terendah dikeluarkan, kemudian tujuh nilai lainnya dirata-ratakan. Tiga posisi dengan nilai tertinggi selanjutnya diverifikasi menggunakan 15 bingkai citra setelah waktu stabilisasi 800 ms. Objektif terpilih ditentukan berdasarkan rasio kualitas relatif kurva dan rasio rata-rata lokal di sekitar puncak. Setelah objektif ditetapkan, sistem melanjutkan pemindaian mikrometer kasar, pemindaian mikrometer halus, dan verifikasi kandidat posisi akhir. Hasil pemindaian makrometer ditunjukkan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13 Hasil pemindaian makrometer pada preparat rambut banyak

Percobaan	Posisi makrometer 4× (langkah)	Focus Score makro 4×	Posisi makrometer 10× (langkah)	Focus Score makro 10×	Objektif terpilih
1	2750	16,149	2800	9,435	4×

Percobaan	Posisi makrometer 4× (langkah)	Focus Score makro 4×	Posisi makrometer 10× (langkah)	Focus Score makro 10×	Objektif terpilih
2	2750	15,005	2800	10,609	4×
3	2750	15,349	2800	11,813	4×
4	2750	16,195	2800	11,135	4×
5	2750	11,176	2800	17,798	10×

Kurva Focus Score makrometer pada lima percobaan ditunjukkan pada Gambar 4.28. Setiap kurva dibentuk dari seluruh titik pengukuran pada Data_Makro.csv, sedangkan penanda lingkaran menunjukkan posisi terbaik yang ditetapkan setelah verifikasi.



Gambar 4.28 Kurva Focus Score pemindaian makrometer dalam lima percobaan preparat rambut banyak: (a) objektif 4×; (b) objektif 10×

Berdasarkan Tabel 4.13 dan Gambar 4.28, posisi makrometer terbaik pada objektif 4× selalu diperoleh pada 2.750 langkah, sedangkan posisi terbaik pada objektif 10× selalu diperoleh pada 2.800 langkah. Simpangan baku posisi logis pada kedua objektif sebesar 0 langkah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa algoritma menetapkan koordinat logis yang sama pada lima percobaan. Meskipun demikian, hasil tersebut tidak secara langsung membuktikan keterulangan posisi mekanis karena sistem tidak menggunakan encoder atau alat ukur posisi eksternal.

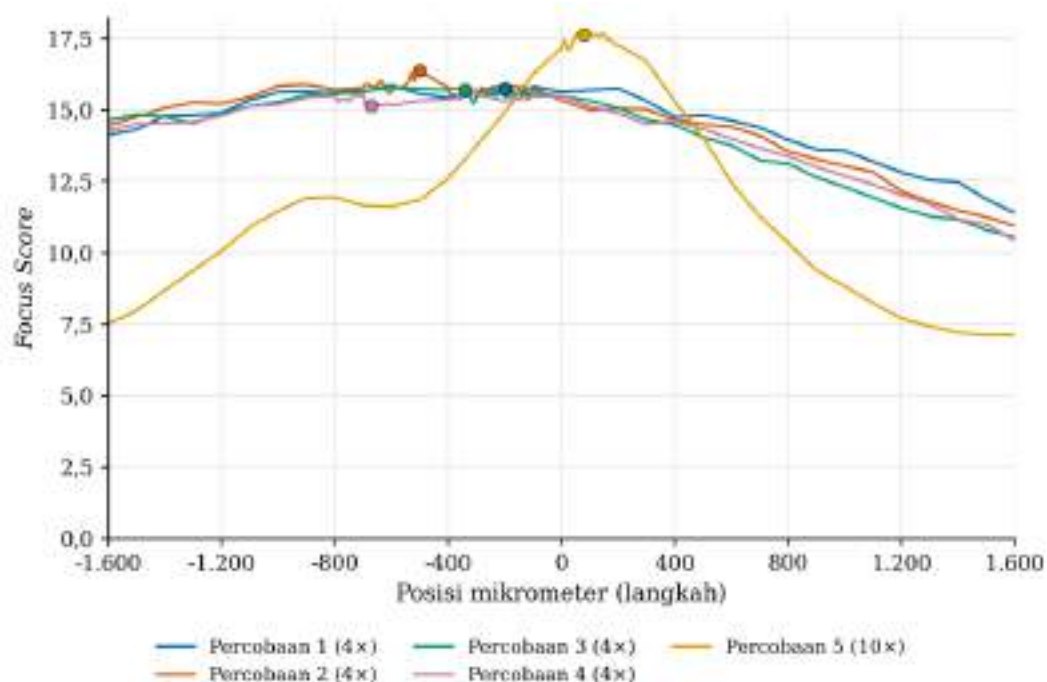
Nilai puncak Focus Score objektif 4× berada pada rentang 11,176–16,195, sedangkan objektif 10× berada pada rentang 9,435–17,798. Pada Percobaan 1–4, nilai puncak objektif 4× lebih tinggi daripada objektif 10×. Pola tersebut berubah pada Percobaan 5 ketika objektif 10× menghasilkan nilai puncak yang lebih tinggi. Namun, keputusan objektif tidak ditentukan hanya berdasarkan nilai puncak absolut. Objektif terpilih dan hasil akhir autofokus ditunjukkan pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Hasil penilaian objektif pada preparat rambut banyak

