

Pengukuran Luas Daun Berbasis Pengolahan Citra Digital Menggunakan Operasi Morfologi

Nirina Nurhazelin¹, Ardi wijaya^{2*}

^{1,2*} Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Bengkulu, Indonesia.

¹nirina.ot7@gmail.com, ^{2*}ardiwijaya@umb.ac.id

*) ardiwijaya@umb.ac.id

Abstrak-Pengukuran luas daun merupakan parameter penting dalam analisis pertumbuhan tanaman karena berkaitan langsung dengan proses fotosintesis dan produktivitas biomassa. Penelitian ini mengembangkan sistem otomatis berbasis OpenCV untuk menghitung luas daun secara non-destruktif dan real-time menggunakan teknik pengolahan citra digital dan operasi morfologi. Tahapan penelitian meliputi akuisisi citra, prapemrosesan menggunakan grayscale dan Gaussian blur, segmentasi metode Otsu, perbaikan citra, deteksi kontur, serta konversi luas berbasis piksel ke satuan cm² melalui kalibrasi. Pengujian dilakukan terhadap 50 sampel yang terdiri atas daun sempurna, berlubang, dan rusak. Hasil evaluasi menunjukkan nilai Mean Absolute Percentage Error (MAPE) sebesar 22,20% dengan tingkat akurasi sistem 77,80%. Akurasi tertinggi diperoleh pada daun sempurna sebesar 94,59%, diikuti daun berlubang 81,70%, dan daun rusak 51,50%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang diusulkan efektif untuk objek dengan bentuk relatif utuh, meskipun performa dipengaruhi oleh kompleksitas morfologi dan ketidakaturan kontur.

Kata Kunci: Deteksi Kontur; Luas Daun; MAPE; Operasi Morfologi; Pengolahan Citra Digital.

Abstract-Leaf area measurement is an important parameter in plant growth analysis because it is directly related to the photosynthesis process and biomass productivity. This study develops an automated system based on OpenCV to measure leaf area in a non-destructive and real-time manner using digital image processing and morphological operations. The research stages include image acquisition, preprocessing using grayscale conversion and Gaussian blur, Otsu-based segmentation, image enhancement, contour detection, and pixel-based area conversion into cm² through a calibration process. The system was tested on 50 leaf samples consisting of intact, perforated, and damaged leaves. The evaluation results showed a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) of 22.20% with an overall system accuracy of 77.80%. The highest accuracy was achieved for intact leaves at 94.59%, followed by perforated leaves at 81.70%, while damaged leaves produced the lowest accuracy at 51.50%. The results indicate that the proposed method is effective for measuring leaf area with relatively intact shapes, although its performance is influenced by morphological complexity and contour irregularities.

Keywords: Contour Detection; Digital Image Processing; Leaf Area; MAPE; Morphological Operations.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komputasi telah mendorong kemajuan pesat dalam bidang *Digital Image Processing*, yang memungkinkan gambar digital tidak hanya ditampilkan, tetapi juga dianalisis untuk mengekstraksi informasi yang bermakna [1] [2] [3] [4]. Salah satu penerapan penting pengolahan citra digital dalam bidang pertanian adalah untuk mendukung analisis pertumbuhan dan kondisi fisiologis tanaman. Parameter yang umum digunakan dalam analisis tersebut adalah luas daun, karena berperan penting dalam proses fotosintesis, respirasi, dan transpirasi [5] [6]. Namun, pengukuran luas daun masih menghadapi berbagai kendala karena metode yang digunakan umumnya bersifat manual, memerlukan waktu lama, destruktif, dan rentan terhadap kesalahan akibat variasi bentuk serta ukuran daun [7].

Pengukuran luas daun secara manual umumnya dilakukan dengan memotong daun dan menghitung luasnya menggunakan kertas milimeter atau alat ukur tertentu [6]. Metode ini memerlukan ketelitian tinggi dan waktu yang relatif lama, serta berpotensi merusak sampel sehingga tidak dapat digunakan untuk pengamatan lanjutan [7]. Selain itu, variasi morfologi daun seperti perbedaan tepi dan ukuran bentuk serta lubang atau kerusakan mengakibatkan hasil reproduksi yang kurang konsisten dan sulit [6] [8] [5]. Situasi ini menuntut metode alternatif yang dapat meningkatkan jumlah daun secara cepat, akurat dan non-destruktif. Kemajuan teknologi pengolahan citra digital memungkinkan pengolahan daun berukuran besar secara otomatis tanpa memerlukan objek dengan hasil objektif dan konsisten yang dapat diterapkan pada berbagai jenis daun [7]. Karena itu, teknologi *computer*

vision merupakan solusi yang berguna untuk menggantikan metode manual dalam proses pengukuran area yang luas [6]. Pengukuran Luas Daun Berbasis Citra Digital terbukti mampu memberikan alternatif komputasi dimensi yang praktis, murah, mudah untuk direplikasi, serta memiliki tingkat keselarasan akurasi yang tinggi [9].

Daun merupakan organ utamatanaman tanamanyang penting untuk fotosintesis karena mengandung sejumlah besar kloroplas [6] [10]. Perkembangan daun berfungsi sebagai indikator pertumbuhan tanaman karena berkaitan dengan kemampuan menghasilkan biomassa, dimana parameter seperti indeks luas daun, laju tumbuh relatif dan laju fotosintesis dipengaruhi oleh luas permukaan daun [5]. Oleh karena itu, pengukuran luas daun yang akurat dan konsisten penting dalam penelitian agronomi, fisiologi tanaman, dan sistem monitoring pertumbuhan tanaman, dengan morfologi citra sebagai salah satu pendekatan pengolahan citra digital yang berfokus pada bentuk dan struktur objek menggunakan elemen penataan tertentu [11]. Pengolahan citra digital dapat digunakan untuk menganalisis karakteristik morfologi daun secara kuantitatif melalui ekstraksi fitur bentuk. Hasil penelitian tersebut memperkuat bahwa pendekatan pengolahan citra digital mampu memberikan informasi morfologi daun secara objektif, sehingga relevan sebagai pendukung dalam pengukuran luas daun pada penelitian ini [12]. OpenCV (*Open Source Computer Vision Library*) merupakan pustaka pengolahan citra digital yang digunakan untuk mendukung proses *filtering*, *thresholding*, segmentasi, dan deteksi objek secara real-time. Dalam pengolahan citra, operasi morfologi seperti dilasi, erosi, *opening*, dan *closing* digunakan untuk mengurangi *noise*, memperhalus kontur, serta memperjelas bentuk objek sehingga hasil segmentasi menjadi lebih baik dan proses analisis objek dapat dilakukan dengan lebih akurat [13] [14].

Dalam jurnal yang berjudul *Aplikasi Pengukuran Luas Daun Tanaman Menggunakan Pengolahan Citra Digital Berbasis Android* dikembangkan aplikasi pengukuran luas daun berbasis Android menggunakan OpenCV dan operasi morfologi berupa dilasi dan erosi. OpenCV digunakan untuk segmentasi citra dan deteksi objek daun pada proses pengukuran luas secara otomatis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan morfologi mampu menghilangkan *noise* dan memperjelas batas daun, dengan tingkat akurasi 95,1% dan kesalahan 4,9% [6]. Penelitian ini membuktikan bahwa penggunaan OpenCV dan operasi morfologi efektif dalam meningkatkan kualitas citra sebelum proses perhitungan luas dilakukan.

