

## Pengukuran Luas Daun Berbasis Citra Digital Menggunakan ImageJ dengan Validasi Metode Kertas Milimeter

**Ichsan Ibrahim**

Program Studi Teknik Informatika, STMIK IM,  
Jalan Belitung No.7 Bandung, Indonesia  
Email: [ichsanibrahim@stmik-im.ac.id](mailto:ichsanibrahim@stmik-im.ac.id)

### ABSTRAK

Pengukuran luas daun merupakan salah satu tahapan penting dalam analisis pertumbuhan tanaman, fisiologi tanaman, kapasitas fotosintesis, indeks luas daun, serta evaluasi respons tanaman terhadap kondisi lingkungan. Metode manual berbasis kertas milimeter relatif mudah diterapkan, tetapi membutuhkan waktu yang cukup lama, bergantung pada ketelitian operator, dan kurang efisien apabila jumlah sampel meningkat. Penelitian ini bertujuan menerapkan ImageJ untuk mengukur luas daun berbasis citra digital, menyusun kerangka operasional pengolahan citra yang mudah direplikasi, serta mengevaluasi kesesuaian hasilnya terhadap metode kertas milimeter. Akuisisi citra dilakukan menggunakan kamera utama telepon pintar berbasis Android dengan resolusi nominal 16 megapiksel. Daun diletakkan pada latar belakang karton hitam doff bersama penggaris sebagai acuan ukuran. Pengambilan citra dilakukan di dalam ruangan tanpa menggunakan lampu LED tambahan atau perangkat pencahayaan khusus. Sumber cahaya berasal dari lampu ruangan yang tersedia. Pengolahan citra meliputi kalibrasi skala, konversi citra RGB menjadi grayscale 8-bit, peningkatan kontras, median filtering, *thresholding*, segmentasi objek, dan pengukuran area dalam satuan  $\text{cm}^2$ . Validasi dilakukan terhadap 40 sampel daun. Rata-rata luas daun berdasarkan ImageJ sebesar  $62,9163 \text{ cm}^2$ , sedangkan rata-rata luas berdasarkan kertas milimeter sebesar  $62,5940 \text{ cm}^2$ . Bias rata-rata sebesar  $0,3222 \text{ cm}^2$  menunjukkan bahwa hasil ImageJ cenderung sedikit lebih tinggi daripada metode pembandingan. Nilai Mean Absolute Percentage Error sebesar  $1,9382\%$  dan koefisien determinasi sebesar  $0,8928$  menunjukkan bahwa kedua metode memiliki kesesuaian praktis yang baik pada kondisi pengukuran ini. ImageJ dapat digunakan sebagai alternatif yang murah, transparan, dan mudah diterapkan untuk pengukuran luas daun pada penelitian sederhana dan kegiatan praktikum. Konsistensi hasil tetap dipengaruhi oleh kualitas citra, posisi kamera, kondisi pencahayaan ruangan, kontras latar belakang, kalibrasi skala, serta parameter segmentasi.

**Kata kunci:** ImageJ, kertas milimeter, luas daun, pengolahan citra digital, segmentasi citra

### ABSTRACT

*Leaf area measurement is an important step in the analysis of plant growth, plant physiology, photosynthetic capacity, leaf area index, and plant responses to environmental conditions. The manual method using millimeter-grid paper is relatively easy to apply; however, it is time-consuming, highly dependent on operator accuracy, and less efficient when the number of samples increases. This study aimed to apply ImageJ for digital image-based leaf area measurement, develop an easily replicable*