Percobaan	Objektif terpilih	Posisi mikrometer akhir (langkah)	Focus Score akhir	Nilai Otsu akhir	Status
1	4×	-200	15,739	98,000	Selesai
2	4×	-500	16,360	98,462	Selesai
3	4×	-340	15,685	92,462	Selesai
4	4×	-670	15,131	92,615	Selesai
5	10×	80	17,611	118,308	Selesai

Objektif 10× dipilih apabila rasio kualitas relatif sekurang-kurangnya 0,60 atau rasio rata-rata lokal sekurang-kurangnya 0,70. Pada Percobaan 1–4, kedua rasio berada di bawah nilai ambang sehingga sistem memilih objektif 4×. Pada Percobaan 5, rasio kualitas relatif sebesar 1,232 dan rasio rata-rata lokal sebesar 0,998 berada di atas nilai ambang sehingga sistem memilih objektif 10×. Dengan demikian, objektif 4× dipilih pada empat dari lima percobaan dan objektif 10× dipilih pada satu percobaan. Seluruh keputusan sesuai dengan kriteria algoritma yang diterapkan. Karena objektif 10× hanya terpilih pada satu percobaan, keterulangan pemilihan objektif tersebut belum dapat disimpulkan dari lima data yang dianalisis.

Pemindaian mikrometer dilakukan pada objektif terpilih dalam rentang -1.600 sampai 1.600 langkah. Pemindaian kasar menggunakan interval 100 langkah, kemudian pemindaian halus dilakukan dalam rentang ± 100 langkah di sekitar kandidat terbaik menggunakan interval 10 langkah. Tiga kandidat dengan nilai tertinggi diverifikasi kembali sebelum salah satu posisi ditetapkan sebagai hasil akhir. Hasil akhir pemindaian mikrometer dan verifikasi ditunjukkan pada Tabel 4.14.



Gambar 4.29 Kurva Focus Score pemindaian mikrometer pada objektif terpilih dalam lima percobaan preparat rambut banyak

Lima percobaan digunakan untuk mengamati keterulangan hasil dengan jumlah pengujian yang sama seperti rambut tunggal. Berdasarkan Tabel 4.14 dan Gambar 4.29, Percobaan 1–4 yang menggunakan objektif $4\times$ membentuk daerah nilai tinggi pada koordinat negatif. Posisi akhir yang ditetapkan secara berurutan adalah -200 , -500 , -340 , dan -670 langkah. Percobaan 5 yang menggunakan objektif $10\times$ membentuk daerah puncak pada koordinat positif dan menghasilkan posisi akhir 80 langkah. Kurva kelima percobaan ditampilkan bersama untuk memperlihatkan pola pemindaian, tetapi nilai antarkurva dari objektif yang berbeda tidak digunakan untuk membandingkan tingkat ketajaman secara langsung.