Dalam jurnal yang berjudul *Analisis Citra Digital Menggunakan Morfologi Opening Untuk Mengukur Tinggi Badan Manusia Berdasarkan Foto* menerapkan metode morfologi *opening* untuk mengukur tinggi badan manusia berdasarkan citra digital. OpenCV digunakan untuk segmentasi dan perbaikan kontur objek sebelum proses pengukuran dilakukan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa morfologi *opening* efektif menghaluskan kontur dan menghilangkan *noise*, sehingga meningkatkan akurasi pengukuran hingga 99,7892% [14]. Meskipun objek yang diteliti berbeda, penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan OpenCV dan pendekatan morfologi andal untuk pengukuran dimensi berbasis citra digital.

Selain itu, dalam jurnal *Application of Digital Image Processing to the Measurement of Leaf Area Index (LAI) of Rice Plants (Oryza sativa L.)* memanfaatkan OpenCV untuk segmentasi citra dan pengukuran Leaf Area Index tanaman padi secara non-destruktif, namun masih berfokus pada indeks luas daun [15]. Penelitian selanjutnya dalam jurnal *A Rice Leaf Area Index Monitoring Method Based on the Fusion of Data from RGB Camera and Multi-Spectral Camera on an Inspection Robot* menggunakan OpenCV untuk pemrosesan citra RGB dan ekstraksi objek daun secara otomatis, tetapi memerlukan perangkat keras yang kompleks [16]. Sementara itu, penelitian dalam jurnal *Estimating Tomato Plant Leaf Area Using Multiple Images from Different Viewing Angles* menerapkan OpenCV pada segmentasi citra multiview untuk meningkatkan akurasi estimasi luas daun, namun membutuhkan proses akuisisi dan pemrosesan citra yang lebih rumit [17].

Berdasarkan penelitian-penelitian sebelumnya, sebagian besar metode pengukuran luas daun masih berfokus pada estimasi luas total tanpa mempertimbangkan keberadaan lubang atau kerusakan daun secara eksplisit. Selain itu, beberapa pendekatan memerlukan perangkat keras khusus atau proses akuisisi citra yang kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan metode pengukuran luas daun aktual berbasis *Opencv* dengan operasi morfologi yang secara khusus mendeteksi kontur luar dan kontur dalam daun, sehingga perhitungan luas lebih merepresentasikan kondisi jaringan daun yang sebenarnya.

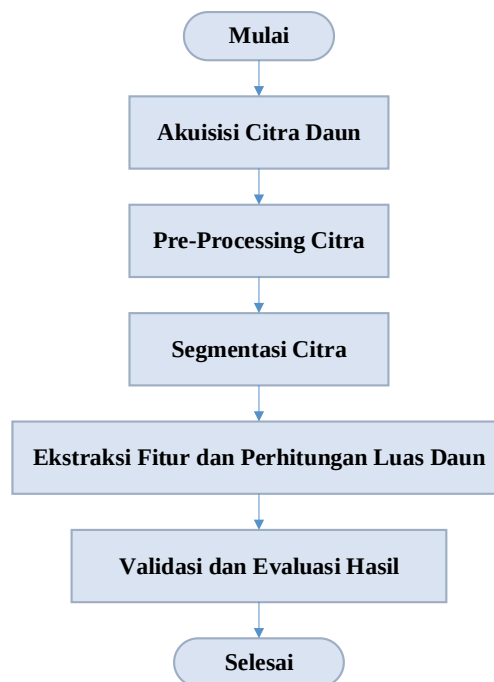
2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif eksperimental dengan tujuan mengukur luas daun secara otomatis, non-destruktif dan secara real-time menggunakan *Digital Image Processing* berbasis *computer vision*. Sistem melakukan akuisisi citra langsung melalui kamera, kemudian memprosesnya menggunakan operasi morfologi dan deteksi kontur dengan dukungan library *Opencv*. Metodologi penelitian dirancang secara sistematis agar setiap

tahapan pengolahan citra mampu menghasilkan informasi yang akurat mengenai luas daun aktual, termasuk pada daun yang memiliki variasi bentuk, tepi tidak beraturan, maupun kerusakan berupa lubang.

2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dimulai dari proses akuisisi citra daun menggunakan kamera *smartphone* yang terhubung ke sistem pemrosesan. Citra yang diperoleh kemudian melalui tahap prapemrosesan berupa konversi *grayscale* dan *Gaussian blur* untuk mengurangi noise dan mempermudah segmentasi. Selanjutnya dilakukan segmentasi menggunakan metode Otsu untuk memisahkan objek daun dari latar belakang. Hasil segmentasi diperbaiki menggunakan operasi morfologi agar kontur objek menjadi lebih jelas dan stabil. Tahap berikutnya adalah deteksi tepi dan kontur untuk memperoleh batas luar serta bagian dalam daun. Luas daun kemudian dihitung berdasarkan area kontur dan dikonversi ke satuan cm^2 melalui proses kalibrasi. Alur penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

2.2 Akuisisi Citra Daun

Akuisisi citra merupakan proses memperoleh representasi digital dari suatu keadaan, representasi ini disebut citra, dan elemen-elemen penyusunnya disebut piksel [5]. Pada penelitian ini, perangkat input yang digunakan adalah kamera *smartphone* Samsung M22 dengan resolusi 10 MP yang dihubungkan ke perangkat pemroses berupa laptop ASUS Vivobook Go 14 melalui aplikasi tambahan DroidCam, sehingga kamera ponsel berfungsi sebagai kamera eksternal pada sistem. Proses pemrosesan dilakukan menggunakan bahasa pemrograman *Python* dengan dukungan *library OpenCV* sebagai kerangka utama pengolahan citra.

Objek penelitian berupa daun yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori, yaitu 20 daun sempurna, 15 daun berlubang, dan 15 daun rusak, dengan total 50 sampel daun. Pada saat akuisisi citra, setiap daun diletakkan di atas kertas polos berwarna putih dan direkatkan menggunakan isolasi untuk menjaga posisi tetap rata serta mengurangi efek lengkungan alami daun, sehingga hasil perhitungan luas digital lebih akurat. Seluruh proses akuisisi, kalibrasi, dan perhitungan luas dilakukan pada jarak tetap 10 cm antara kamera dan objek untuk menjaga konsistensi skala pengukuran, dengan pencahayaan relatif seragam guna meminimalkan bayangan dan gangguan segmentasi. Proses akuisisi citra dan kalibrasi sistem ditunjukkan pada Gambar 2 dan Gambar 3.



Gambar 2. Pengaturan Jarak Akuisisi Citra sebesar 10 cm

Gambar 2 menunjukkan proses pengaturan jarak antara kamera dan objek daun pada tahap akuisisi citra. Penggunaan jarak tetap sebesar 10 cm bertujuan menjaga konsistensi ukuran objek dan meningkatkan akurasi proses kalibrasi.



Gambar 3. Tampilan Proses Akuisisi Citra pada Perangkat

Gambar 3 menunjukkan tampilan sistem saat proses akuisisi citra daun dilakukan menggunakan perangkat berbasis OpenCV sebelum memasuki tahap pengolahan citra dan perhitungan luas daun.

Citra diperoleh dan diproses secara real-time melalui mekanisme pengambilan frame kontinu. Resolusi pemrosesan mengikuti resolusi frame yang diterima dari sistem streaming DroidCam dan dipertahankan tanpa proses perubahan ukuran (*resize*), sehingga setiap frame diproses dalam ukuran aslinya selama sistem berjalan. Setiap frame yang ditangkap langsung melalui tahapan praproses, segmentasi, deteksi kontur, hingga perhitungan luas berbasis piksel, dan hasilnya ditampilkan secara langsung pada layar. Penelitian ini dilaksanakan di tempat tinggal peneliti yang difungsikan sebagai lingkungan penelitian terkontrol pada bulan Februari 2026.

