

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja sistem kontrol otomatis perbesaran mikroskop digital yang telah dirancang. Pengujian difokuskan pada proses komunikasi sistem, mekanisme pergantian lensa objektif 4× dan 10×, pengolahan citra menggunakan metode Otsu, serta integrasi keseluruhan sistem. Hasil pengujian digunakan untuk mengetahui apakah perangkat keras dan perangkat lunak dapat bekerja sesuai dengan fungsi yang telah dirancang.

4.1 Pengujian Pergantian Lensa Objektif 4× dan 10×

Pengujian pergantian lensa objektif dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam melakukan perubahan perbesaran mikroskop secara otomatis antara lensa objektif 4× dan 10×. Pengujian ini juga bertujuan untuk mengetahui keberhasilan mekanisme revolver serta waktu yang dibutuhkan sistem dalam menyelesaikan satu proses pergantian lensa.

Perintah pergantian lensa diberikan melalui aplikasi Embarcadero Delphi pada laptop. Perintah tersebut dikirimkan menuju ESP32 utama melalui koneksi TCP pada jaringan WiFi. Selanjutnya, ESP32 utama meneruskan perintah melalui GPIO menuju ESP32 pengendali revolver. ESP32 pengendali revolver kemudian memberikan sinyal PUL, DIR, dan ENA kepada driver TB6600 untuk menggerakkan motor stepper NEMA 17 yang terhubung dengan mekanisme revolver mikroskop.

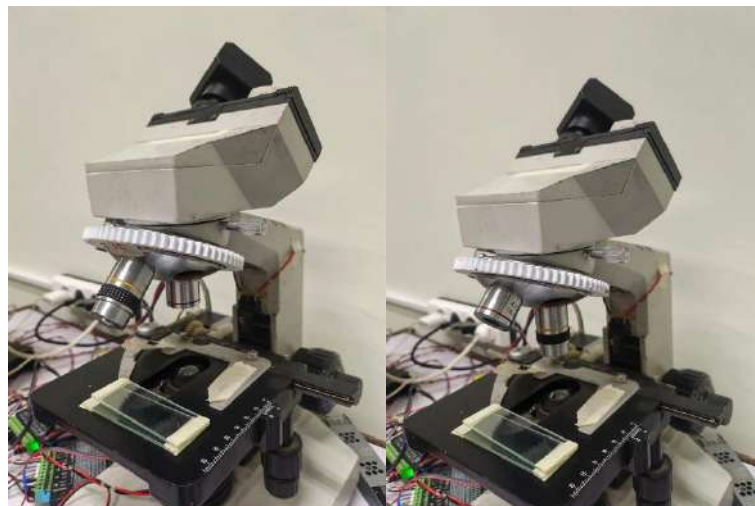
Berdasarkan program yang digunakan, perpindahan lensa objektif dilakukan dengan jumlah gerakan sebesar 3200 langkah. Perpindahan dari objektif 4× menuju objektif 10× dilakukan dengan arah gerakan positif, sedangkan perpindahan dari objektif 10× menuju objektif 4× dilakukan dengan arah gerakan negatif. Perbedaan arah tersebut disesuaikan dengan konstruksi mekanik revolver agar kedua lensa dapat berpindah menuju posisi optik yang telah ditentukan.

Pengujian dilakukan sebanyak tiga kali dengan mengamati keberhasilan perpindahan lensa dan waktu yang dibutuhkan sistem mulai dari pemberian perintah hingga revolver mencapai posisi lensa yang dituju. Hasil pengujian pergantian lensa objektif ditunjukkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Hasil pengujian pergantian lensa objektif 4× dan 10×

No.	Posisi Awal	Posisi Tujuan	Arah Motor	Gerak Waktu Pergantian (s)	Posisi Akhir	Status
1	4×	10×	Positif	5,04	10×	Berhasil
2	10×	4×	Negatif	4,71	4×	Berhasil
3	4×	10×	Positif	4,70	10×	Berhasil

Selain pengukuran waktu pergantian lensa, dilakukan pengamatan terhadap posisi akhir revolver untuk memastikan bahwa lensa objektif telah berpindah sesuai dengan perintah yang diberikan. Posisi revolver pada objektif 4× dan 10× setelah proses pergantian ditunjukkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Posisi revolver pada pergantian lensa objektif: (a) objektif 4× dan (b) objektif 10×

Berdasarkan Gambar 4.1, revolver dapat berpindah dan menempatkan lensa objektif sesuai dengan perintah yang diberikan oleh sistem. Gambar 4.1(a) menunjukkan kondisi ketika lensa objektif 4× berada pada posisi pengamatan, sedangkan Gambar 4.1(b) menunjukkan kondisi ketika revolver telah berpindah sehingga lensa objektif 10× berada pada posisi pengamatan. Perpindahan kedua posisi tersebut dilakukan dengan arah putaran motor yang saling berlawanan sesuai dengan logika program pengendali revolver.

Berdasarkan Tabel 4.1, ketiga pengujian berhasil memindahkan revolver menuju posisi lensa objektif yang diperintahkan. Waktu pergantian tercepat diperoleh sebesar 4,70 detik, sedangkan waktu pergantian paling lambat sebesar 5,04 detik. Rata-rata waktu yang diperlukan sistem untuk melakukan pergantian lensa adalah sebesar 4,82 detik. Selisih antara waktu tercepat dan waktu paling lambat adalah sebesar 0,34 detik, sehingga variasi waktu pada ketiga pengujian relatif kecil.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pergantian lensa objektif 4× dan 10× secara otomatis dengan tingkat keberhasilan sebesar 100% pada tiga kali pengujian.

Perbedaan waktu yang diperoleh pada setiap pengujian dapat dipengaruhi oleh beberapa tahapan yang berlangsung selama proses pergantian lensa. Waktu yang terukur tidak hanya mencakup pergerakan mekanis motor stepper, tetapi juga mencakup proses pengiriman perintah dari aplikasi Embarcadero Delphi melalui jaringan WiFi, penerimaan perintah oleh ESP32 utama, penerusan perintah menuju ESP32 pengendali revolver, pergerakan motor stepper, serta pengiriman kembali informasi status posisi lensa. Oleh karena itu, variasi waktu sebesar 0,34 detik diduga berasal dari kombinasi waktu komunikasi dan respons sistem selama proses pergantian berlangsung.

Arah putaran motor pada perpindahan 4× menuju 10× dan 10× menuju 4× dibuat saling berlawanan sesuai dengan program pengendali revolver. Meskipun arah putaran berbeda, jumlah langkah dan parameter penggerak motor yang digunakan tetap sama sehingga kedua arah perpindahan dapat mencapai posisi lensa yang dituju. Perbedaan arah putaran tersebut merupakan bagian dari rancangan mekanisme revolver dan tidak menunjukkan adanya kesalahan pada sistem.

Berdasarkan keseluruhan hasil pengujian dapat disimpulkan bahwa sistem kontrol yang dikembangkan mampu melakukan pergantian lensa objektif 4× dan 10× secara otomatis. Dari tiga kali pengujian diperoleh tingkat keberhasilan sebesar 100% dengan waktu pergantian rata-rata sebesar 4,82 detik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa integrasi antara aplikasi Embarcadero Delphi, ESP32 utama, ESP32 pengendali revolver, driver TB6600, motor stepper NEMA 17, dan mekanisme

revolver telah dapat menjalankan fungsi pergantian perbesaran mikroskop sesuai dengan rancangan sistem.

4.2 Pengujian Sistem Otomatis

Pengujian sistem otomatis dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menjalankan proses pemindaian citra, pengolahan citra, penentuan lensa objektif, dan penyempurnaan posisi secara otomatis. Pengujian dilakukan menggunakan dua kondisi objek, yaitu rambut banyak dan rambut tunggal. Pemisahan kedua kondisi objek dilakukan agar hasil pengujian dapat disajikan dan dianalisis secara lebih terstruktur.

Pada setiap pengujian, sistem melakukan pemindaian menggunakan lensa objektif 4× dan 10×. Citra yang diperoleh melalui kamera Optilab diproses menggunakan aplikasi Embarcadero Delphi untuk memperoleh nilai *focus score* dan nilai ambang Otsu. Hasil pemindaian kedua objektif kemudian dievaluasi oleh program sebelum menentukan objektif yang digunakan.

Setelah objektif ditentukan, sistem melanjutkan proses penyempurnaan posisi menggunakan mekanisme mikro pada objektif hasil keputusan. Parameter yang diamati meliputi posisi makro terbaik, posisi mikro terbaik, nilai *focus score* pada tahap makro, nilai *focus score* akhir, nilai Otsu pada posisi makro terbaik, dan nilai Otsu pada posisi mikro terbaik. Hasil pengujian sistem otomatis dibedakan menjadi pengujian pada objek rambut banyak dan rambut tunggal.

4.2.1 Pengujian Sistem Otomatis pada Objek Rambut Banyak

Pengujian pertama dilakukan menggunakan objek rambut banyak. Berdasarkan data hasil pengujian, diperoleh lima percobaan dengan data pemindaian makro dan mikro yang lengkap. Pada lima data pengujian yang digunakan, sistem menghasilkan objektif 4× sebagai hasil akhir. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil pengujian sistem otomatis pada objek rambut banyak

No.	Objektif Hasil	Makro Terbaik	Mikro Terbaik	Focus Makro	Focus Akhir	Otsu Makro	Otsu Akhir
1	4×	2800	1600	6,100	8,374	116,615	109,923

No.	Objektif Hasil	Makro Terbaik	Mikro Terbaik	Focus Makro	Focus Akhir	Otsu Makro	Otsu Akhir
2	4×	2800	1520	6,253	9,720	113,769	118,308
3	4×	2750	-1590	4,896	9,149	102,769	105,308
4	4×	2800	1580	7,508	8,659	117,154	105,000
5	4×	2750	-1590	7,491	9,723	117,077	104,692
Rata-rata		2780	—	6,450	9,125	113,477	108,646

Berdasarkan Tabel 4.2, posisi makro terbaik pada lima pengujian berada pada rentang 2750–2800 langkah, dengan rata-rata sebesar 2780 langkah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pada kelompok pengujian ini sistem memperoleh daerah fokus makro terbaik pada posisi yang relatif berdekatan.