*image-processing workflow, and evaluate the agreement between the ImageJ results and those obtained using the millimeter-grid paper method. Images were acquired using the main camera of an Android-based smartphone with a nominal resolution of 16 megapixels. Each leaf was placed on a matte black cardboard background alongside a ruler as a scale reference. Image acquisition was conducted indoors without additional LED lighting or specialized illumination devices. The available room lighting served as the sole light source. The image-processing procedure included scale calibration, conversion of RGB images to 8-bit grayscale, contrast enhancement, median filtering, thresholding, object segmentation, and area measurement in  $\text{cm}^2$ . Validation was performed using 40 leaf samples. The mean leaf area measured using ImageJ was  $62.9163 \text{ cm}^2$ , whereas the mean value obtained using millimeter-grid paper was  $62.5940 \text{ cm}^2$ . A mean bias of  $0.3222 \text{ cm}^2$  indicated that ImageJ tended to produce slightly higher measurements than the reference method. The Mean Absolute Percentage Error of 1.9382% and the coefficient of determination of 0.8928 indicated good practical agreement between the two methods under the measurement conditions applied in this study. ImageJ can therefore be used as an affordable, transparent, and accessible alternative for leaf area measurement in small-scale research and laboratory practical activities. Nevertheless, measurement consistency remains influenced by image quality, camera position, indoor lighting conditions, background contrast, scale calibration, and segmentation parameters.*

*Keywords: digital image processing, ImageJ, image segmentation, leaf area, millimeter-grid paper*

## **1. PENDAHULUAN**

Daun merupakan organ utama tanaman yang berperan dalam fotosintesis, transpirasi, respirasi, dan pertukaran gas. Luas daun menjadi salah satu indikator morfologi yang banyak digunakan untuk memahami laju pertumbuhan tanaman, kapasitas intersepsi cahaya, pembentukan biomassa, dan respons tanaman terhadap faktor lingkungan. Dalam agronomi dan fisiologi tanaman, data luas daun juga berhubungan dengan estimasi indeks luas daun, efisiensi penggunaan air, evaluasi cekaman, serta penilaian produktivitas tanaman. Pemantauan indeks luas daun juga dapat dilakukan melalui citra UAV (Qiao et al., 2024). Oleh karena itu, metode pengukuran luas daun yang cepat, murah, akurat, dan mudah direplikasi tetap diperlukan, terutama dalam kegiatan penelitian, praktikum, dan pengamatan tanaman dengan jumlah sampel relatif banyak.

Pengukuran luas daun secara konvensional dapat dilakukan menggunakan kertas milimeter, metode gravimetri, planimeter, pendekatan panjang dikalikan lebar dengan faktor koreksi, dan metode fotografi. Metode kertas milimeter banyak digunakan karena sederhana, tidak membutuhkan perangkat khusus, dan mudah dipahami oleh pengguna

pemula. Akan tetapi, metode ini memiliki keterbatasan berupa waktu pengerjaan yang relatif lama, subjektivitas dalam menafsirkan kotak yang tertutup sebagian, serta potensi kesalahan pencatatan apabila jumlah sampel besar. Metode gravimetri dan planimeter dapat membantu pengukuran bentuk daun tidak beraturan, tetapi tetap membutuhkan prosedur tambahan atau peralatan khusus. Sementara itu, pendekatan panjang-lebar lebih cepat, tetapi akurasi sangat ditentukan oleh bentuk daun dan ketepatan faktor koreksi untuk spesies tertentu (Bambang et al., 2008; Guswanto, 2009).

Perkembangan pengolahan citra digital memberikan alternatif yang lebih efisien untuk pengukuran luas daun. Pada pendekatan berbasis citra, daun dipotret atau dipindai bersama objek acuan ukuran, kemudian citra dikalibrasi agar jumlah piksel dapat dikonversi menjadi satuan fisik. Setelah objek daun dipisahkan dari latar belakang melalui segmentasi, luas daun dihitung berdasarkan jumlah piksel objek yang terdeteksi. Pendekatan ini memungkinkan dokumentasi data yang lebih baik karena citra dapat disimpan, diperiksa ulang, dan dianalisis kembali dengan parameter yang sama. Pengukuran digital juga membuka peluang untuk mengekstraksi parameter morfologi tambahan seperti perimeter, circularity, Feret diameter, aspect ratio, dan indikator bentuk lain yang sulit dihitung secara manual. Beberapa pendekatan berbasis perangkat lunak lain juga telah dikembangkan, seperti *Easy Leaf Area* (Easlon & Bloom, 2014), paket pliman dalam R (Olivoto, 2022), serta metode *deep learning* (Maraveas, 2024).