2.3 Pre-Processing Citra

Tahap *pre-processing* adalah langkah pertama dalam pengolahan citra daun yang memiliki peranan penting dalam mempersiapkan citra sebelum dilakukan segmentasi objek daun [18]. Pada tahap ini melalui beberapa langkah pemrosesan citra yaitu konversi citra ke skala keabuan (*Grayscale*) dan *Smoothing* menggunakan *Gaussian Blur* [19].

Proses konversi gambar *grayscale* dapat mengubah gambar berwarna dengan nilai RGB menjadi citra *grayscale* (keabuan) [3]. Citra *grayscale* atau citra abu-abu adalah citra di mana setiap pikselnya merepresentasikan tingkat keabuan dengan rentang nilai dari 0 (hitam) hingga 255 (putih) [20]. Dalam tahap ini, citra berwarna (RGB) yang diperoleh melalui proses akuisisi dikonversi menjadi citra skala keabuan menggunakan fungsi `cv2.cvtColor()`. Konversi ini dilakukan untuk menyederhanakan representasi data dengan mereduksi tiga kanal warna menjadi satu kanal intensitas, sehingga kompleksitas komputasi menjadi lebih rendah tanpa menghilangkan informasi struktural objek daun. Citra RGB dikonversi ke citra *grayscale* untuk menyederhanakan representasi data dan mengurangi kompleksitas komputasi, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$\text{Grayscale} = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (1)$$

Keterangan:

R = Nilai piksel merah

G = Nilai piksel hijau

B = Nilai piksel biru

Pengubahan citra RGB menjadi citra *grayscale* ini bertujuan untuk menyederhanakan proses perhitungan [21]. Proses konversi ini bertujuan untuk merepresentasikan citra dalam satu kanal intensitas yang tetap mempertahankan informasi struktur objek daun. Citra *grayscale* menjadi dasar untuk proses *blurring* dan

segmentasi citra pada tahap berikutnya. Pengembangan metode thresholding ataupun binerisasi citra hibrida yang robust sangat krusial dalam menyaring noise spasial pada variasi daun secara adaptif [22].

Selanjutnya dilakukan proses *smoothing* menggunakan metode *Gaussian blur* dengan kernel berukuran 5×5 dan nilai deviasi standar (σ) default dari *Opencv*. Proses ini bertujuan mereduksi *noise* berfrekuensi tinggi serta variasi intensitas kecil akibat tekstur permukaan daun maupun gangguan pencahayaan ringan, sehingga batas objek menjadi lebih stabil pada tahap segmentasi berikutnya. Persamaan dari fungsi Gaussian dalam dua dimensi dapat dilihat pada Persamaan (2).

$$G_{2D}(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

Keterangan:

$G_{2D}(x, y, \sigma)$ = Fungsi Gaussian dua dimensi

x = Jarak piksel terhadap sumbu horizontal

y = Jarak piksel terhadap sumbu vertikal

σ = Deviasi standar Gaussian yang menentukan tingkat penghalusan citra

e = Bilangan eksponensial

π = Konstanta pi

Di mana σ merupakan deviasi standar dari distribusi gaussian, x menunjukkan jarak dari titik asal pada sumbu horizontal, dan y menunjukkan jarak dari titik asal pada sumbu vertikal [6].

2.4 Segmentasi Citra

Tahapan berikutnya adalah proses segmentasi citra, di mana pada tahap ini objek satu dibedakan dari objek lainnya [23]. Segmentasi citra dilakukan untuk memisahkan objek daun dari latar belakang. Metode yang digunakan adalah global thresholding berbasis Otsu dengan mode THRESH_BINARY_INV dan THRESH_OTSU. Integrasi metode segmentasi Otsu Thresholding terbukti memberikan kestabilan pemisahan region latar belakang dari area kontur objek yang dituju secara efisien [24]. Metode Otsu secara otomatis menentukan nilai ambang optimal berdasarkan distribusi histogram intensitas citra grayscale, sehingga pemisahan objek dan latar belakang dapat dilakukan secara adaptif tanpa perlu menentukan nilai ambang secara manual [18]. Berdasarkan nilai threshold (T) dapat dilihat pada Persamaan (3).

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{jika } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{jika } f(x, y) < T \end{cases} \quad (3)$$

Keterangan:

$g(x, y)$ = Citra Biner

$f(x, y)$ = Citra *Grayscale*

T = Nilai *Threshold*

Hasil thresholding berupa citra biner kemudian diproses menggunakan operasi morfologi untuk meningkatkan kualitas segmentasi. Operasi pertama adalah *morphological opening* menggunakan *structuring element* berbentuk elips berukuran 9×9 piksel. *Opening* bertujuan menghilangkan *noise* kecil pada area latar belakang maupun objek.

Selanjutnya dilakukan operasi *morphological closing* sebanyak dua kali secara berturut-turut dengan kernel yang sama. Proses *closing* ini bertujuan menutup celah kecil atau ketidakaturan pada batas objek daun serta memperhalus kontur hasil segmentasi. Penerapan *closing* sebanyak dua kali dilakukan untuk memastikan struktur objek daun menjadi lebih solid dan kontinu sebelum memasuki tahap ekstraksi fitur.

2.5 Ekstraksi Fitur

Tahapan ekstraksi fitur bertujuan untuk mendapatkan informasi geometris dari objek daun berdasarkan citra yang telah disegmentasi. Pada penelitian ini, fitur yang diekstraksi adalah kontur objek daun yang merepresentasikan batas luar dan batas dalam (lubang) daun. Deteksi kontur dilakukan menggunakan fungsi `cv2.findContours()` dengan mode `RETR_TREE` dan metode aproksimasi `CHAIN_APPROX_SIMPLE`.

Mode `RETR_TREE` dipilih karena menghasilkan struktur hierarki kontur yang memungkinkan identifikasi hubungan antara kontur induk (*parent contour*) dan kontur anak (*child contour*). Kontur induk merepresentasikan

batas luar daun, sedangkan kontur anak merepresentasikan bagian dalam daun seperti lubang atau area kerusakan. Informasi hierarki ini sangat penting untuk memastikan bahwa area yang bukan merupakan jaringan daun tidak ikut dihitung dalam proses estimasi luas.

Selain deteksi kontur, sistem juga menerapkan deteksi tepi menggunakan metode Canny. Namun, proses ini hanya digunakan sebagai visualisasi batas objek untuk keperluan analisis dan bukan sebagai dasar perhitungan luas daun.

2.6 Perhitungan Luas Daun

Perhitungan luas daun dilakukan berdasarkan luas area kontur yang diperoleh pada tahap ekstraksi fitur. Luas setiap kontur dihitung menggunakan fungsi `cv2.contourArea()` dalam satuan piksel. Luas total daun dalam piksel diperoleh dengan menjumlahkan luas kontur luar dan mengurangi seluruh luas kontur dalam berdasarkan informasi hierarki yang dihasilkan oleh metode `RETR_TREE`. Model identifikasi fitur luas spasial berbasis rasio piksel terkalibrasi mampu menjaga akurasi non-destruktif terhadap bentuk morfologi lembaran organ daun tanaman [25].

Luas daun dihitung berdasarkan luas kontur luar yang dikurangi dengan total luas kontur dalam sesuai Persamaan (4).

$$L_{daun} = L_{kontur\ luar} - \sum_{i=1}^n L_{kontur\ dalam_i} \quad (4)$$

Keterangan:

L_{daun} = Luas daun aktual yang dihitung (piksel atau satuan luas tertentu),
 $L_{kontur\ luar}$ = Luas area yang dibentuk oleh kontur luar daun,
 $L_{kontur\ dalam_i}$ = Luas area kontur ke- i yang merepresentasikan lubang atau bagian daun yang rusak,
 n = Jumlah kontur dalam yang terdeteksi pada daun.