Nilai *focus score* pada tahap makro berada pada rentang 4,896–7,508, dengan rata-rata sebesar 6,450. Setelah proses penyempurnaan menggunakan mekanisme mikro, nilai *focus score* akhir meningkat menjadi rentang 8,374–9,723, dengan rata-rata sebesar 9,125.

Rata-rata *focus score* meningkat sebesar 2,675 atau sekitar 41,48% dibandingkan tahap makro. Seluruh lima pengujian juga menunjukkan nilai *focus score* akhir yang lebih tinggi daripada nilai makro. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme mikro mampu menyempurnakan posisi setelah daerah fokus awal ditemukan melalui pemindaian makro.

Nilai Otsu pada tahap makro berada pada rentang 102,769–117,154, dengan rata-rata sebesar 113,477. Sementara itu, nilai Otsu pada hasil akhir berada pada rentang 104,692–118,308, dengan rata-rata sebesar 108,646. Nilai Otsu tidak mengalami pola kenaikan atau penurunan yang sama pada seluruh pengujian. Oleh karena itu, nilai Otsu tidak digunakan sebagai satu-satunya indikator hasil sistem, tetapi dianalisis bersama nilai *focus score* sebagai bagian dari proses pengolahan citra.

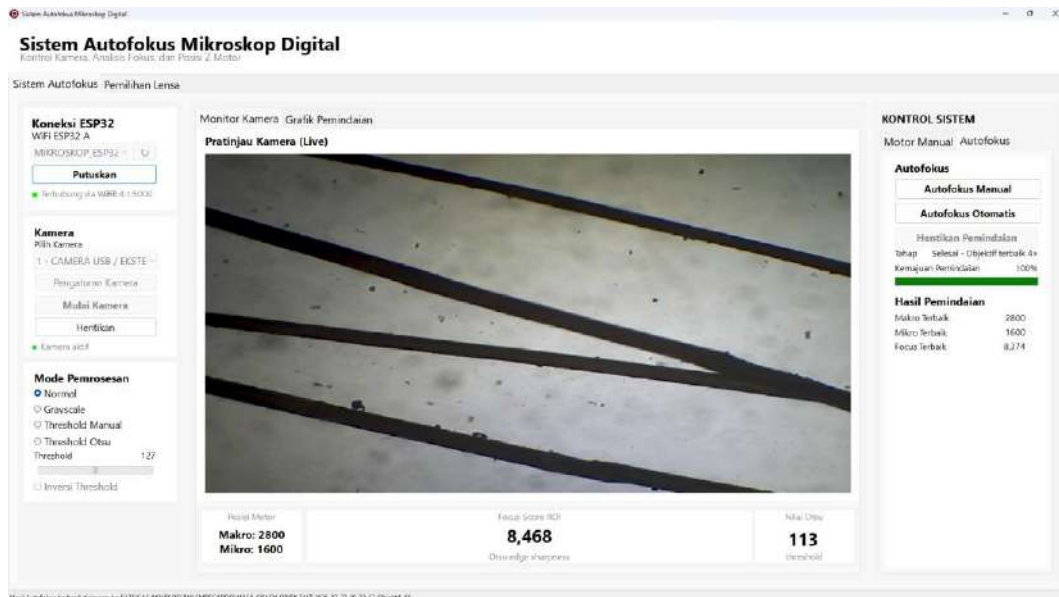
Untuk membuktikan bahwa sistem tidak langsung menggunakan objektif 4×, salah satu pengujian dapat digunakan sebagai contoh perbandingan hasil pemindaian kedua objektif.

Tabel 4.3 Perbandingan hasil pemindaian makro objektif 4× dan 10× pada objek rambut banyak

Parameter	Objektif 4×	Objektif 10×
Posisi makro terbaik	2800	2850
<i>Focus score</i> makro	6,100	4,707
Otsu makro	116,615	106,8
<i>Focus score</i> akhir	8,374	—
Otsu akhir	109,923	—
Hasil sistem	Terpilih	Tidak terpilih

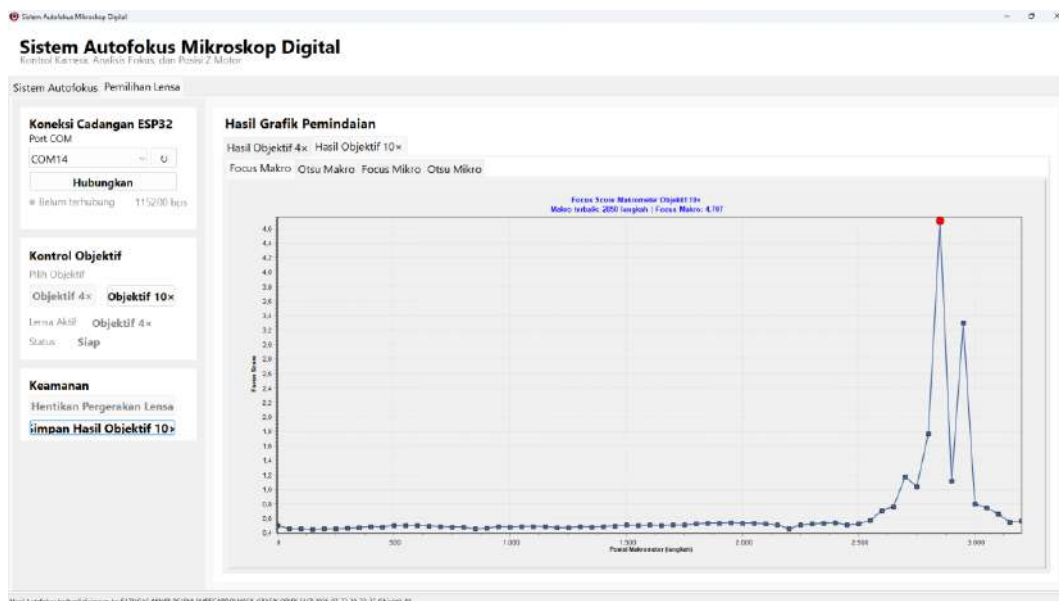
Berdasarkan Tabel 4.3, kedua objektif memperoleh hasil pemindaian makro sebelum sistem menghasilkan keputusan. Objektif 4× memperoleh *focus score* makro sebesar 6,100 dengan nilai Otsu 116,615, sedangkan objektif 10× memperoleh *focus score* makro sebesar 4,707 dengan nilai Otsu 106,8.

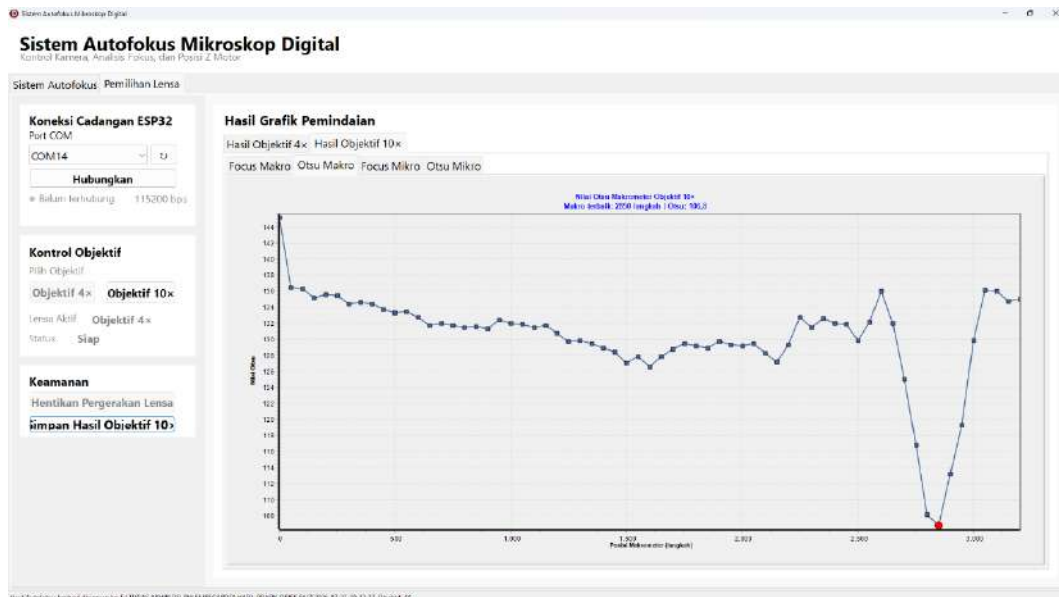
Setelah proses evaluasi dilakukan, sistem melanjutkan proses penyempurnaan pada objektif 4× hingga diperoleh *focus score* akhir sebesar 8,374 dan nilai Otsu akhir sebesar 109,923. Objektif 10× yang tidak terpilih tidak melanjutkan proses pemindaian mikro sehingga nilai *focus score* akhir dan Otsu akhir tidak tersedia.



Gambar 4.2 Hasil pengujian sistem otomatis pada objek rambut banyak

Berdasarkan Gambar 4.2, aplikasi berhasil menampilkan hasil pengujian otomatis pada objek rambut banyak. Sistem memperoleh posisi fokus, nilai focus score, dan nilai Otsu, kemudian menetapkan objektif 4× sebagai hasil akhir. Tampilan tersebut menunjukkan bahwa proses pengambilan citra, evaluasi hasil pemindaian, pemilihan lensa, dan penyempurnaan fokus telah dijalankan dalam satu rangkaian otomatis.





Gambar 4.3 Grafik pemindaian objektif 4× dan 10× pada objek rambut banyak

Berdasarkan Gambar 4.2 dan Gambar 4.3, sistem memperoleh data pengolahan citra dari kedua objektif sebelum menghasilkan keputusan akhir. Meskipun objektif 10× tidak digunakan sebagai hasil akhir pada pengujian tersebut, nilai *focus score* dan Otsu dari objektif 10× tetap diperoleh pada tahap pemindaian makro. Hal ini menunjukkan bahwa kedua objektif menjalani proses evaluasi sebelum sistem melanjutkan penyempurnaan pada objektif hasil keputusan.