ImageJ merupakan perangkat lunak analisis citra ilmiah yang bersifat terbuka dan telah lama digunakan dalam berbagai bidang riset. ImageJ menyediakan fitur kalibrasi skala, *thresholding*, pengukuran area, dan analisis partikel yang relevan untuk pengukuran luas objek dua dimensi (Schneider et al., 2012; Schroeder et al., 2021). Ketersediaan fitur macro, plugin, dan pembaruan versi membuat ImageJ tetap relevan untuk pengolahan citra ilmiah (ImageJ, 2026). Dalam konteks pengukuran luas daun, pengguna dapat menempatkan objek acuan ukuran pada bidang yang sama dengan daun, menetapkan skala piksel per satuan panjang, melakukan segmentasi daun dari latar belakang, dan memperoleh luas objek dalam satuan  $\text{cm}^2$ .

Studi mutakhir menunjukkan bahwa pendekatan berbasis citra semakin dominan dalam fenotiping tanaman dan pengukuran area organ tanaman. (Li et al., 2023) mengembangkan metode pemantauan luas daun *Brassica napus* secara nondestruktif berbasis pengolahan citra dan *deep learning*. (Koyama, 2023) menunjukkan bahwa

pemotretan daun dengan prosedur akuisisi yang terkontrol dapat digunakan untuk estimasi luas daun. (Velasquez-Vasconez & Andrade Díaz, 2024) mengembangkan paket *LeafArea* untuk estimasi luas daun beberapa spesies buah Andean berbasis model statistik dan *machine learning*. (Sudianto & Husna, 2025) membandingkan pengukuran indeks luas daun berbasis pengolahan citra dengan metode kertas milimeter dan menunjukkan bahwa metode digital dapat mengurangi waktu pengukuran. (Suarez et al., 2025) juga menunjukkan potensi otomatisasi pengukuran luas daun jeruk dari citra hasil pemindaian menggunakan pemrosesan citra berbasis Python. Selain itu, penelitian berbasis segmentasi mendalam seperti (Zhang et al., 2025) menunjukkan bahwa estimasi luas daun dapat diarahkan menuju sistem *high throughput*, meskipun pendekatan tersebut membutuhkan data latih, perangkat komputasi, dan tahapan implementasi yang lebih kompleks dibandingkan ImageJ.

Berdasarkan perkembangan tersebut, ImageJ tetap relevan sebagai solusi antara metode manual dan sistem otomatis berbasis kecerdasan buatan. ImageJ lebih mudah diterapkan di lingkungan pendidikan dan laboratorium dengan sumber daya terbatas karena tidak memerlukan pelatihan model, biaya lisensi, atau perangkat khusus yang mahal. Agar penggunaan ImageJ dapat dinilai sebagai metode penelitian yang replikatif, diperlukan rancangan pengukuran yang menyajikan kerangka operasional secara rinci, validasi kuantitatif terhadap metode pembanding, pelaporan parameter pengolahan citra, evaluasi error, serta pembahasan keterbatasan metode.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dirancang sebagai studi pengukuran luas daun berbasis ImageJ yang memadukan demonstrasi operasional pada citra contoh dan validasi kuantitatif terhadap metode kertas milimeter menggunakan 40 sampel daun. Rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana menerapkan ImageJ untuk mengukur luas daun berbasis citra digital, seberapa besar perbedaan hasil ImageJ terhadap metode kertas milimeter, serta apakah tingkat error yang diperoleh masih dapat diterima untuk penggunaan praktis. Tujuan penelitian adalah menjelaskan prosedur kalibrasi dan segmentasi citra pada ImageJ, membandingkan hasil pengukuran ImageJ dengan kertas milimeter, menghitung MAE, MAPE, RMSE, koefisien determinasi, dan plot kesesuaian metode, serta mengevaluasi kelayakan ImageJ sebagai alternatif pengukuran luas daun yang praktis dan replikatif.