Nilai luas dalam piksel kemudian dikonversi ke satuan cm^2 menggunakan faktor kalibrasi panjang yang diperoleh dari objek referensi sepanjang 10 cm. Faktor konversi dinyatakan sebagai jumlah piksel per sentimeter ($pixel_per_cm$). Luas dalam satuan cm^2 dihitung menggunakan persamaan:

$$L_{cm^2} = \frac{L_{pixel}}{(pixel_per_cm)^2} \quad (5)$$

Keterangan:

L_{cm^2} = Luas daun dalam satuan sentimeter persegi (cm^2)
 L_{pixel} = Luas daun hasil perhitungan kontur dalam satuan piksel
 $pixel_per_cm$ = Faktor kalibrasi yang menyatakan jumlah piksel dalam satu sentimeter
 $(pixel_per_cm)^2$ = Faktor konversi dari satuan panjang piksel ke satuan luas (cm^2)

Pendekatan ini memungkinkan sistem menghitung luas daun aktual secara lebih representatif, termasuk pada daun yang memiliki lubang atau kerusakan, serta mempertahankan konsistensi pengukuran dalam sistem real-time. Hasil perhitungan luas yang diperoleh selanjutnya dikonversi ke satuan sentimeter persegi (cm^2), sehingga nilai yang ditampilkan dan dianalisis merepresentasikan luas daun aktual dalam satuan ukuran standar.

2.7 Validasi dan Evaluasi Hasil

Tahap validasi dilakukan untuk mengevaluasi tingkat ketelitian sistem dalam mengukur luas daun berbasis citra digital. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran luas daun dari sistem dengan hasil pengukuran manual menggunakan metode kertas milimeter blok. Pada metode manual, daun diletakkan di atas kertas milimeter blok, kemudian luas dihitung berdasarkan jumlah kotak satuan ($1\ mm \times 1\ mm$) yang tertutup oleh permukaan daun dan selanjutnya dikonversi ke satuan sentimeter persegi (cm^2). Nilai hasil pengukuran manual digunakan sebagai nilai acuan (ground truth).

Untuk setiap sampel daun, selisih pengukuran dihitung sebagai nilai absolut dari perbedaan antara luas hasil sistem digital dan luas hasil pengukuran manual, yang dirumuskan sebagai:

$$\Delta L = |L_{digital} - L_{manual}| \quad (6)$$

Keterangan:

ΔL = Selisih absolut pengukuran (cm^2)

L_{digital} = Luas daun hasil perhitungan sistem berbasis citra (cm^2)

L_{manual} = Luas daun hasil pengukuran manual menggunakan kertas milimeter blok (cm^2)

Persentase kesalahan (error) untuk setiap sampel dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Error}(\%) = \frac{|L_{\text{digital}} - L_{\text{manual}}|}{L_{\text{manual}}} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan:

$\text{Error}(\%)$ = Persentase kesalahan untuk satu sampel (%)

L_{digital} = Luas daun hasil sistem (cm^2)

L_{manual} = Luas daun hasil pengukuran manual (cm^2)

$|L_{\text{digital}} - L_{\text{manual}}|$ = Selisih absolut antara kedua metode (cm^2)

Sedangkan tingkat akurasi per sampel dinyatakan sebagai:

$$\text{Akurasi}(\%) = 100\% - \text{Error}(\%) \quad (8)$$

Perhitungan tersebut memberikan gambaran ketelitian sistem pada masing-masing daun. Namun, untuk memperoleh evaluasi performa sistem secara menyeluruh terhadap seluruh sampel penelitian, digunakan pendekatan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). MAPE merepresentasikan rata-rata persentase kesalahan absolut antara hasil pengukuran digital dan hasil pengukuran manual pada seluruh data uji, yang dirumuskan sebagai:

$$\text{MAPE}(\%) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|L_{\text{digital},i} - L_{\text{manual},i}|}{L_{\text{manual},i}} \right) \times 100\% \quad (9)$$

Keterangan:

$\text{MAPE}(\%)$ = Rata-rata persentase kesalahan absolut seluruh sampel (%)

n = Jumlah total sampel daun

$L_{\text{digital},i}$ = Luas daun hasil sistem pada sampel ke- i (cm^2)

$L_{\text{manual},i}$ = Luas daun hasil pengukuran manual pada sampel ke- i (cm^2)

$\sum$ = Operasi penjumlahan seluruh sampel dari $i = 1$ hingga n

Nilai MAPE menunjukkan tingkat deviasi rata-rata sistem terhadap nilai acuan. Semakin rendah nilai MAPE, maka semakin besar kecocokan sistem dengan metode manual.

Tingkat akurasi keseluruhan sistem kemudian dihitung sebagai:

$$\text{Akurasi}_{\text{total}}(\%) = 100\% - \text{MAPE}(\%) \quad (10)$$

Melalui pendekatan ini, diperoleh evaluasi kuantitatif baik pada tingkat per-sampel maupun secara agregat. Kombinasi analisis error individu dan MAPE memungkinkan penilaian performa sistem yang lebih komprehensif, sehingga kesimpulan mengenai keandalan dan konsistensi sistem pengukuran luas daun berbasis citra digital dapat ditarik secara objektif dan ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Akuisisi dan Pra-pemrosesan Citra Daun

Akuisisi citra dilakukan secara real-time melalui pengambilan frame kontinu dengan resolusi asli tanpa proses resize, sehingga integritas spasial objek tetap terjaga. Jarak pengambilan citra yang konstan (10 cm) menghasilkan skala pengukuran yang stabil antar sampel. Penggunaan latar belakang polos dan pencahayaan relatif seragam terbukti mempermudah pemisahan objek pada tahap segmentasi. Hasil akuisisi citra daun dengan variasi kondisi objek ditunjukkan pada Gambar 4, Gambar 5, dan Gambar 6.



Gambar 4. Citra Daun Sempurna Hasil Akuisisi

Gambar 4 menunjukkan citra daun dengan kondisi utuh tanpa kerusakan atau lubang yang digunakan sebagai objek pengujian sistem.



Gambar 5. Citra Daun Berlubang Hasil Akuisisi

Gambar 5 menunjukkan citra daun dengan beberapa bagian berlubang akibat kerusakan alami pada permukaan daun.



Gambar 6. Citra Daun Rusak Hasil Akuisisi

Gambar 6 menunjukkan citra daun dengan bentuk tidak utuh dan kerusakan pada bagian tepi daun yang digunakan untuk menguji performa sistem pada objek kompleks.

Hasil konversi citra RGB ke *grayscale* menunjukkan bahwa struktur geometris daun tetap terjaga dengan baik meskipun informasi warna dieliminasi. Transformasi ini secara teknis menurunkan kompleksitas komputasi dari tiga kanal menjadi satu kanal intensitas, sehingga pemrosesan real-time menjadi lebih efisien.

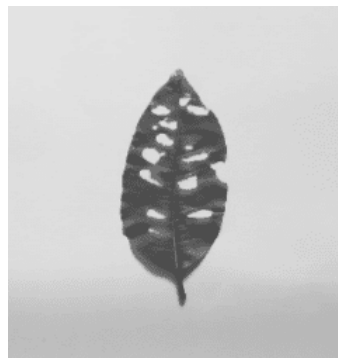
Penerapan *gaussian blur* dengan kernel 5×5 menghasilkan reduksi *noise* yang signifikan, khususnya pada tekstur halus permukaan daun dan gangguan intensitas kecil. Secara teknis, proses ini meningkatkan stabilitas thresholding dan mengurangi fragmentasi objek pada tahap segmentasi berikutnya. Tanpa *smoothing*, citra biner

cenderung menghasilkan *noise* kecil yang berpotensi menambah jumlah kontur tidak relevan dan memengaruhi akurasi estimasi luas. Hasil tahapan prapemrosesan citra ditunjukkan pada Gambar 7, Gambar 8, dan Gambar 9.