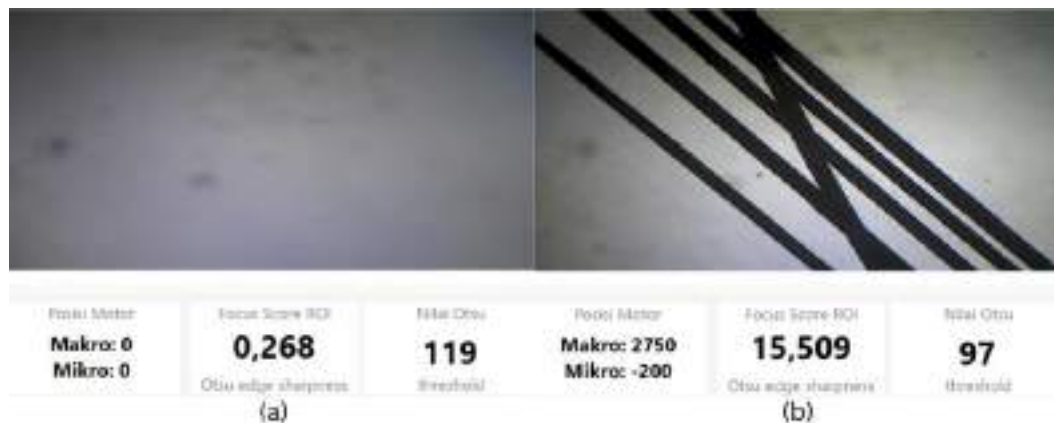
Pada empat percobaan yang menggunakan objektif 4×, posisi mikrometer akhir berada pada rentang -670 sampai -200 langkah dengan rata-rata -427,5 langkah, median -420 langkah, dan simpangan baku sampel 202,875 langkah. Pada Percobaan 5 yang menggunakan objektif 10×, posisi akhir diperoleh pada 80 langkah. Posisi tersebut merupakan koordinat logis berdasarkan jumlah langkah motor dan tidak dapat digunakan untuk menyimpulkan keterulangan posisi mekanis tanpa pengukuran menggunakan encoder atau alat ukur eksternal.

Variasi Focus Score akhir digunakan sebagai gambaran awal kepresisian keluaran autofokus pada preparat rambut banyak. Secara keseluruhan, Focus Score akhir berada pada rentang 15,131–17,611 dengan rata-rata 16,105, simpangan baku sampel 0,948, dan koefisien variasi 5,88%. Statistik tersebut merupakan ringkasan deskriptif dari lima percobaan yang menggunakan dua objektif dengan karakteristik citra berbeda. Oleh karena itu, penilaian variasi hasil lebih tepat dilakukan berdasarkan kelompok objektif terpilih.

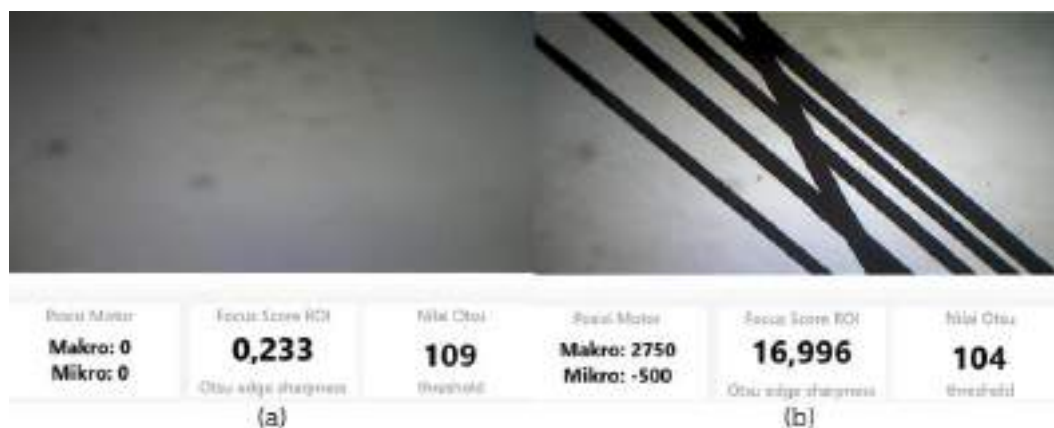
Pada kelompok objektif 4×, Focus Score akhir mempunyai rata-rata 15,729, simpangan baku sampel 0,503, dan koefisien variasi 3,20%. Pada objektif 10×, Focus Score akhir sebesar 17,611 berasal dari satu percobaan sehingga simpangan baku dan koefisien variasi kelompok tersebut tidak dihitung. Nilai ambang Otsu akhir pada kelompok objektif 4× berada pada rentang 92,462–98,462, sedangkan nilai pada Percobaan 5 yang menggunakan objektif 10× sebesar 118,308. Perbedaan nilai ambang menunjukkan perbedaan distribusi intensitas citra dan tidak digunakan sebagai pembanding ketajaman kedua objektif secara langsung.