4.2.2 Pengujian Sistem Otomatis pada Objek Rambut Tunggal

Pengujian selanjutnya dilakukan menggunakan objek rambut tunggal. Pada bagian ini digunakan lima data pengujian dengan objektif 10× sebagai hasil akhir sistem. Seluruh data tersebut memiliki hasil pemindaian makro dan mikro yang lengkap. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengujian sistem otomatis pada objek rambut tunggal

No.	Objektif Hasil	Makro Terbaik	Mikro Terbaik	Focus Makro	Focus Akhir	Otsu Makro	Otsu Akhir
1	10×	2850	1370	4,443	14,410	81,000	88,385
2	10×	2850	1120	5,639	13,349	95,154	80,615
3	10×	2850	−480	8,533	10,252	96,923	100,000

No.	Objektif Hasil	Makro Terbaik	Mikro Terbaik	Focus Makro	Focus Akhir	Otsu Makro	Otsu Akhir
4	10×	2850	−520	8,496	10,704	97,385	100,692
5	10×	2850	−440	8,018	9,678	91,615	91,462
Rata-rata		2850	—	7,026	11,679	92,415	92,231

Berdasarkan Tabel 4.4, seluruh lima pengujian memperoleh posisi makro terbaik sebesar 2850 langkah. Kesamaan posisi tersebut menunjukkan bahwa pada kelompok data yang digunakan, sistem memperoleh daerah fokus makro terbaik pada posisi yang sama.

Nilai *focus score* makro berada pada rentang 4,443–8,533, dengan rata-rata sebesar 7,026. Setelah proses penyempurnaan mikro dilakukan, nilai *focus score* akhir berada pada rentang 9,678–14,410, dengan rata-rata sebesar 11,679.

Rata-rata *focus score* meningkat sebesar 4,653 atau sekitar 66,22% dibandingkan tahap makro. Seluruh lima pengujian menunjukkan nilai akhir yang lebih tinggi daripada nilai makro, sehingga proses mikro terbukti memberikan penyempurnaan fokus setelah daerah fokus awal ditemukan.

Nilai Otsu makro berada pada rentang 81,000–97,385, dengan rata-rata sebesar 92,415. Pada tahap akhir diperoleh nilai Otsu antara 80,615–100,692, dengan rata-rata sebesar 92,231. Rata-rata nilai Otsu pada kedua tahap relatif berdekatan, sedangkan nilai *focus score* mengalami peningkatan yang lebih terlihat. Hal tersebut menunjukkan bahwa perubahan nilai Otsu tidak selalu searah dengan perubahan nilai *focus score*.

Untuk menunjukkan proses evaluasi kedua objektif pada rambut tunggal, dapat digunakan salah satu pengujian yang menghasilkan objektif 10×

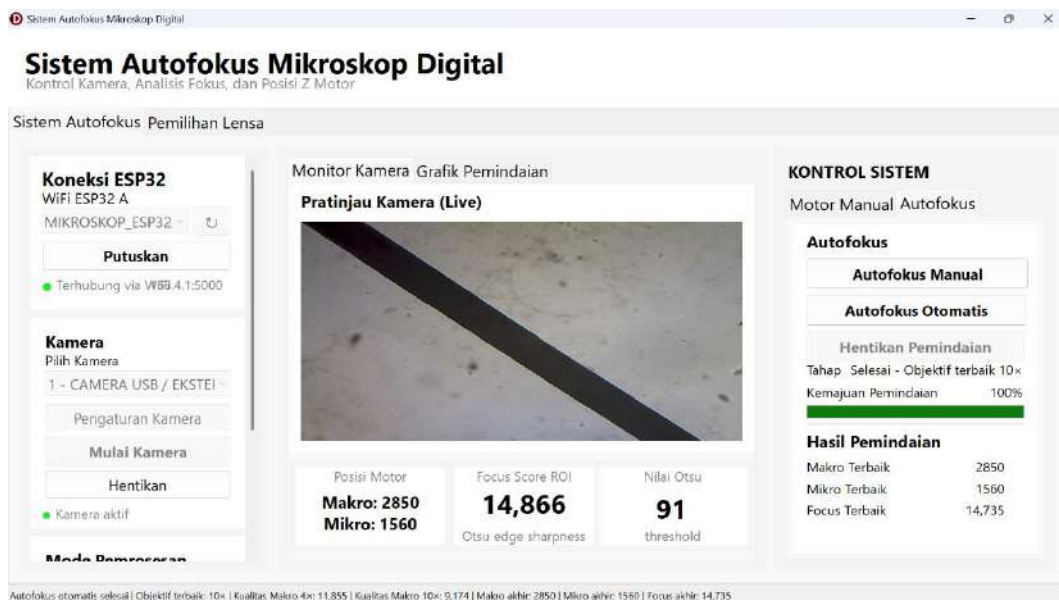
Tabel 4.5 Perbandingan hasil pemindaian makro objektif 4× dan 10× pada objek rambut tunggal

Parameter	Objektif 4×	Objektif 10×
Posisi makro terbaik	2800	2850

Parameter	Objektif 4×	Objektif 10×
<i>Focus score</i> makro	6,688	8,496
Otsu makro	114,4	97,385
<i>Focus score</i> akhir	—	10,704
Otsu akhir	—	100,692
Hasil sistem	Tidak terpilih	Terpilih

Berdasarkan Tabel 4.5, objektif 4× tetap menghasilkan data pemindaian makro berupa *focus score* sebesar 6,688 dan nilai Otsu sebesar 114,4. Pada objektif 10× diperoleh *focus score* makro sebesar 8,496 dan nilai Otsu sebesar 97,385.

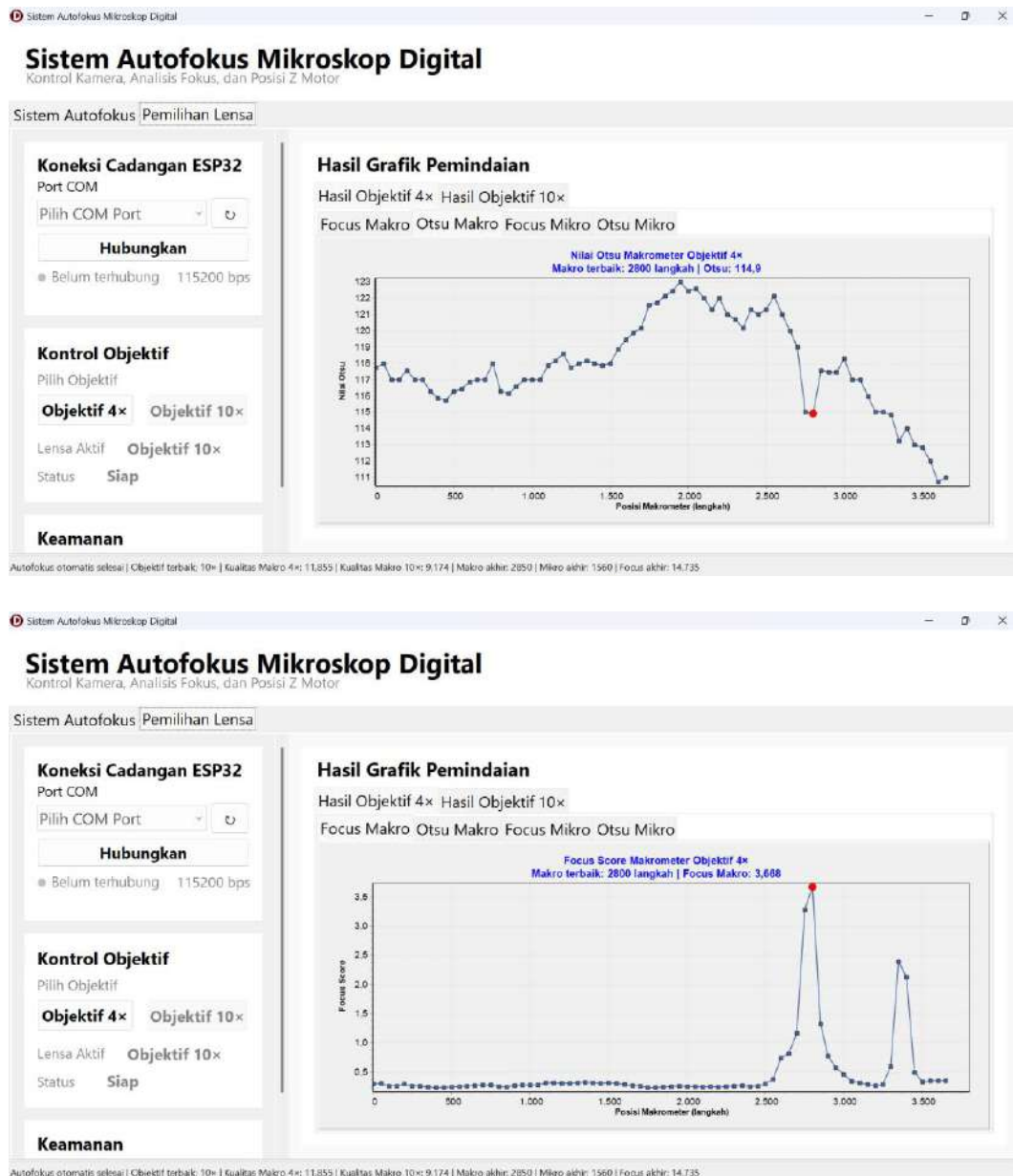
Setelah hasil evaluasi diperoleh, proses dilanjutkan pada objektif 10× hingga menghasilkan *focus score* akhir sebesar 10,704 dengan nilai Otsu akhir sebesar 100,692. Sementara itu, objektif 4× yang tidak menjadi hasil akhir tidak menjalani proses penyempurnaan mikro.