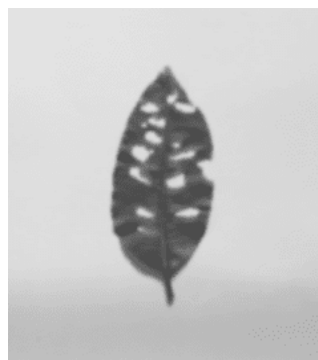
Gambar 7. Citra Daun Sebelum Prapemrosesan

Gambar 7 menunjukkan citra daun asli hasil akuisisi sebelum dilakukan proses pengolahan citra. Citra ini masih memiliki informasi warna RGB sebagai masukan awal sistem.



Gambar 8. Hasil Konversi Grayscale

Gambar 8 menunjukkan hasil konversi citra RGB menjadi grayscale untuk menyederhanakan informasi warna menjadi intensitas keabuan. Proses ini bertujuan mempermudah tahapan pengolahan citra berikutnya.



Gambar 9. Hasil Gaussian Blur

Gambar 9 menunjukkan hasil penerapan Gaussian blur untuk mengurangi noise dan memperhalus citra. Tahap ini membantu meningkatkan kestabilan proses segmentasi dan deteksi kontur.

Secara keseluruhan, tahap pra-pemrosesan meningkatkan kualitas citra masukan sehingga menjadi fondasi yang kuat bagi proses segmentasi, ekstraksi fitur, serta menjaga konsistensi dan kestabilan perhitungan luas dalam sistem real-time.

3.2 Hasil Segmentasi Citra dan Operasi Morfologi

Tahap segmentasi menghasilkan citra biner yang mampu memisahkan area daun dari latar belakang secara jelas sehingga objek direpresentasikan sebagai kumpulan piksel foreground yang terukur. Meskipun thresholding telah mempertahankan bentuk global daun, masih ditemukan *noise* kecil dan ketidakteraturan tepi. Penerapan operasi morfologi (*opening* dan *closing*) secara teknis mengurangi piksel terisolasi, memperhalus batas objek, serta menurunkan jumlah kontur tidak relevan, sehingga meningkatkan kestabilan deteksi kontur utama dan konsistensi perhitungan luas daun pada tahap selanjutnya. Hasil segmentasi citra dan penerapan operasi morfologi ditunjukkan pada Gambar 10 dan Gambar 11.



Gambar 10. Hasil Segmentasi Citra Biner

Gambar 10 menunjukkan hasil segmentasi menggunakan metode thresholding untuk memisahkan objek daun dari latar belakang. Proses ini menghasilkan citra biner yang digunakan pada tahap pengolahan berikutnya.



Gambar 11. Hasil Operasi Morfologi

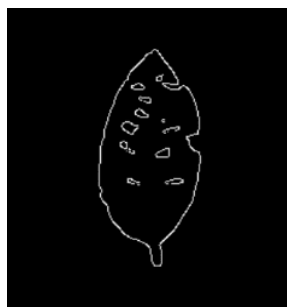
Gambar 11 menunjukkan hasil penerapan operasi morfologi pada citra biner untuk memperbaiki bentuk objek daun. Tahap ini bertujuan mengurangi noise serta memperjelas area dan kontur objek.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi thresholding dan operasi morfologi menghasilkan objek yang lebih bersih dan meningkatkan ketelitian estimasi luas daun.

3.3 Hasil Deteksi Tepi dan Deteksi Kontur

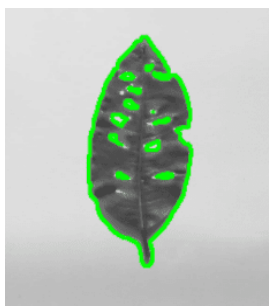
Pada penelitian ini, algoritma Canny (cv2.Canny) digunakan sebagai visualisasi batas objek untuk menampilkan struktur tepi daun secara lebih jelas pada antarmuka sistem. Hasil deteksi tepi menunjukkan bahwa batas morfologi daun, termasuk lekukan dan area berlubang, dapat teridentifikasi secara visual dengan baik. Namun, citra hasil Canny tidak digunakan secara langsung dalam perhitungan luas.

Proses perhitungan luas dilakukan berdasarkan deteksi kontur dari citra biner hasil segmentasi menggunakan cv2.findContours. Kontur eksternal merepresentasikan batas terluar daun, sedangkan kontur internal mengidentifikasi area lubang yang dikurangkan dari luas total. Secara teknis, pendekatan ini memastikan bahwa estimasi luas berbasis piksel dilakukan pada region objek yang telah tersegmentasi secara stabil dalam sistem real-time. Hasil deteksi tepi dan deteksi kontur objek daun ditunjukkan pada Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Hasil Deteksi Tepi Canny

Gambar 12 menunjukkan hasil deteksi tepi menggunakan metode Canny untuk mengidentifikasi batas objek daun secara lebih jelas. Proses ini membantu sistem memperoleh struktur tepi objek sebelum tahap deteksi kontur dilakukan.



Gambar 13. Hasil Deteksi Kontur

Gambar 13 menunjukkan hasil deteksi kontur pada objek daun berdasarkan citra hasil segmentasi. Kontur yang diperoleh digunakan untuk menghitung luas daun berbasis piksel secara otomatis.

3.4 Hasil Perhitungan Luas Daun Digital

Perhitungan luas daun digital dilakukan menggunakan Python dengan library *OpenCV* untuk pengolahan citra secara real-time. Pada tahap akuisisi, kamera smartphone dimanfaatkan sebagai perangkat penangkap citra yang dihubungkan ke laptop melalui aplikasi DroidCam sehingga berfungsi sebagai kamera eksternal pada sistem pemrosesan.

Proses koneksi dilakukan dengan memastikan smartphone dan laptop terhubung pada jaringan Wi-Fi yang sama, kemudian alamat IP dari aplikasi DroidCam pada smartphone dimasukkan ke DroidCam Client di laptop hingga kamera terhubung. Setelah program Python dijalankan, sistem menampilkan keluaran real-time berupa Preprocessing citra, segmentasi, deteksi tepi dan kontur, serta jendela kamera untuk kalibrasi dan akuisisi daun. Kalibrasi dilakukan menggunakan penggaris dengan menekan tombol “C” untuk memperoleh faktor konversi piksel ke satuan panjang, selanjutnya daun diambil untuk dihitung luasnya dalam piksel dan dikonversi ke cm². Tombol “S” digunakan untuk mengunci hasil, “R” untuk mereset, dan “Q” untuk keluar, sedangkan hasil pengukuran luas daun digital disajikan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Luas Daun Digital

No.	Kategori Daun	Jarak (cm)	Luas Daun (piksel)	Luas Daun (cm ²)
1.	DaunSempurna1	10 cm	163280 px	45,34 cm ²
2.	DaunSempurna7	10 cm	68153 px	18,93 cm ²
3.	DaunSempurna11	10 cm	71009 px	19,72 cm ²
4.	DaunBerlubang3	10 cm	110898 px	30,80 cm ²
5.	DaunBerlubang8	10 cm	42829 px	11,89 cm ²
6.	DaunBerlubang15	10 cm	70465 px	19,57 cm ²
7.	DaunRusak2	10 cm	134874 px	37,46 cm ²
8.	DaunRusak9	10 cm	69321 px	19,25 cm ²
9.	DaunRusak11	10 cm	32125 px	8,92 cm ²