## 2. METODE

### Desain Penelitian dan Objek Pengukuran

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental berbasis pengolahan citra digital. Objek penelitian terdiri atas dua bagian yang saling melengkapi, yaitu citra contoh daun untuk menjelaskan tahap operasional ImageJ dan 40 sampel daun dengan variasi ukuran yang diberi kode D01 sampai D40 untuk validasi kuantitatif. Setiap sampel validasi diukur menggunakan dua metode, yaitu ImageJ sebagai metode uji berbasis citra digital dan kertas milimeter sebagai metode pembandingan manual.

Pemilihan kertas milimeter sebagai pembandingan didasarkan pada kemudahan verifikasi dan kesesuaiannya untuk validasi awal pada penelitian dengan sumber daya terbatas. Metode ini tidak diposisikan sebagai standar absolut, tetapi sebagai metode referensi praktis yang umum digunakan dalam pembelajaran dan pengukuran manual luas daun. Ketepatan dan kecepatan pengukuran menjadi dua aspek yang diperhatikan karena luas daun digunakan dalam analisis pertumbuhan, indeks luas daun, dan penilaian respons tanaman terhadap lingkungan.

### Prinsip Pengukuran Luas Daun

Pengukuran luas daun dapat dilakukan secara destruktif maupun nondestruktif. Pengukuran destruktif dilakukan dengan memetik daun agar dapat ditempatkan pada bidang ukur, sedangkan pendekatan nondestruktif dilakukan melalui pengambilan citra atau pengukuran langsung tanpa mencabut daun dari tanaman. Dalam konteks praktikum dan penelitian sederhana, pemilihan teknik bergantung pada kebutuhan akurasi, jumlah sampel, ketersediaan alat, dan kondisi tanaman.

Metode kertas milimeter dilakukan dengan meletakkan daun di atas kertas milimeter, mengikuti kontur daun, kemudian menaksir luas berdasarkan jumlah kotak yang tertutup pola daun. Gravimetri menggunakan perbandingan berat replika daun terhadap berat kertas acuan. Planimeter digunakan untuk menghitung luas bentuk tidak beraturan, sedangkan metode panjang kali lebar menggunakan faktor koreksi bentuk. Metode fotografi menggunakan citra daun yang dipotret bersama objek acuan yang sudah diketahui ukurannya. Penelitian ini menempatkan ImageJ sebagai pengembangan pendekatan fotografi berbasis citra digital karena objek daun dapat dikalibrasi, disegmentasi, dan diukur secara kuantitatif pada satu workflow yang sama.

### Akuisisi Citra dan Kalibrasi Skala

Akuisisi citra dilakukan dengan menempatkan daun pada bidang datar bersama objek acuan ukuran berupa penggaris. Daun dan penggaris diletakkan pada bidang yang sama agar kalibrasi skala tidak mengalami bias akibat perbedaan jarak terhadap kamera. Kamera diarahkan tegak lurus terhadap bidang objek untuk mengurangi distorsi perspektif. Pencahayaan dibuat merata, bayangan tajam pada tepi daun diminimalkan, dan latar belakang dipilih agar memiliki kontras yang cukup terhadap objek daun. Kondisi akuisisi ini penting karena proses *thresholding* sangat bergantung pada perbedaan intensitas antara daun dan latar belakang.

Pada citra contoh, acuan ukuran ditentukan dengan menarik garis seleksi menggunakan tool Straight sepanjang objek penggaris. Panjang fisik acuan sebesar 13,67 cm bersesuaian dengan panjang 360,5 piksel pada citra. Dengan demikian, skala kalibrasi yang digunakan adalah 26,372 piksel/cm. Skala ini kemudian digunakan ImageJ untuk mengonversi jumlah piksel objek daun menjadi luas fisik dalam satuan  $\text{cm}^2$ .