Gambar 4.4 Hasil pengujian sistem otomatis pada objek rambut tunggal

Berdasarkan Gambar 4.4, aplikasi menampilkan hasil pengujian otomatis pada objek rambut tunggal dengan objektif 10× sebagai lensa terpilih. Nilai hasil pemindaian kedua objektif telah dievaluasi sebelum sistem melanjutkan

penyempurnaan fokus pada objektif 10×. Hasil ini menunjukkan bahwa keputusan lensa berubah mengikuti karakteristik citra objek, bukan ditetapkan secara tetap pada salah satu objektif.



Gambar 4.5 Grafik pemindaian objektif 4× dan 10× pada objek rambut tunggal

Berdasarkan Gambar 4.4 dan Gambar 4.5, objektif 4× tetap melalui tahap pengolahan citra meskipun hasil akhir pengujian menggunakan objektif 10×. Nilai

focus score dan Otsu dari kedua objektif tersedia pada tahap makro, kemudian proses mikro dilanjutkan pada objektif hasil keputusan sistem.

Berdasarkan keseluruhan pengujian, sistem mampu melakukan pemindaian pada lensa objektif 4× dan 10×, memperoleh nilai *focus score* dan Otsu, menentukan objektif yang digunakan, serta melanjutkan proses penyempurnaan posisi pada objektif hasil keputusan.

Pada lima data objek rambut banyak yang dianalisis, rata-rata *focus score* meningkat dari 6,450 pada tahap makro menjadi 9,125 pada tahap akhir. Sementara itu, pada lima data objek rambut tunggal, rata-rata *focus score* meningkat dari 7,026 menjadi 11,679. Seluruh data pada kedua kelompok menunjukkan nilai *focus score* akhir yang lebih tinggi dibandingkan nilai pada tahap makro.

Data objektif yang tidak terpilih juga menunjukkan bahwa kedua lensa tetap melalui proses pemindaian dan pengolahan citra sebelum sistem menghasilkan keputusan. Setelah objektif ditentukan, proses penyempurnaan mikro hanya dilanjutkan pada objektif yang digunakan sebagai hasil akhir.

4.3 Analisis Hasil Pengolahan Citra pada Pemilihan Lensa Objektif

Analisis hasil pengolahan citra dilakukan untuk mengetahui karakteristik data citra yang diperoleh selama proses pemindaian menggunakan lensa objektif 4× dan 10× serta hubungannya dengan hasil pemilihan lensa oleh sistem. Pada proses otomatis, kedua lensa objektif terlebih dahulu digunakan untuk melakukan pemindaian makro sehingga diperoleh data hasil pengolahan citra dari masing-masing objektif sebelum sistem menentukan lensa yang digunakan.

Parameter utama yang dianalisis meliputi nilai *focus score* makro dan nilai ambang Otsu pada lensa objektif 4× dan 10×. Nilai *focus score* digunakan untuk menunjukkan respons ketajaman citra yang diperoleh pada setiap posisi pemindaian, sedangkan nilai Otsu merupakan nilai ambang hasil pengolahan intensitas citra yang digunakan dalam proses perhitungan citra pada aplikasi Embarcadero Delphi.

Data dari lensa objektif yang tidak terpilih tetap dimasukkan dalam analisis karena lensa tersebut telah melalui proses pemindaian dan pengolahan citra

sebelum keputusan akhir dihasilkan. Dengan demikian, analisis tidak hanya dilakukan terhadap lensa yang digunakan sebagai hasil akhir, tetapi juga terhadap hasil pemindaian lensa pembanding. Hal ini diperlukan untuk menunjukkan bahwa proses pemilihan lensa dilakukan setelah sistem memperoleh informasi citra dari kedua objektif.

Pengujian yang dianalisis terdiri atas dua kelompok objek, yaitu rambut banyak dan rambut tunggal. Pada data objek rambut banyak yang digunakan, sistem menghasilkan lensa objektif 4× sebagai hasil pemilihan, sedangkan pada data objek rambut tunggal sistem menghasilkan lensa objektif 10×. Hasil dari kedua kelompok tersebut dianalisis secara terpisah agar perbedaan nilai *focus score* dan Otsu pada objektif 4× dan 10× dapat diamati dengan lebih jelas.

Analisis pada bagian ini tidak langsung menyimpulkan bahwa nilai *focus score* atau nilai Otsu tertinggi merupakan satu-satunya dasar pemilihan lensa. Data hasil pemindaian terlebih dahulu dianalisis untuk mengetahui pola yang diperoleh pada masing-masing objektif. Selanjutnya, hasil tersebut digunakan untuk menjelaskan mekanisme evaluasi yang diterapkan pada program dalam menghasilkan keputusan lensa objektif 4× atau 10×.

4.3.1 Analisis Data Objek Rambut Banyak

Analisis pertama dilakukan terhadap hasil pengolahan citra pada objek rambut banyak. Pada setiap pengujian, sistem melakukan pemindaian makro menggunakan lensa objektif 4× dan 10×. Pemindaian tersebut menghasilkan nilai *focus score* dan nilai Otsu pada masing-masing objektif sebelum sistem menentukan lensa yang digunakan.

Meskipun hasil akhir pada kelompok pengujian ini menggunakan objektif 4×, data hasil pemindaian objektif 10× tetap dianalisis sebagai pembanding. Hal ini dilakukan karena kedua objektif telah melalui proses pemindaian dan pengolahan citra sebelum keputusan lensa dihasilkan. Hasil pengolahan citra pada lima kali pengujian objek rambut banyak ditunjukkan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil pengolahan citra pada objek rambut banyak

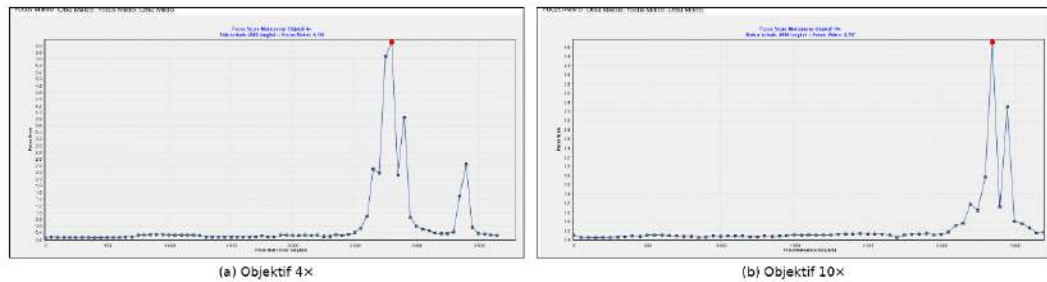
No.	<i>Focus</i> Makro 4×	<i>Score Otsu</i> Makro 4×	<i>Focus</i> Makro 10×	<i>Score Otsu</i> Makro 10×	Lensa Terpilih
1	6,100	116,615	4,707	106,8	4×
2	6,253	113,769	3,463	95,2	4×
3	4,896	102,769	2,846	112,8	4×
4	7,508	117,154	5,641	97,5	4×
5	7,491	117,077	2,469	93,8	4×
Rata- rata	6,450	113,477	3,825	101,220	4×

Berdasarkan Tabel 4.6, nilai *focus score* makro objektif 4× pada lima pengujian berada pada rentang 4,896 sampai 7,508, sedangkan objektif 10× berada pada rentang 2,469 sampai 5,641. Nilai rata-rata *focus score* makro objektif 4× sebesar 6,450, sedangkan objektif 10× sebesar 3,825.

Pada seluruh lima pengujian, nilai *focus score* makro objektif 4× lebih tinggi dibandingkan nilai yang diperoleh objektif 10×. Pada pengujian pertama, misalnya, objektif 4× menghasilkan *focus score* sebesar 6,100, sedangkan objektif 10× sebesar 4,707. Pola yang sama juga diperoleh pada pengujian kedua sampai kelima. Pada kelompok data ini, sistem menghasilkan objektif 4× sebagai lensa yang digunakan pada seluruh pengujian.

Meskipun demikian, nilai *focus score* yang lebih tinggi pada objektif 4× belum digunakan untuk menyimpulkan bahwa program hanya memilih lensa berdasarkan nilai *focus score* maksimum. Data tersebut digunakan untuk menunjukkan karakteristik hasil pemindaian masing-masing objektif. Dasar keputusan program terhadap objektif 4× atau 10× akan dianalisis lebih lanjut setelah hasil pemindaian kedua kelompok objek dibandingkan.

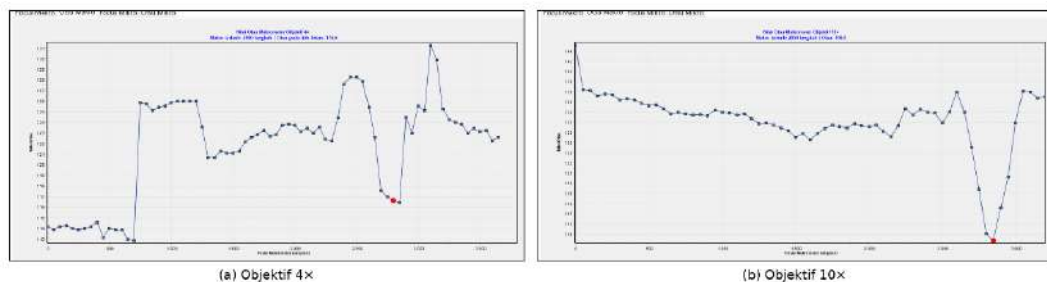
Untuk memperlihatkan hasil pemindaian kedua objektif secara visual, grafik *focus score* makro pada salah satu pengujian objek rambut banyak ditunjukkan pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Grafik Focus Score makro objektif 4× dan 10× pada objek rambut banyak

Berdasarkan Gambar 4.6, kedua lensa objektif menghasilkan perubahan nilai focus score selama proses pemindaian makro. Pada pengujian tersebut, nilai focus score makro terbaik objektif 4× sebesar 6,100 pada posisi makrometer 2800 langkah, sedangkan objektif 10× sebesar 4,707 pada posisi makrometer 2850 langkah. Data tersebut menunjukkan bahwa kedua objektif tetap melalui proses pemindaian dan menghasilkan data pengolahan citra sebelum sistem menentukan lensa yang digunakan.