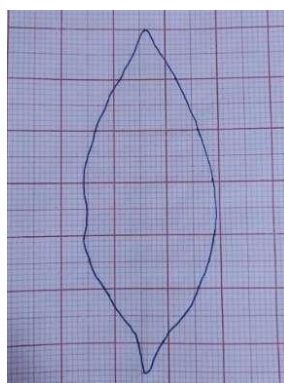
No.	Kategori Daun	Jarak (cm)	Luas Daun (piksel)	Luas Daun (cm ²)
10.	DaunRusak12	10 cm	45192 px	12,55 cm ²
...	...	...	...	...
50.	DaunRusak15	10 cm	50745 px	14,09 cm ²

Tabel 1 menunjukkan hasil perhitungan luas daun digital berdasarkan pengolahan citra pada setiap sampel daun. Nilai luas daun dalam piksel diperoleh dari hasil deteksi kontur objek menggunakan OpenCV, kemudian dikonversi ke satuan cm² melalui proses kalibrasi berdasarkan jarak akuisisi citra sebesar 10 cm.

3.5 Perhitungan luas Daun Manual

Perhitungan luas daun dengan metode manual dilakukan menggunakan metode milimeter blok. Metode ini dilakukan dengan cara memplot daun pada kertas milimeter blok [6]. Secara teknis, daun terlebih dahulu diletakkan di atas kertas milimeter blok, kemudian tepi daun dijiplak mengikuti kontur bentuk daun secara hati-hati agar bentuk yang diperoleh mendekati bentuk aslinya.

Selanjutnya, luas daun dihitung dengan menjumlahkan kotak pada kertas milimeter blok di dalam batas jiplakan daun. Kotak besar berukuran 1 cm × 1 cm (1 cm²) yang terisi penuh dihitung langsung, sedangkan bagian tepi yang tidak penuh dihitung menggunakan kotak kecil berukuran 1 mm × 1 mm, kemudian dikonversi ke cm² (100 kotak kecil = 1 cm²). Pada daun yang memiliki lubang, area berlubang tidak ikut dihitung karena bukan merupakan bagian dari permukaan daun. Dengan demikian, luas total daun diperoleh dari penjumlahan luas kotak besar penuh dan akumulasi kotak kecil pada bagian tepi yang benar-benar termasuk area daun. Perhitungan luas daun secara manual yang dilakukan dengan menggunakan kertas milimeter blok dapat dilihat pada Gambar 14 berikut.



Gambar 14. Perhitungan luas daun secara manual yang dilakukan menggunakan kertas milimeter blok

Gambar 14 menunjukkan proses pengukuran luas daun secara manual menggunakan kertas milimeter blok sebagai data pembanding. Metode ini digunakan untuk membandingkan hasil perhitungan sistem dengan luas daun aktual.

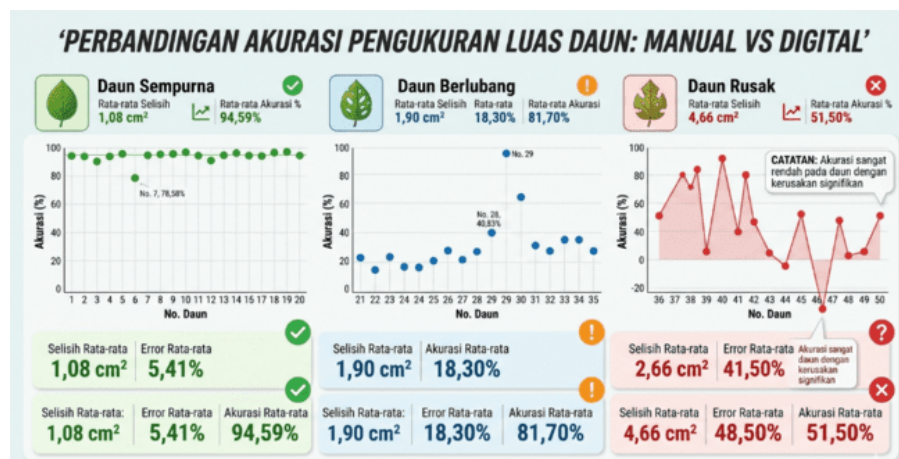
Metode perhitungan luas daun secara manual ini relatif mudah dipahami dan praktis apabila digunakan pada jumlah sampel yang sedikit. Namun, metode ini menjadi kurang efisien karena memerlukan waktu yang lebih lama ketika diterapkan pada jumlah sampel yang banyak [6]. Dilakukannya perhitungan luas daun manual untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian serta akurasi hasil pengukuran yang diperoleh dari metode manual dan metode digital. Hasil perbandingan tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Perbandingan Luas Daun Metode Manual dan Digital

No.	Kategori Daun	Luas Daun Manual (cm ²)	Luas Daun Digital (cm ²)	Jarak (cm)	Selisih	Error (%)	Akurasi (%)
1.	DaunSempurna1	45,75 cm ²	45,34 cm ²	10 cm	0,41	0,90%	99,10%
2.	DaunSempurna7	15,59 cm ²	18,93 cm ²	10 cm	3,34	21,42%	78,58%
3.	DaunSempurna11	19,98 cm ²	19,72 cm ²	10 cm	0,26	1,30%	98,70%
4.	DaunBerlubang3	30,79 cm ²	30,80 cm ²	10 cm	0,01	0,03%	99,97%
5.	DaunBerlubang8	7,47 cm ²	11,89 cm ²	10 cm	4,42	59,17%	40,83%
6.	DaunBerlubang15	18,29 cm ²	19,57 cm ²	10 cm	1,28	7,00%	93,00%
7.	DaunRusak2	37,73 cm ²	37,46 cm ²	10 cm	0,27	0,72%	99,28%
8.	DaunRusak9	7,6 cm ²	19,25 cm ²	10 cm	11,65	153,29%	-53,29%

No.	Kategori Daun	Luas Daun Manual (cm ²)	Luas Daun Digital (cm ²)	Jarak (cm)	Selisih	Error (%)	Akurasi (%)
9.	DaunRusak11	4,12 cm ²	8,92 cm ²	10 cm	4,80	116,50%	-16,50%
10.	DaunRusak15	13,37 cm ²	14,09 cm ²	10 cm	0,72	5,39%	94,61%
...	...	...	...	...	...	...	...
50.	DaunRusak50	13,37 cm ²	14,09 cm ²	10 cm	0,72	5,39%	94,61%
Rata-rata Daun Sempurna:					1,08	5,41 %	94,59 %
Rata-rata Daun Berlubang:					1,90	18,30 %	81,70 %
Rata-rata Daun Rusak:					4,66	48,50 %	51,50 %

Tabel 2 menunjukkan hasil perbandingan pengukuran luas daun secara manual dan digital pada setiap sampel daun. Nilai luas daun manual diperoleh melalui pengukuran menggunakan kertas milimeter blok, sedangkan luas daun digital diperoleh dari hasil perhitungan sistem berbasis pengolahan citra digital. Data selisih, error, dan akurasi dihitung berdasarkan perbandingan antara kedua metode pengukuran tersebut. Grafik hasil pengukuran dan perbandingan luas daun berdasarkan data pada tabel yang ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 15. Grafik Perbandingan Luas Daun Aktual dan Hasil Sistem Pengukuran

Berdasarkan Gambar 15 selisih error antara hasil perhitungan luas daun digital dan manual menunjukkan bahwa akurasi metode digital relatif efektif pada kategori daun sempurna dan sebagian besar daun berlubang, yang ditandai dengan nilai error yang rendah. Namun, pada kategori daun rusak masih ditemukan error yang lebih besar. Hal ini diduga karena sistem digital menghitung luas berdasarkan algoritma yang konsisten sesuai parameter yang ditetapkan, sedangkan metode manual masih rentan terhadap *noise* akibat kesalahan manusia, terutama ketika menghitung daun yang rusak dengan tepi tidak beraturan sehingga proses penelusuran kontur daun dan penghitungan menjadi lebih sulit serta kurang presisi.