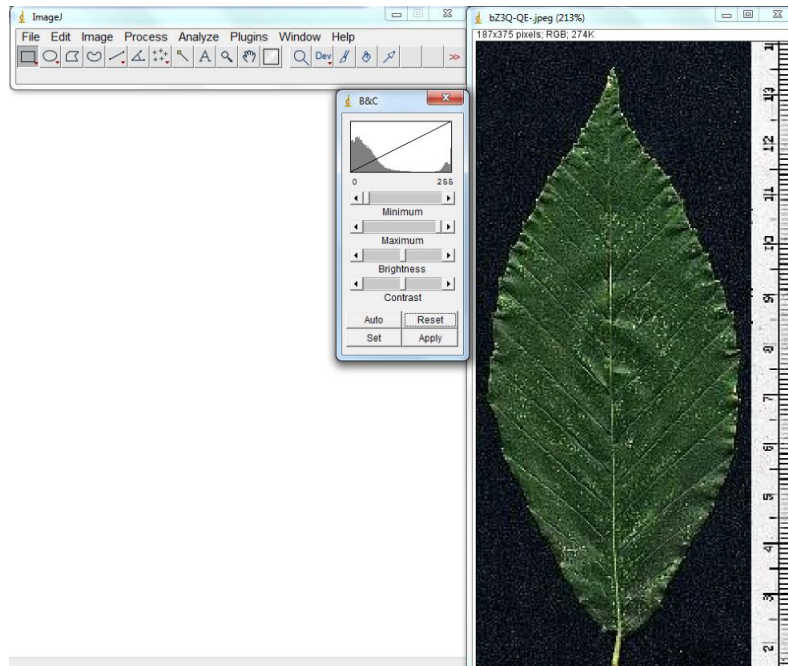
**Gambar 1:** Citra contoh daun dengan objek acuan penggaris untuk kalibrasi skala.  
*Sumber: Data penelitian; citra daun American Beech (Fagus grandifolia)*

### **Tahapan Pengolahan Citra Menggunakan ImageJ**

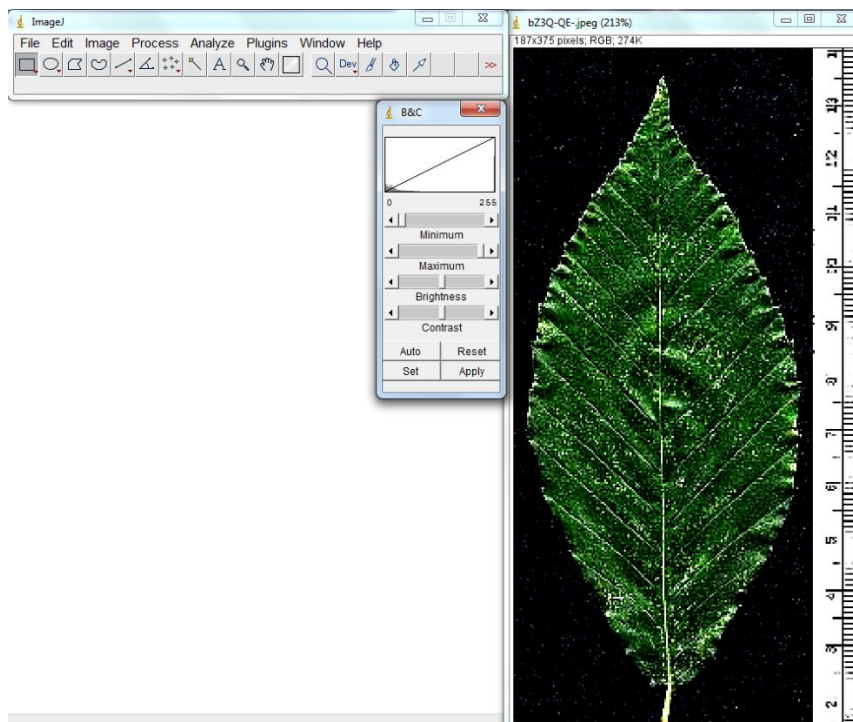
Tahapan pengolahan citra dilakukan secara berurutan. Citra digital dibuka pada ImageJ, kemudian skala citra ditentukan melalui fitur Set Scale menggunakan penggaris pada citra. Citra RGB dikonversi menjadi grayscale 8-bit agar proses *thresholding* lebih sederhana dan lebih stabil dibandingkan segmentasi langsung dari citra RGB. Kontras citra ditingkatkan menggunakan pengaturan brightness/contrast atau automatic contrast untuk memperjelas perbedaan objek dan latar belakang.