Jika dibandingkan dengan nilai puncak makrometer pada objektif terpilih, Focus Score akhir meningkat pada Percobaan 2 dan 3, tetapi menurun pada Percobaan 1, 4, dan 5. Selisih nilai akhir terhadap puncak makrometer berada pada rentang -1,064 sampai 1,355 dengan rata-rata 0,006. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemindaian mikrometer tidak selalu menghasilkan nilai yang lebih tinggi daripada satu nilai puncak makrometer karena kandidat akhir diperoleh melalui pengambilan citra baru, pemindaian kasar dan halus, serta verifikasi beberapa kandidat posisi.

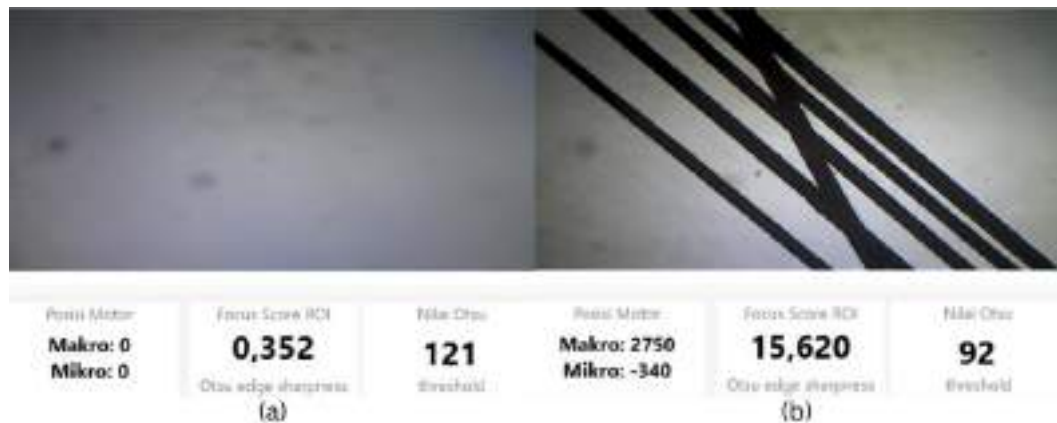
Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada setiap percobaan ditunjukkan pada Gambar 4.30–4.34. Pada citra awal, beberapa helai rambut belum terlihat jelas karena sistem masih berada pada posisi makrometer dan mikrometer 0 langkah. Setelah proses autofokus selesai, batas tepi rambut tampak lebih jelas terhadap latar belakang. Percobaan 1–4 mempunyai bidang pandang lebih luas karena menggunakan objektif 4×, sedangkan objek pada Percobaan 5 tampak lebih besar karena menggunakan objektif 10×. Perbandingan tersebut merupakan evaluasi visual secara kualitatif dan bukan pengukuran ketajaman terhadap citra acuan eksternal.