3.6 Validasi dan Evaluasi Hasil

Tahap validasi dan evaluasi dilakukan untuk menilai tingkat ketelitian sistem dalam mengukur luas daun berbasis pengolahan citra digital dengan membandingkan hasil pengukuran digital terhadap metode manual sebagai nilai acuan (*ground truth*). Evaluasi dilakukan menggunakan parameter selisih absolut, persentase error, akurasi, serta Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Perhitungan MAPE dilakukan pada masing-masing kategori daun untuk mengetahui performa sistem pada setiap kondisi objek, kemudian direkap untuk memperoleh akurasi sistem secara keseluruhan. Hasil analisis kinerja sistem dibuktikan melalui perhitungan pada bagian berikut.

Perhitungan Keseluruhan:

$$n_{total} = 20 + 15 + 15 = 50$$

Perhitungan tersebut menunjukkan jumlah keseluruhan sampel daun yang digunakan dalam proses pengujian sistem. Total sampel terdiri atas daun sempurna, daun berlubang, dan daun rusak.

Jumlah Seluru Error (Semua Kategori):

$$\sum Error_{total} = 108,21 + 274,49 + 727,49 = 1.110,19\%$$

Nilai total error diperoleh dari akumulasi seluruh nilai error pada masing-masing kategori daun yang diuji, yaitu daun sempurna, daun berlubang, dan daun rusak. Perhitungan ini digunakan untuk mengevaluasi performa sistem secara keseluruhan berdasarkan hasil pengukuran luas daun.

MAPE Keseluruhan:

$$MAPE_{total} = \frac{1.110,19}{50} = 22,20\%$$

Perhitungan MAPE digunakan untuk mengetahui rata-rata persentase kesalahan sistem terhadap hasil pengukuran luas daun aktual.

Akurasi Sistem:

$$Akurasi_{total} = 100\% - 22,20\% = 77,80\%$$

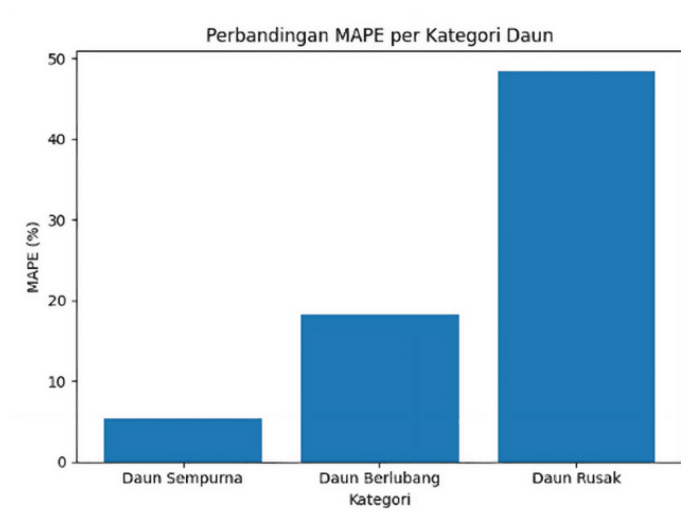
Perhitungan akurasi dilakukan untuk mengetahui tingkat ketepatan sistem dalam mengukur luas daun dibandingkan metode manual. Nilai tersebut menunjukkan hasil akhir akurasi sistem secara keseluruhan.

Nilai MAPE keseluruhan sebesar 22,20% menunjukkan bahwa rata-rata deviasi sistem terhadap metode manual berada pada tingkat yang masih dapat diterima. Berdasarkan nilai tersebut, tingkat akurasi sistem secara agregat mencapai 77,80%. Rincian nilai MAPE dan akurasi untuk masing-masing kategori daun dapat dilihat pada Tabel 3.

Table 3. Rekapitulasi Nilai MAPE dan Akurasi Sistem per Kategori Daun

Kategori	MAPE	Akurasi
Daun sempurna	5,41%	94,59%
Daun berlubang	18,30%	81,70%
Daun rusak	48,50%	51,50%
Keseluruhan	22,20%	77,80%

Berdasarkan Tabel 3, sistem menunjukkan performa terbaik pada daun sempurna (MAPE 5,41%; akurasi 94,59%), menurun pada daun berlubang (MAPE 18,30%; akurasi 81,70%), dan terendah pada daun rusak (MAPE 48,50%; akurasi 51,50%). Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan kompleksitas morfologi daun berbanding lurus dengan meningkatnya tingkat kesalahan estimasi luas. Hasil perbandingan nilai MAPE pada setiap kategori daun ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar 16. Perbandingan MAPE per Kategori Daun

Gambar 16 memperjelas perbedaan tingkat kesalahan antar kategori daun. Terlihat bahwa peningkatan kompleksitas morfologi objek berbanding lurus dengan peningkatan nilai MAPE. Hal ini menunjukkan bahwa performa sistem sangat dipengaruhi oleh struktur kontur daun, khususnya pada daun yang mengalami kerusakan atau memiliki bentuk tidak beraturan.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem pengukuran luas daun berbasis pengolahan citra digital mampu bekerja dengan tingkat ketelitian yang baik, dengan nilai MAPE keseluruhan sebesar 22,20% dan akurasi sistem mencapai 77,80%. Performa terbaik diperoleh pada kategori daun sempurna dengan akurasi 94,59%, diikuti daun berlubang sebesar 81,70%, sedangkan kategori daun rusak menunjukkan akurasi terendah sebesar 51,50%. Hasil ini mengindikasikan bahwa kompleksitas morfologi dan ketidakteraturan kontur daun berpengaruh signifikan terhadap tingkat kesalahan estimasi, sehingga metode yang diusulkan efektif untuk objek dengan bentuk relatif utuh, namun memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi pada objek yang mengalami kerusakan atau deformasi.