Selain *focus score*, hasil pemindaian juga menghasilkan nilai Otsu pada masing-masing objektif. Grafik nilai Otsu objektif 4× dan 10× pada pengujian yang sama ditunjukkan pada Gambar 4.7.



Gambar 4.7 Grafik nilai Otsu objektif 4× dan 10× pada objek rambut banyak

Berdasarkan Gambar 4.7, nilai Otsu pada posisi makro terbaik objektif 4× sebesar 116,615, sedangkan objektif 10× sebesar 106,8. Grafik menunjukkan bahwa nilai Otsu mengalami perubahan sepanjang proses pemindaian sesuai dengan karakteristik intensitas citra yang diperoleh pada setiap posisi makrometer.

4.3.2 Analisis Data Objek Rambut Tunggal

Analisis selanjutnya dilakukan terhadap hasil pengolahan citra pada objek rambut tunggal. Sama seperti pengujian sebelumnya, sistem melakukan pemindaian makro menggunakan lensa objektif 4× dan 10× sebelum menentukan lensa yang digunakan. Dari proses tersebut diperoleh nilai *focus score* dan Otsu pada masing-masing objektif.

Pada lima data pengujian rambut tunggal yang digunakan, sistem menghasilkan objektif 10× sebagai lensa terpilih. Data objektif 4× tetap dianalisis karena objektif tersebut juga telah melalui proses pemindaian dan pengolahan citra sebelum keputusan akhir dihasilkan. Hasil pengolahan citra kedua objektif ditunjukkan pada Tabel 4.7.

Tabel 4.7 Hasil pengolahan citra pada objek rambut tunggal

No.	<i>Focus</i> Makro 4×	Otsu Makro 4×	<i>Focus</i> Makro 10×	Otsu Makro 10×	Lensa Terpilih
1	5,072	119,3	4,443	81,000	10×
2	5,079	118,0	5,639	95,154	10×
3	6,191	111,0	8,533	96,923	10×
4	6,688	114,4	8,496	97,385	10×
5	6,478	112,8	8,018	91,615	10×
Rata-rata	5,902	115,100	7,026	92,415	10×

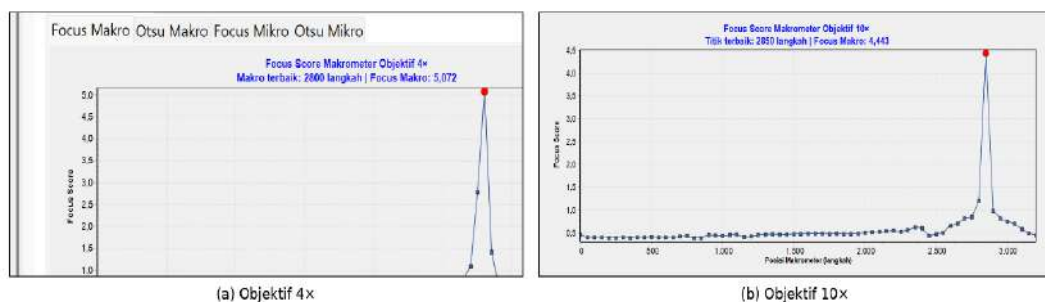
Berdasarkan Tabel 4.7, nilai *focus score* makro objektif 4× berada pada rentang 5,072 sampai 6,688, dengan nilai rata-rata sebesar 5,902. Sementara itu, objektif 10× menghasilkan *focus score* makro antara 4,443 sampai 8,533, dengan nilai rata-rata sebesar 7,026.

Pada pengujian ke-2 sampai ke-5, nilai *focus score* makro objektif 10× lebih tinggi dibandingkan objektif 4×. Namun, kondisi yang berbeda terdapat pada pengujian ke-1. Objektif 4× menghasilkan *focus score* sebesar 5,072, sedangkan objektif 10× menghasilkan nilai yang lebih rendah, yaitu 4,443. Meskipun

demikian, hasil akhir sistem tetap menghasilkan objektif 10× sebagai lensa yang digunakan.

Hasil pengujian pertama tersebut penting karena menunjukkan bahwa nilai *focus score* makro tertinggi tidak secara langsung menjadi satu-satunya dasar dalam menentukan lensa objektif. Sistem melakukan evaluasi lebih lanjut terhadap karakteristik hasil pemindaian kedua objektif sebelum menghasilkan keputusan akhir. Mekanisme evaluasi tersebut akan dibahas pada bagian analisis dasar pemilihan lensa.

Kondisi ketika nilai *focus score* makro objektif 4× lebih tinggi tetapi sistem menghasilkan objektif 10× dapat diamati pada salah satu hasil pengujian rambut tunggal. Grafik hasil pemindaian kedua objektif tersebut ditunjukkan pada Gambar 4.8.



Gambar 4.8 Grafik Focus Score makro objektif 4× dan 10× pada objek rambut tunggal

Berdasarkan Gambar 4.8, objektif 4× memperoleh nilai *focus score* makro terbaik sebesar 5,072 pada posisi makrometer 2800 langkah, sedangkan objektif 10× memperoleh nilai sebesar 4,443 pada posisi makrometer 2850 langkah. Walaupun nilai maksimum objektif 4× lebih tinggi pada pengujian tersebut, sistem tetap menghasilkan objektif 10× sebagai lensa terpilih. Hasil ini memperlihatkan bahwa perbandingan nilai *focus score* maksimum saja belum cukup untuk menjelaskan keputusan yang dihasilkan oleh program.

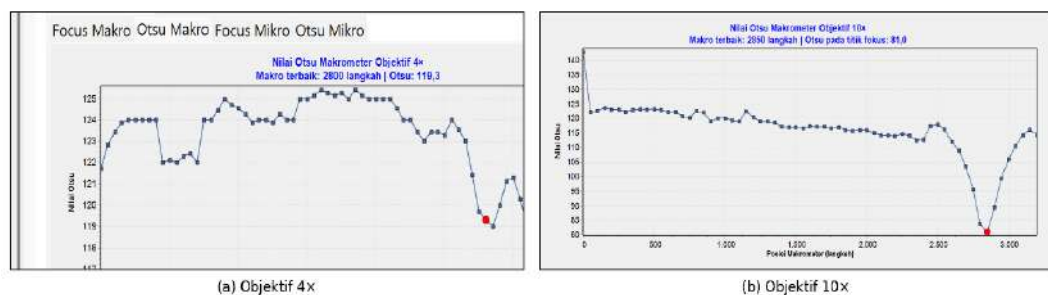
Berdasarkan Tabel 4.7, nilai Otsu objektif 4× berada pada rentang 111,0 sampai 119,3, dengan rata-rata sebesar 115,100. Sementara itu, objektif 10×

menghasilkan nilai Otsu antara 81,000 sampai 97,385, dengan rata-rata sebesar 92,415.

Berbeda dengan pola *focus score*, nilai Otsu objektif 4× lebih tinggi dibandingkan objektif 10× pada seluruh lima pengujian rambut tunggal. Meskipun demikian, hasil akhir seluruh pengujian tetap menghasilkan objektif 10×. Hal tersebut menunjukkan bahwa nilai Otsu yang lebih tinggi tidak berarti bahwa suatu lensa secara langsung akan dipilih oleh sistem.

Dalam proses pengolahan citra, nilai Otsu digunakan sebagai nilai ambang untuk membantu membedakan karakteristik piksel dan menentukan bagian tepi objek yang digunakan dalam perhitungan *focus score*. Oleh karena itu, nilai Otsu tidak dibandingkan secara langsung dengan aturan bahwa nilai yang lebih tinggi menghasilkan lensa yang lebih baik.

Perubahan nilai Otsu pada pemindaian objektif 4× dan 10× dalam pengujian yang sama ditunjukkan pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Grafik nilai Otsu objektif 4× dan 10× pada objek rambut tunggal

Berdasarkan Gambar 4.9, nilai Otsu pada posisi makro terbaik objektif 4× sebesar 119,3, sedangkan objektif 10× sebesar 81,000. Meskipun nilai Otsu objektif 4× lebih tinggi, lensa yang dihasilkan oleh sistem pada pengujian tersebut tetap objektif 10×. Kondisi ini kembali menunjukkan bahwa besarnya nilai Otsu tidak digunakan sebagai kriteria langsung untuk menentukan lensa objektif.

Berdasarkan lima pengujian objek rambut tunggal, rata-rata *focus score* makro objektif 4× sebesar 5,902, sedangkan objektif 10× sebesar 7,026. Sistem menghasilkan objektif 10× pada seluruh pengujian. Meskipun pada sebagian besar pengujian *focus score* objektif 10× lebih tinggi, terdapat satu pengujian ketika *focus*

score objektif 4× lebih tinggi tetapi sistem tetap menghasilkan objektif 10×. Selain itu, nilai Otsu objektif 4× lebih tinggi daripada objektif 10× pada seluruh pengujian, tetapi kondisi tersebut tidak menyebabkan objektif 4× dipilih. Hasil ini menunjukkan bahwa keputusan lensa tidak ditentukan hanya berdasarkan nilai maksimum *focus score* maupun besarnya nilai Otsu, sehingga diperlukan analisis terhadap mekanisme evaluasi yang digunakan program dalam menentukan objektif 4× atau 10×.

4.3.3 Perbandingan Keseluruhan Hasil Pemindaian

Setelah hasil pengolahan citra pada objek rambut banyak dan rambut tunggal dianalisis secara terpisah, selanjutnya dilakukan perbandingan untuk melihat karakteristik hasil pemindaian objektif 4× dan 10× secara keseluruhan. Perbandingan dilakukan menggunakan nilai rata-rata *focus score* makro, nilai Otsu makro, serta lensa objektif yang dihasilkan oleh sistem.

Ringkasan hasil pemindaian kedua kelompok pengujian ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Ringkasan hasil pemindaian objek rambut banyak dan rambut tunggal

Objek	<i>Focus Score</i>	Otsu	<i>Focus Score</i>	Otsu	Lensa
Pengujian	4×	4×	10×	10×	Terpilih
Rambut banyak	6,450	113,477	3,825	101,220	4×
Rambut tunggal	5,902	115,100	7,026	92,415	10×

Berdasarkan Tabel 4.8, pada pengujian objek rambut banyak diperoleh rata-rata *focus score* objektif 4× sebesar 6,450, lebih tinggi dibandingkan objektif 10× sebesar 3,825. Pada lima pengujian kelompok ini, sistem menghasilkan objektif 4× sebagai lensa yang digunakan.