Setelah kontras disesuaikan, proses pengurangan derau dilakukan menggunakan median filter dengan radius 0,1 piksel. Pengurangan derau bertujuan menjaga tepi objek agar tetap jelas ketika citra diubah menjadi citra biner. Selanjutnya, *thresholding* diterapkan untuk memisahkan objek daun dari latar belakang. Bila diperlukan, operasi morfologi seperti filling, opening, dan watershed digunakan untuk menutup lubang kecil, menghilangkan objek pengganggu, atau memperbaiki batas segmentasi. Hasil segmentasi diperiksa secara visual sebelum pengukuran area dilakukan melalui fitur *Measure* atau *Analyze Particles*.

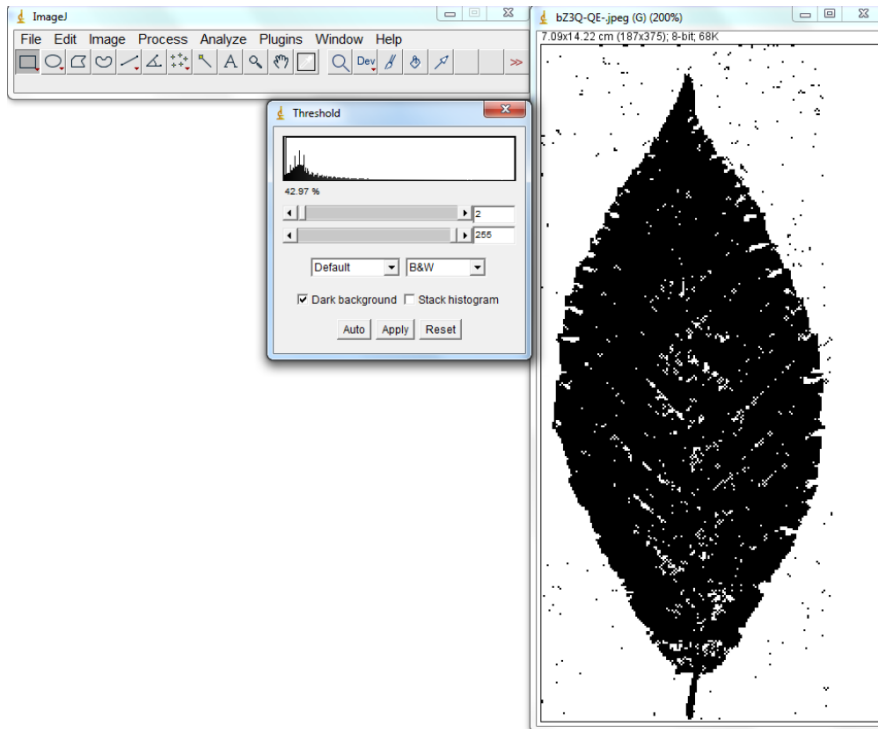
Dalam pengolahan citra, *thresholding* termasuk operasi tingkat titik karena keputusan pemisahan piksel terutama ditentukan oleh nilai intensitas piksel. Median filtering dan operasi morfologi termasuk operasi tingkat lokal karena memperhatikan piksel tetangga. Konsep dasar pengolahan citra seperti konversi ruang warna, filtering, dan *thresholding* dapat dirujuk pada literatur pengolahan citra umum (Sutoyo, 2009). Analisis area termasuk operasi tingkat objek karena menghasilkan atribut kuantitatif dari objek yang telah tersegmentasi. Pembagian ini penting agar tahap prapemrosesan, segmentasi, dan pengukuran dapat dipahami sebagai satu alur analisis citra yang konsisten.