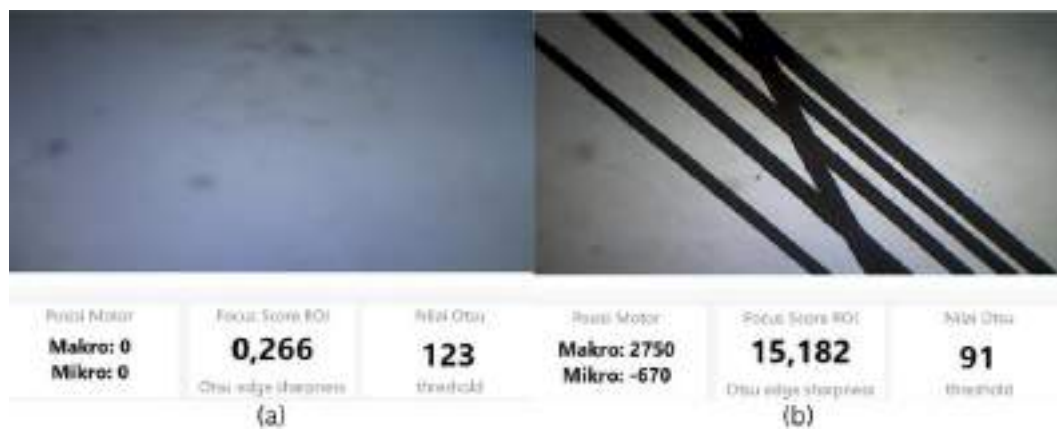
Gambar 4.30 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 1 preparat rambut Banyak



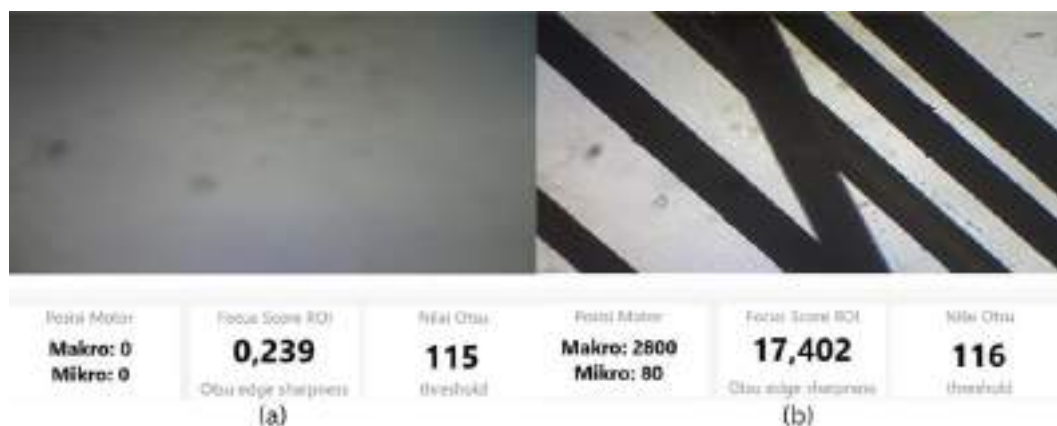
Gambar 4.31 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofokus pada percobaan 2 preparat rambut Banyak



Gambar 4.32 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 3 preparat rambut Banyak



Gambar 4.33 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 4 preparat rambut Banyak



Gambar 4. 34 Perbandingan citra sebelum dan sesudah autofocus pada percobaan 5 preparat rambut Banyak

Secara keseluruhan, sistem menyelesaikan proses autofocus pada lima dari lima percobaan sehingga tingkat keberhasilan operasional pada preparat rambut banyak sebesar 100%. Objektif 4× dipilih pada empat percobaan dan objektif 10×

dipilih pada satu percobaan. Posisi makrometer terbaik ditetapkan secara konsisten pada 2.750 langkah untuk objektif 4× dan 2.800 langkah untuk objektif 10×, sedangkan pemindaian mikrometer menghasilkan posisi akhir yang berbeda sesuai bentuk kurva pada setiap percobaan.

Keberhasilan ini menunjukkan penyelesaian proses autofokus pada kondisi pengujian, bukan akurasi fokus terhadap acuan eksternal maupun keterulangan posisi mekanis secara fisik.

.