Pada pengujian objek rambut tunggal diperoleh kondisi yang berbeda. Rata-rata *focus score* objektif 10× sebesar 7,026, lebih tinggi dibandingkan objektif 4× sebesar 5,902, dan sistem menghasilkan objektif 10× pada seluruh pengujian. Secara rata-rata, hasil tersebut menunjukkan adanya perbedaan respons *focus score* antara kedua objektif pada masing-masing kelompok pengujian.

Meskipun hasil rata-rata menunjukkan kecenderungan yang sesuai dengan lensa yang akhirnya digunakan, nilai *focus score* maksimum tidak selalu secara langsung menentukan hasil pemilihan lensa. Hal tersebut dapat diamati pada salah satu pengujian rambut tunggal, ketika objektif 4× menghasilkan *focus score* sebesar 5,072, sedangkan objektif 10× menghasilkan nilai 4,443. Walaupun nilai objektif 4× lebih tinggi, sistem tetap menghasilkan objektif 10× sebagai lensa terpilih. Dengan demikian, perbandingan nilai *focus score* maksimum saja belum dapat menjelaskan seluruh keputusan yang dihasilkan oleh program.

Perbandingan nilai Otsu juga memberikan hasil yang berbeda dengan keputusan lensa. Pada objek rambut banyak, rata-rata Otsu objektif 4× sebesar 113,477, sedangkan objektif 10× sebesar 101,220. Sementara itu, pada objek rambut tunggal rata-rata Otsu objektif 4× sebesar 115,100, sedangkan objektif 10× sebesar 92,415.

Dengan demikian, rata-rata nilai Otsu objektif 4× lebih tinggi daripada objektif 10× pada kedua kelompok pengujian. Namun, hasil akhir sistem berbeda, yaitu objektif 4× pada kelompok rambut banyak dan objektif 10× pada kelompok rambut tunggal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa nilai Otsu yang lebih tinggi tidak secara langsung menentukan lensa yang digunakan oleh sistem.

Berdasarkan perbandingan keseluruhan hasil pemindaian, nilai *focus score* dan Otsu dari kedua objektif memberikan informasi mengenai karakteristik citra yang diperoleh selama proses pemindaian. Pada objek rambut banyak, rata-rata *focus score* objektif 4× lebih tinggi dan sistem menghasilkan objektif 4×. Pada objek rambut tunggal, rata-rata *focus score* objektif 10× lebih tinggi dan sistem menghasilkan objektif 10×. Namun, terdapat pengujian ketika nilai *focus score* objektif yang tidak terpilih lebih tinggi, sedangkan perbandingan nilai Otsu juga tidak menunjukkan hubungan langsung dengan lensa yang digunakan. Oleh karena itu, nilai maksimum *focus score* maupun nilai Otsu tidak dapat digunakan secara terpisah untuk menjelaskan keputusan lensa. Dasar evaluasi yang digunakan program dalam menghasilkan keputusan objektif 4× atau 10× dibahas pada bagian selanjutnya.

4.3.4 Analisis Dasar Pemilihan Lensa Objektif

hanya dengan membandingkan nilai maksimum *focus score* ataupun nilai Otsu antara objektif 4× dan 10×. Program melakukan evaluasi terhadap hasil pemindaian makro kedua objektif menggunakan kualitas relatif terhadap median serta nilai rata-rata lokal di sekitar posisi fokus terbaik. Hasil evaluasi tersebut selanjutnya digunakan untuk menentukan objektif yang dipilih oleh sistem.

Kualitas relatif kurva fokus (Qj) dan rata-rata fokus lokal (Lj) didefinisikan pada Subbab 2.10. Perbandingan kedua objektif menggunakan RQ dan RL beserta aturan pemilihan yang dijelaskan pada Subbab 3.3.2. Nilai RQ tersedia dalam Tabel 4.9 dan Tabel 4.10. Estimasi RL dari data pemindaian dan grafik disajikan pada Tabel 4.11 agar keputusan dapat ditelusuri secara numerik.

Penggunaan median memungkinkan program mengevaluasi tingkat kemunculan puncak fokus terhadap nilai fokus secara keseluruhan. Dengan demikian, kualitas pemindaian tidak hanya ditentukan oleh besarnya satu nilai maksimum, tetapi juga mempertimbangkan karakteristik nilai fokus yang diperoleh selama proses pemindaian.

Berdasarkan parameter yang digunakan pada program, objektif 10× dipilih apabila $RQ \geq 0,60$ atau $RL \geq 0,70$. Penggunaan hubungan OR menunjukkan bahwa terpenuhinya salah satu dari kedua kriteria tersebut sudah dapat menghasilkan keputusan objektif 10×. Sebaliknya, objektif 4× dipilih apabila $RQ < 0,60$ dan $RL < 0,70$.

Analisis Hasil Pemilihan Lensa pada Objek Rambut Banyak

Hasil evaluasi kualitas makro pada lima pengujian objek rambut banyak ditunjukkan pada Tabel 4.9. Seluruh pengujian pada kelompok ini menghasilkan objektif 4× sebagai lensa yang digunakan oleh sistem.

Tabel 4.9 Hasil evaluasi kualitas makro pada objek rambut banyak

No.	Kualitas Makro 4×	Kualitas Makro 10×	RQ	Lensa Terpilih
1	17,856	8,427	0,472	4×
2	17,842	5,646	0,316	4×

No.	Kualitas Makro 4×	Kualitas Makro 10×	RQ	Lensa Terpilih
3	13,625	4,999	0,367	4×
4	21,513	8,965	0,417	4×
5	23,750	4,089	0,172	4×

Berdasarkan Tabel 4.9, nilai RQ pada lima pengujian rambut banyak berturut-turut sebesar 0,472; 0,316; 0,367; 0,417; dan 0,172. Seluruh nilai tersebut berada di bawah ambang RQ sebesar 0,60. Karena aturan pemilihan objektif 4× mensyaratkan $RQ < 0,60$ dan $RL < 0,70$, estimasi RL pada Tabel 4.11 digunakan untuk memeriksa syarat kedua pada kelima pengujian tersebut.

Pada pengujian ke-2, kualitas makro objektif 4× sebesar 17,842 dan objektif 10× sebesar 5,646 menghasilkan R_Q sebesar 0,316. Nilai ini berada di bawah ambang 0,60 dan konsisten dengan keputusan sistem memilih objektif 4×.

Analisis Hasil Pemilihan Lensa pada Objek Rambut Tunggal

Analisis selanjutnya dilakukan terhadap lima pengujian objek rambut tunggal. Berbeda dengan pengujian rambut banyak, seluruh pengujian pada kelompok ini menghasilkan objektif 10× sebagai lensa yang dipilih oleh sistem. Hasil evaluasi kualitas makro ditunjukkan pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Hasil evaluasi kualitas makro pada objek rambut tunggal

No.	Kualitas Makro 4×	Kualitas Makro 10×	RQ	Lensa Terpilih
1	15,229	8,394	0,551	10×
2	17,507	11,121	0,635	10×
3	18,865	16,135	0,855	10×
4	20,748	15,958	0,769	10×
5	19,870	15,165	0,763	10×

Berdasarkan Tabel 4.10, empat dari lima pengujian memperoleh nilai RQ di atas batas 0,60. Pada pengujian ke-2 sampai ke-5 diperoleh nilai RQ sebesar 0,635; 0,855; 0,769; dan 0,763. Nilai tersebut telah memenuhi kriteria rasio kualitas untuk pemilihan objektif 10×.

Pada pengujian ke-2, kualitas makro objektif 4× sebesar 17,507 dan objektif 10× sebesar 11,121 menghasilkan R_Q sebesar 0,635. Nilai tersebut melampaui ambang 0,60 sehingga memenuhi salah satu kriteria pemilihan objektif 10×.

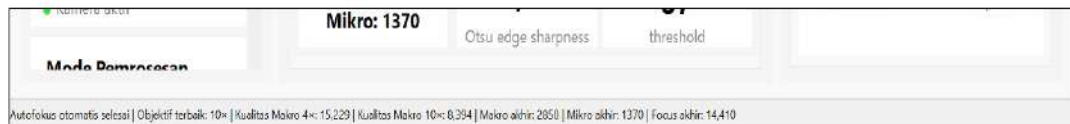
Pada pengujian ke-1, kualitas relatif objektif 4× sebesar 15,229 dan objektif 10× sebesar 8,394 menghasilkan R_Q sebesar 0,551. Nilai tersebut berada di bawah ambang R_Q sebesar 0,60, tetapi hasil sistem menunjukkan objektif 10×. Sesuai aturan keputusan, hasil ini mensyaratkan $RL \geq 0,70$; estimasi RL pengujian tersebut sebesar 0,73 sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.11.

Nilai kualitas makro dan hasil pemilihan lensa juga dapat diamati pada tampilan status aplikasi Delphi. Contoh hasil keputusan sistem pada pemilihan objektif 4× dan objektif 10× ditunjukkan pada Gambar 4.10.

(a) Contoh hasil pemilihan objektif 4×



(b) Contoh hasil pemilihan objektif 10×



Gambar 4.10 Hasil pemilihan lensa objektif 4× dan 10× pada aplikasi Delphi

Pada Gambar 4.10(a), kualitas relatif objektif 4× sebesar 23,750 dan objektif 10× sebesar 4,089 menghasilkan R_Q sebesar 0,172. Aplikasi menampilkan pemilihan objektif 4×; estimasi $RL \approx 0,49$ pada Tabel 4.11 juga berada di bawah 0,70. Pada Gambar 4.10(b), R_Q sebesar 0,551 belum memenuhi batas 0,60, tetapi aplikasi menampilkan objektif 10×. Estimasi RL pada contoh tersebut sebesar 0,73 dan memenuhi syarat $RL \geq 0,70$ menurut Tabel 4.11.