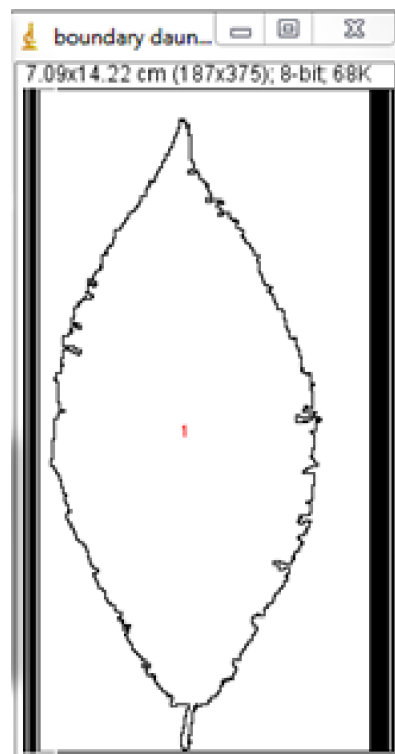
**Gambar 2:** Perubahan level terang objek pada citra daun.  
*Sumber: Data penelitian, diolah*



**Gambar 3:** Perubahan kontras objek pada citra daun.  
*Sumber: Data penelitian, diolah*



**Gambar 4:** Hasil transformasi citra menjadi citra biner.  
*Sumber: Data penelitian, diolah*



**Gambar 5:** Hasil pendeteksian dan segmentasi objek daun.  
*Sumber: Data penelitian, diolah*

### Kerangka Operasional Penelitian

Kerangka operasional penelitian terdiri atas akuisisi citra, kalibrasi skala, prapemrosesan kontras dan median filtering, *thresholding* dan segmentasi, pengukuran area dengan ImageJ, serta validasi terhadap metode kertas milimeter. Alur ini menekankan bahwa kualitas pengukuran ImageJ tidak hanya ditentukan oleh fitur perangkat lunak, tetapi juga oleh konsistensi akuisisi citra, kejelasan kalibrasi skala, dan ketepatan segmentasi objek. Untuk memperoleh hasil yang replikatif, parameter pengolahan citra harus dicatat dan diterapkan secara konsisten pada seluruh sampel.



Keluaran: luas daun (cm<sup>2</sup>), selisih absolut, error relatif, MAE, MAPE, RMSE, R<sup>2</sup>, dan agreement plot

**Gambar 6:** Alur penelitian pengukuran luas daun berbasis ImageJ.

*Sumber: Data penelitian, diolah*

**Tabel 1.** Parameter pengolahan citra menggunakan ImageJ

Parameter	Nilai/Keterangan
Perangkat lunak	ImageJ
Versi yang disarankan	ImageJ 1.54p atau versi terbaru
Objek analisis	Daun
Format citra	Citra digital RGB
Konversi citra	RGB ke grayscale 8-bit, kemudian biner melalui <i>thresholding</i>
Kalibrasi skala	Berdasarkan penggaris pada citra
Skala contoh awal	26,372 piksel/cm
Filter	Median filter
Radius filter	0,1 piksel
Segmentasi	<i>Thresholding</i>
Operasi morfologi	Filling, opening, dan watershed bila diperlukan
Fitur pengukuran	<i>Measure / Analyze Particles</i>
Satuan hasil	cm <sup>2</sup>
Parameter keluaran	Luas daun, selisih absolut, error relatif, MAE, MAPE, RMSE, R <sup>2</sup> , dan agreement plot

*Sumber: Data penelitian, diolah*

### Metode Pembanding dan Analisis Validasi

Pengukuran dengan kertas milimeter dilakukan dengan meletakkan daun pada kertas milimeter, menggambar atau mengikuti kontur daun, kemudian menghitung luas berdasarkan jumlah kotak yang tertutup oleh bentuk daun. Kotak penuh dihitung langsung, sedangkan kotak sebagian dihitung menggunakan estimasi proporsional. Hasil akhir dinyatakan dalam cm<sup>2</sup>. Potensi error pada metode ini terutama berasal dari interpretasi kotak sebagian, ketebalan garis kontur, dan ketelitian operator ketika menentukan batas daun pada bagian tepi yang tidak beraturan.