REFERENSI

- [1] D. Wijaya, R. Septiandi, Y. H. Wardhani, E. Nugraha, K. Anisya, and Z. R. Aprilliya, "IMPLEMENTASI MORFOLOGI CITRA UNTUK STUDI KASUS EROSI DAN DILASI SEDERHANA MENGGUNAKAN SOFTWARE UNITY," Bangka Belitung, Dec. 2024.
- [2] T. Hidayat, "IDENTIFIKASI MORFOLOGI CITRA DAGING MENGGUNAKAN TEKNIK PENGOLAHAN CITRA DIGITAL," 2025, Feb. 2025.
- [3] Ardi Wijaya, B. R. Daryono, Rozali Toyib, and Yovi Apridiansyah, "Analisis Pengenalan Pola Pada Citra Digital Untuk Prediksi Berat Buah Sawit," *Decode: Jurnal Pendidikan Teknologi Informasi*, vol. 4, no. 3, pp. 713–724, Jul. 2024, doi: 10.51454/decode.v4i3.481.
- [4] J. Jumadi, Yupianti, and D. Sartika, "PENGOLAHAN CITRA DIGITAL UNTUK IDENTIFIKASI OBJEK MENGGUNAKAN METODE HIERARCHICAL AGGLOMERATIVE CLUSTERING," *Jurnal Sains dan Teknologi*, vol. 10, 2021.
- [5] C. Umam, S. A. Putri, J. Milyani, S. K. Aurelita, S. Suryawati, and Y. Purwaningsih, "Perhitungan Luas Daun Berbasis Pemrosesan Citra Digital," *TEKNOTAN*, vol. 17, no. 2, p. 115, Aug. 2023, doi: 10.24198/jt.vol17n2.5.
- [6] R. Andrian, A. Junaidi, and D. Indah Lestari, "APLIKASI PENGUKURAN LUAS DAUN TANAMAN MENGGUNAKAN PENGOLAHAN CITRA DIGITAL BERBASIS ANDROID Application of Measuring Plant Leaf Area Using Android-Based Digital Image Processing," 2022.
- [7] K. Aqla, M. Zidan Rakhmatullah, M. Yusuf Efendi, and Alimin, "KLASIFIKASI KUALITAS DAUN SEHAT DAN TIDAK SEHAT PADA TANAMAN JAGUNG DENGAN MENGGUNAKAN METODE MORFOLOGI GRADIEN DI PYTHON," *Jurnal Sistem Informasi Aplikasi Teknologi Informasi*, vol. 1, Apr. 2024, doi: 10.53567/josiati.v1i2.15.
- [8] S. A. Nasution, D. Lestari, D. P. Azzahra, and D. Kiswanto, "Deteksi Jenis Tanaman Berdasarkan Bentuk Daun Menggunakan KNN," *SIMKOM*, vol. 10, no. 1, pp. 31–38, Jan. 2025, doi: 10.51717/simkom.v10i1.646.
- [9] I. Ibrahim, "Pengukuran Luas Daun Berbasis Citra Digital Menggunakan ImageJ dengan Validasi Metode Kertas Milimeter," 2026.
- [10] F. Mushaf Al Ramadhani, R. Amin, A. Lutfiana, and P. Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Pekalongan, "METODE PENGUKURAN LUAS DAUN TANAMAN MENGGUNAKAN BANTUAN OBJEK TUNTUN BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL PLANT LEAF AREA MEASUREMENT METHOD USING TUNTUN OBJECT BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING," *Jurnal Pertanian Agros*, vol. 26, no. 4, 2024.
- [11] J. Khatib Sulaiman, R. Devita, and U. Putra Indonesia, "Analisis Perbandingan Kernel Morfologi Citra Otak Ditinjau dari Nilai PSNR," *Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 13, May 2024.
- [12] A. Hasan *et al.*, "Morphometric Analysis of Chili Leaves with Yellow Curly Symptom Using Digital Image Processing Approach and Data Mining Algorithm," *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, vol. 19, no. 6, pp. 231–237, Nov. 2023, doi: 10.14692/jfi.19.6.231-237.

- [13] D. M. J. Musdar, N. S. Eriyani, S. Azis, A. B. Kaswar, and S. Sasmita, "IMPLEMENTASI JARINGAN SARAF TIRUAN BACKPROPAGATION UNTUK KLASIFIKASI TINGKAT KESEGERAN WORTEL BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL DISERTAI OPERASI MORFOLOGI," *JIPi (Jurnal Ilmiah Penelitian dan Pembelajaran Informatika)*, vol. 9, no. 3, pp. 1518–1533, Aug. 2024, doi: 10.29100/jipi.v9i3.5672.
- [14] A. Wijaya, R. Toyib, R. Kontesa, and S. H. Wibowo, "ANALISIS CITRA DIGITAL MENGGUNAKAN MORFOLOGI OPENING UNTUK MENGUKUR TINGGI BADAN MANUSIA BERDASARKAN FOTO," Bengkulu, Sep. 2024.
- [15] A. I. Sudianto and A. Husna, "Application of digital image processing to the measurement of Leaf Area Index (LAI) of rice plants (*Oryza Sativa* L.)," *Jurnal SimanteC*, vol. 13, no. 2, Jun. 2025.
- [16] Y. Li *et al.*, "A Rice Leaf Area Index Monitoring Method Based on the Fusion of Data from RGB Camera and Multi-Spectral Camera on an Inspection Robot," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 16, no. 24, Dec. 2024, doi: 10.3390/rs16244725.
- [17] N. Yamaguchi, H. Okumura, O. Fukuda, W. L. Yeoh, and M. Tanaka, "Estimating Tomato Plant Leaf Area Using Multiple Images from Different Viewing Angles," *Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics*, vol. 28, no. 2, pp. 352–360, Mar. 2024, doi: 10.20965/jaciii.2024.p0352.
- [18] Yovi Apriansyah, Rozali Toyib, and Ardi Wijaya, "Metode Otsu dan Mathematical Morphology Dalam Segmentasi Region Karakter Plat Nomor Kendaraan," *Journal of Applied Computer Science and Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 134–143, Jun. 2022, doi: 10.52158/jacost.v3i1.277.
- [19] Z. Zulfachmi, Muhammad Rizky Fatahillah, and Samuel Belman Silalahi, "Analisis Keretakan Permukaan Jalan Menggunakan Fitur Thresholding, Median Filter, dan Teknik Morfologi," *Jurnal Bangkit Indonesia*, vol. 13, no. 1, pp. 33–39, Mar. 2024, doi: 10.52771/bangkitindonesia.v13i1.277.
- [20] I. Ruslianto, U. Ristian, J. Rekayasa Sistem Komputer, and F. H. MIPA Universitas Tanjungpura Jalan Hadari Nawawi Pontianak, "IMPLEMENTASI PERHITUNGAN KENDARAAN MOBIL DI JALAN RAYA MENGGUNAKAN METODE BACKGROUND SUBTRACTION DAN TEKNIK MORFOLOGI CITRA," 2021.
- [21] A. Septiarini, R. Saputra, A. Tejawati, and M. Wati, "Deteksi Sarung Samarinda Menggunakan Metode Naive Bayes Berbasis Pengolahan Citra," *Jurnal RESTI*, vol. 5, no. 5, pp. 927–935, Oct. 2021, doi: 10.29207/resti.v5i5.3435.
- [22] M. Gusti Tri Ananda, W. Pardosi, and A. Maysari Br Sembiring, "Literatur Review: Metode Thresholding Untuk Mengidentifikasi Penyakit Pada Daun Bawang Merah," 2024.
- [23] A. Herdiansah, R. I. Borman, D. Nurnaningsih, A. A. J. Sinlae, and R. R. Al Hakim, "Klasifikasi Citra Daun Herbal Dengan Menggunakan Backpropagation Neural Networks Berdasarkan Ekstraksi Ciri Bentuk," *JURIKOM (Jurnal Riset Komputer)*, vol. 9, no. 2, p. 388, Apr. 2022, doi: 10.30865/jurikom.v9i2.4066.
- [24] Y. Riwanto, I. Yanuar, R. Pratiwi, and M. A. Fikri, "JIP (Jurnal Informatika Polinema) Halaman| 371 Segmentasi Citra Menggunakan Pendekatan Trial and Error dan Metode Otsu untuk Identifikasi Objek".
- [25] Z. A. Mustopa, F. Mushaf, A. Ramadhani, and U. Badrudin, "IDENTIFIKASI NILAI KONSTANTA DAUN TANAMAN ALPUKAT DAN MANGGIS BERBASIS PENGOLAHAN CITRA DIGITAL IDENTIFICATION OF LEAF CONSTANT VALUES OF AVOCADO AND MANGOSTEEN PLANTS BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING," *Jurnal Pertanian Agros*, vol. 27, no. 3, 2025.