Nilai Otsu digunakan sebagai ambang pemisahan intensitas citra dan tidak dibandingkan langsung pada aturan akhir pemilihan objektif 4× atau 10×. Hubungannya dengan focus score bergantung pada cara perhitungan focus score yang diterapkan di program; oleh karena itu, nilai Otsu yang lebih tinggi tidak dapat langsung ditafsirkan sebagai alasan pemilihan objektif.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa objektif dengan rata-rata nilai Otsu lebih tinggi tidak selalu menjadi objektif terpilih. Keputusan akhir dihasilkan oleh aturan RQ dan RL, sedangkan nilai Otsu dicatat sebagai hasil pengolahan citra.

Berdasarkan hasil evaluasi seluruh pengujian, lima pengujian objek rambut banyak menghasilkan objektif 4×, sedangkan lima pengujian objek rambut tunggal menghasilkan objektif 10×. Pada kelompok rambut banyak, seluruh nilai rasio kualitas R_Q berada di bawah batas 0,60. Sementara itu, pada kelompok rambut tunggal, empat dari lima pengujian memiliki RR_Q yang telah memenuhi batas 0,60 sehingga memenuhi kriteria pemilihan objektif 10× melalui rasio kualitas.

Pada satu pengujian rambut tunggal diperoleh $R_Q=0,551$, tetapi sistem tetap menghasilkan objektif 10×. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rasio kualitas bukan satu-satunya parameter keputusan karena program juga mempertimbangkan rasio lokal dengan batas $R_L \geq 0,70$. Dengan demikian, pemilihan objektif dilakukan berdasarkan karakteristik hasil pemindaian kedua lensa secara lebih menyeluruh, bukan hanya berdasarkan nilai maksimum *focus score* maupun nilai Otsu.

Nilai fokus lokal diperoleh dengan merata-ratakan lima titik pada posisi makro terbaik dan posisi ± 50 serta ± 100 langkah. Untuk lensa yang terpilih, kelima *focus score* diambil dari Data_Makro.csv pada berkas pengujian. Untuk lensa pasangannya, titik-titik dibaca dari grafik Focus Makro pada tangkapan layar, sedangkan nilai puncak diambil dari angka yang tertulis pada grafik. Rasio RL dihitung dengan membagi rata-rata lokal objektif 10× ($L_{10\times}$) dengan rata-rata lokal objektif 4× ($L_{4\times}$). Hasilnya ditampilkan pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Estimasi nilai rasio fokus lokal dari data CSV dan grafik

Rambut	Uji	$L_{4\times}$	$L_{10\times}$	$RL \approx L_{10\times}/L_{4\times}$	Lensa
Banyak	1	3,986	2,428	0,61	4×
Banyak	2	3,610	1,688	0,47	4×
Banyak	3	2,832	1,561	0,55	4×
Banyak	4	3,493	2,297	0,66	4×
Banyak	5	3,339	1,653	0,49	4×

Tunggal	1	2,264	1,659	0,73	10×
Tunggal	2	2,227	2,079	0,93	10×
Tunggal	3	3,490	3,794	1,09	10×
Tunggal	4	3,646	3,461	0,95	10×
Tunggal	5	3,610	3,592	1,00	10×

Pada Tabel 4.11, kelima estimasi RL rambut banyak berada di bawah 0,70, sedangkan kelima estimasi RL rambut tunggal mencapai atau melampaui 0,70. Sebagai contoh, pengujian rambut tunggal pertama menghasilkan $RL = 1,659/2,264 = 0,73$. Karena $RQ = 0,551$ masih di bawah 0,60, terpenuhinya batas RL menjelaskan pemilihan objektif 10×. Hasil pembacaan grafik merupakan estimasi dan dapat berbeda dari keluaran numerik program.

4.4 Analisis Implementasi Program pada Sistem Kontrol Otomatis Perbesaran

Sistem kontrol otomatis perbesaran pada penelitian ini dianalisis sebagai satu rangkaian proses yang menghubungkan pemindaian citra, penilaian ketajaman, pemilihan lensa objektif, dan penggerakan revolver. Proses diawali dengan pemindaian menggunakan objektif 4×, kemudian dilanjutkan dengan objektif 10×. Urutan ini memastikan bahwa keputusan perbesaran tidak dibuat dari satu citra saja, melainkan dari karakteristik hasil pemindaian kedua objektif pada objek rambut yang sama.

Pada setiap objektif, pemindaian makro dimulai dari posisi 0 dengan interval 50 langkah. Batas gerak objektif 4× adalah 3800 langkah, sedangkan objektif 10× adalah 3200 langkah. Perbedaan batas tersebut menyesuaikan rentang pencarian fokus masing-masing objektif. Pada setiap posisi diambil sembilan sampel agar nilai yang digunakan tidak bergantung pada satu pembacaan citra dan lebih tahan terhadap perubahan sesaat akibat pencahayaan, getaran, atau derau.

Parameter pemindaian kedua objektif yang digunakan pada penelitian ini dirangkum pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Parameter pemindaian makro objektif 4× dan 10×

Parameter	Objektif 4×	Objektif 10×
Posisi awal	0 langkah	0 langkah
Interval pemindaian	50 langkah	50 langkah
Posisi maksimum	3800 langkah	3200 langkah
Jumlah sampel setiap posisi	9 sampel	9 sampel
Data hasil pemindaian	<i>Focus score</i> dan <i>Otsu</i>	

Tabel 4.12 menunjukkan bahwa prosedur pengambilan data pada objektif 4× dan 10× dibuat setara pada posisi awal, interval, jumlah sampel, serta jenis data yang direkam. Perbedaan hanya terdapat pada posisi maksimum karena rentang fokus kedua objektif tidak sama. Kesetaraan prosedur ini diperlukan agar hasil kedua objektif dapat dibandingkan secara konsisten sebelum sistem menetapkan perbesaran yang paling sesuai.

Kode Program 4.1 Perhitungan rata-rata sampel pada setiap posisi

```
if FGraphSampleCount > 2 then
begin
  AverageFocus := (FGraphFocusSum - FGraphFocusMin -
                  FGraphFocusMax) / (FGraphSampleCount - 2);
  AverageOtsu := (FGraphOtsuSum - FGraphOtsuMin -
                 FGraphOtsuMax) / (FGraphSampleCount - 2);
end;
```

Kode Program 4.1 mengeluarkan satu nilai tertinggi dan satu nilai terendah sebelum menghitung rata-rata pada setiap posisi. Dengan sembilan sampel, pembagi yang digunakan menjadi tujuh. Hasil AverageFocus membentuk kurva fokus makro yang dianalisis pada Gambar 4.11, sedangkan AverageOtsu mencatat hasil ambang citra pada posisi yang sama.

Citra pada setiap posisi diubah menjadi citra tingkat keabuan. Aplikasi menghitung ambang Otsu dari citra tersebut, lalu meneruskannya ke fungsi penghitungan focus score. Nilai focus score dipakai untuk membentuk kurva ketajaman terhadap posisi motor. Keterkaitan dua fungsi tersebut diperlihatkan pada Kode Program 4.2.

Kode Program 4.2 Penggunaan ambang Otsu dalam penghitungan fokus

```
FLastOtsu := HitungOtsuDariImage(GrayImage);  
FLastFocus := HitungFocusScoreDariImage(  
    GrayImage, FLastOtsu);
```

Kode Program 4.2 menunjukkan bahwa hasil ambang Otsu diteruskan sebagai masukan fungsi penghitungan focus score. Dengan demikian, Otsu digunakan pada pengolahan citra sebelum evaluasi fokus; nilai ambangnya tidak menjadi rasio yang dibandingkan secara langsung dalam keputusan objektif.

Untuk mengurangi pengaruh satu puncak yang muncul secara kebetulan, hasil pemindaian dinilai melalui kualitas makro relatif dan rata-rata lokal di sekitar posisi fokus terbaik. Kualitas makro relatif menunjukkan seberapa menonjol puncak fokus terhadap kecenderungan nilai selama pemindaian, sedangkan rata-rata lokal menggambarkan kestabilan ketajaman di sekitar puncak. Hasil objektif $10\times$ kemudian dibandingkan dengan hasil objektif $4\times$ melalui parameter R_Q dan R_L yang dasar perhitungannya telah dijelaskan pada Bab II.

Kode Program 4.3 Perhitungan kualitas relatif kurva fokus

```
AMedianFocus := CalculateSeriesMedian(ASeries);  
Baseline := Abs(AMedianFocus);  
Result := (APeakFocus - AMedianFocus) / Baseline;
```

Kode Program 4.3 menghitung selisih antara puncak dan median, lalu membaginya dengan nilai mutlak median. Hasil ini disimpan sebagai kualitas makro relatif untuk masing-masing objektif. Pemakaian median membuat evaluasi mempertimbangkan puncak terhadap keadaan kurva secara keseluruhan, sesuai dengan kualitas makro yang ditampilkan pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10.

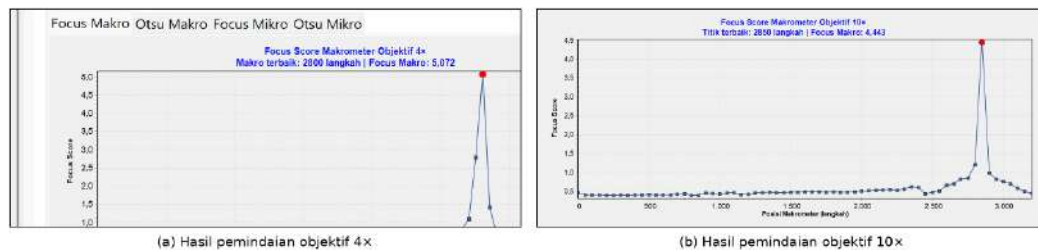
Kode Program 4.4 Pengambilan rata-rata fokus lokal

```
if Abs(ASeries.XValue[I] - APeakPosition) <= ARadius then  
begin  
    TotalValue := TotalValue + ASeries.YValue[I];  
    Inc(SampleCount);  
end;  
Result := TotalValue / SampleCount;
```

Kode Program 4.4 memasukkan titik kurva yang berada dalam radius 100 langkah dari posisi puncak. Pada interval pemindaian 50 langkah, rentang tersebut

mencakup lima posisi jika seluruh titik tersedia. Rata-rata yang dihasilkan menjadi L4× dan L10×; keduanya digunakan untuk menghitung estimasi RL pada Tabel 4.11.

Salah satu hasil pemindaian kedua objektif ditunjukkan pada Gambar 4.11. Kurva tersebut memperlihatkan perubahan focus score terhadap posisi motor selama pencarian fokus makro.



Gambar 4.11 Hasil pemindaian makro pada program: (a) objektif 4× dan (b) objektif 10×

Berdasarkan Gambar 4.11, objektif 4× menghasilkan nilai fokus makro terbaik sebesar 5,072 pada posisi 2800 langkah, sedangkan objektif 10× menghasilkan nilai terbaik sebesar 4,443 pada posisi 2850 langkah. Perbedaan posisi puncak menegaskan bahwa masing-masing objektif mempunyai karakteristik fokus yang berbeda. Karena itu, sistem menyimpan hasil pemindaian keduanya terlebih dahulu dan baru melakukan evaluasi setelah seluruh data tersedia; nilai puncak tunggal tidak langsung dipakai sebagai keputusan akhir.

Tahap keputusan menggunakan nilai ambang R_Q sebesar 0,60 dan R_L sebesar 0,70. Objektif 10× dipilih apabila sekurang-kurangnya salah satu parameter mencapai ambangnya. Jika keduanya berada di bawah ambang, objektif 4× dipilih. Penggunaan dua parameter membuat keputusan mempertimbangkan keunggulan puncak secara keseluruhan sekaligus kestabilan nilai di sekitar posisi fokus terbaik.

Kode Program 4.5 Perhitungan dua rasio evaluasi lensa

```
QualityRatio10To4 := FDual10XMacroQuality /
                    FDual4XMacroQuality;
LocalRatio10To4 := LocalAverage10X /
                    LocalAverage4X;
```

Kode Program 4.5 menghasilkan RQ dari perbandingan kualitas makro dan RL dari perbandingan rata-rata fokus lokal. Contoh pada pengujian rambut tunggal pertama memberikan RQ sebesar 0,551 dan estimasi RL sekitar 0,73. Dua rasio ini masuk ke aturan keputusan pada Kode Program 4.6.

Kode Program 4.6 Keputusan objektif 4× dan 10×

```
if (QualityRatio10To4 >= MIN_10X_QUALITY_RATIO) or
  (LocalRatio10To4 >= MIN_10X_LOCAL_RATIO) then
begin
  FDualWinnerLens := 2; // Objektif 10×
end
else
begin
  FDualWinnerLens := 1; // Objektif 4×
end;
```

Kode Program 4.6 menggunakan operator or dengan batas $MIN_10X_QUALITY_RATIO = 0,60$ dan $MIN_10X_LOCAL_RATIO = 0,70$. Pada pengujian rambut tunggal pertama, RQ belum mencapai 0,60 tetapi RL diperkirakan melewati 0,70, sehingga variabel `FDualWinnerLens` bernilai 2. Apabila kedua syarat tidak terpenuhi, nilainya menjadi 1, seperti pada kelompok rambut banyak.

Hubungan antara kedua parameter dan hasil pemilihan objektif dirangkum pada Tabel 4.13.

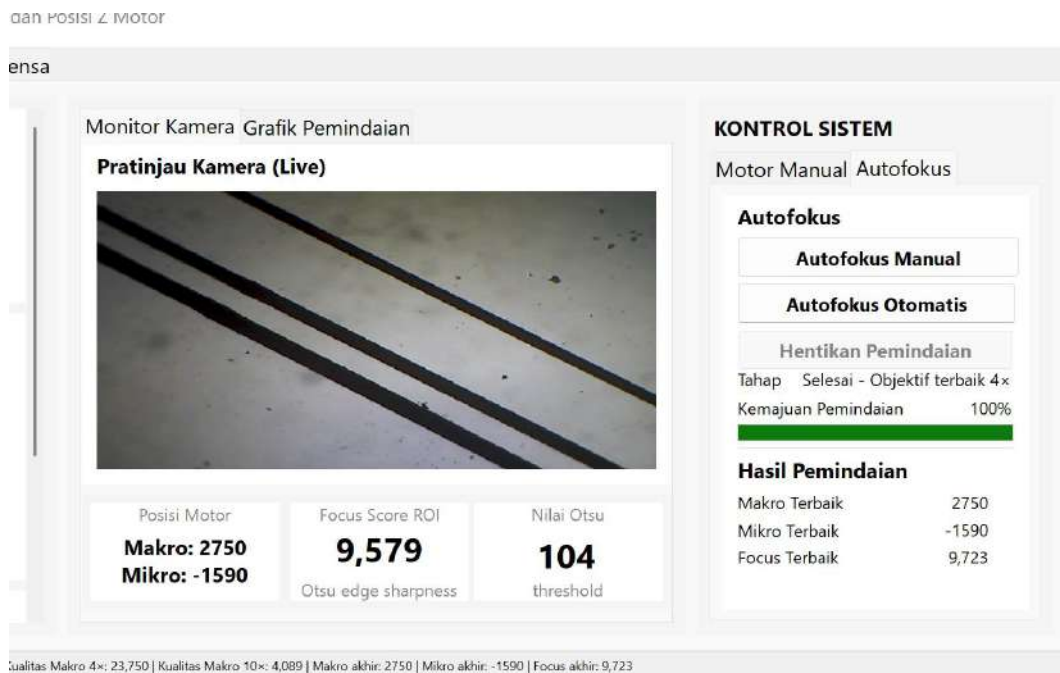
Tabel 4.13 Logika pemilihan lensa objektif pada program

Kondisi RQ	Kondisi RL	Hasil Pemilihan
$RQ \geq 0,60$	Bebas	10×
$RQ < 0,60$	$RL \geq 0,70$	10×
$RQ < 0,60$	$RL < 0,70$	4×

Tabel 4.13 memperlihatkan tiga kemungkinan keputusan. Objektif 10× tetap dapat dipilih ketika RQ belum mencapai 0,60 tetapi R_L telah mencapai 0,70, atau sebaliknya. Objektif 4× dipilih hanya ketika kedua parameter tidak memenuhi batas. Logika ini sesuai dengan tujuan penelitian, yaitu mempertahankan perbesaran 10× ketika detail rambut masih memberikan respons fokus yang

memadai, tetapi kembali ke objektif 4× ketika kualitas citra 10× tidak cukup kuat atau stabil.

Contoh hasil evaluasi yang menetapkan objektif 4× ditunjukkan pada Gambar 4.12. Tampilan aplikasi memperlihatkan hasil perbandingan kualitas citra dan keputusan akhir sistem.



Gambar 4.12 Hasil evaluasi program dengan objektif 4× sebagai lensa terpilih

Pada Gambar 4.12, kualitas relatif objektif 4× sebesar 23,750 dan objektif 10× sebesar 4,089 menghasilkan RQ sebesar 0,172. Aplikasi menampilkan “Objektif terbaik: 4×”. Menurut aturan pada Subbab 3.3.2, keputusan ini juga mensyaratkan $RL < 0,70$; estimasi RL pengujian tersebut sekitar 0,50 sebagaimana disajikan pada Tabel 4.11.

Pada pengujian rambut tunggal pertama, estimasi $RL \approx 0,73$ pada Tabel 4.11 memperlihatkan secara numerik peran indikator lokal ketika $RQ = 0,551$ masih berada di bawah batas 0,60.

Keputusan yang dihasilkan aplikasi selanjutnya diterjemahkan menjadi perintah pengaturan revolver. Perintah dikirim melalui koneksi TCP pada jaringan WiFi menuju ESP32 utama, lalu diteruskan ke ESP32 revolver melalui jalur digital GPIO. ESP32 revolver mengendalikan driver TB6600 dan motor stepper NEMA17

untuk memindahkan posisi revolver sebesar 3200 langkah antara objektif 4× dan 10×. Jalur status dari ESP32 revolver dikembalikan ke ESP32 utama sehingga posisi akhir objektif dapat dikenali oleh sistem.

Kode Program 4.7 Pengiriman perintah lensa menuju ESP32

```
procedure SendLensCommand(const ACommand: string);  
begin  
    SendCommand('REV=' + ACommand);  
end;
```

Kode Program 4.7 memberi awalan REV= pada perintah pengaturan revolver yang dikirim dari aplikasi. Perintah itu meneruskan keputusan FDualWinnerLens ke jalur kontrol ESP32. Kesesuaian antara lensa yang ditampilkan aplikasi dan posisi revolver menjadi bukti bahwa keputusan perangkat lunak diterapkan sebagai gerak mekanis.

Keterkaitan tersebut menunjukkan bahwa hasil pengolahan citra tidak berhenti sebagai informasi pada tampilan aplikasi. Nilai fokus dari objek rambut menjadi dasar keputusan perbesaran, kemudian keputusan tersebut diwujudkan sebagai gerakan mekanis revolver. Dengan alur yang berkesinambungan, penelitian ini mengintegrasikan pengukuran ketajaman citra dan kontrol perangkat keras untuk memilih objektif 4× atau 10× secara otomatis sesuai karakteristik sampel.

Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan pada sampel rambut banyak dan rambut tunggal, sistem mampu menjalankan urutan pemindaian, membandingkan hasil kedua objektif, menetapkan lensa, dan menggerakkan revolver menuju posisi yang dipilih. Hasil tersebut membuktikan fungsi operasional sistem pada kondisi pengujian penelitian ini. Meskipun demikian, nilai ambang dan performa pemilihan masih terikat pada konfigurasi kamera, pencahayaan, mekanik, serta karakteristik sampel yang digunakan, sehingga pengujian dengan jumlah dan variasi sampel yang lebih luas diperlukan untuk menilai kemampuan generalisasinya.