Validasi dilakukan dengan membandingkan luas daun hasil ImageJ (AI) terhadap hasil kertas milimeter (AK) untuk setiap sampel. Secara matematis, indikator validasi dinyatakan sebagai berikut: selisih absolut =  $|AI_i - AK_i|$ ; error (%) =  $(|AI_i - AK_i| / AK_i) \times 100$ ; MAE =  $(1/n)\sum |AI_i - AK_i|$ ; MAPE =  $(100/n)\sum |(AI_i - AK_i) / AK_i|$ ; dan RMSE =  $\sqrt{[(1/n)\sum (AI_i - AK_i)^2]}$ . Hubungan linear antara kedua metode dievaluasi melalui regresi linear dan koefisien determinasi R<sup>2</sup>. Selain itu, plot selisih terhadap rata-rata dua metode digunakan untuk melihat bias rata-rata dan batas kesesuaian pengukuran.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Operasional pada Citra Contoh

Pengukuran awal pada citra daun dengan objek acuan penggaris menghasilkan skala 26,372 piksel/cm. Berdasarkan analisis partikel pada ImageJ, luas daun pada citra contoh awal adalah 44,894 cm<sup>2</sup>, dengan perbandingan area daun terhadap bidang citra sebesar 44,523%. Nilai rata-rata derajat keabuan pada hasil segmentasi adalah 244,3 dan simpangan baku derajat keabuan sebesar 51,2. Hasil ini menunjukkan bahwa ImageJ dapat mengonversi area piksel objek daun menjadi satuan fisik setelah skala ditetapkan.

Tahapan operasional pada citra contoh memperlihatkan peran setiap proses dalam workflow pengukuran. Penyesuaian level terang dan kontras meningkatkan keterpisahan objek daun dari latar belakang. Transformasi citra menjadi citra biner menyederhanakan data masukan sehingga area objek dapat dihitung sebagai kumpulan piksel yang termasuk kelas daun. Segmentasi dan pendeteksian objek menghasilkan batas daun yang dapat dianalisis lebih lanjut melalui fitur pengukuran ImageJ.

**Tabel 2.** Hasil pengukuran awal pada citra contoh

Parameter	Nilai
Luas daun	44,894 cm <sup>2</sup>
Perbandingan luas daun dengan luas citra	44,523%
Rata-rata derajat keabuan	244,3
Simpangan baku derajat keabuan	51,2

*Sumber: Data penelitian, diolah*

### Data Validasi 40 Sampel Daun

Data validasi 40 sampel daun disajikan pada Tabel 3. Nilai ImageJ dan kertas milimeter berada pada rentang yang relatif serupa. Pada metode kertas milimeter, luas daun berkisar dari 54,04 cm<sup>2</sup> sampai 71,18 cm<sup>2</sup>. Pada metode ImageJ, luas daun berkisar dari 55,05 cm<sup>2</sup> sampai 70,79 cm<sup>2</sup>. Seluruh sampel memiliki error relatif di bawah 5%. Error tertinggi terjadi pada sampel D23 dengan error 4,86%, sedangkan error terendah terjadi pada sampel D12 dan D28 dengan error 0,03%.

**Tabel 3.** Data validasi luas daun menggunakan ImageJ dan kertas milimeter

Kode	ImageJ (cm <sup>2</sup> )	Kertas milimeter (cm <sup>2</sup> )	Selisih absolut (cm <sup>2</sup> )	Error (%)
D01	56,40	58,40	2,00	3,42
D02	70,79	70,82	0,03	0,04
D03	59,12	58,97	0,15	0,25
D04	67,80	67,29	0,51	0,76
D05	61,42	62,63	1,21	1,93
D06	67,39	64,52	2,87	4,45
D07	61,83	64,00	2,17	3,39
D08	66,44	64,26	2,18	3,39
D09	68,75	68,02	0,73	1,07
D10	61,15	60,16	0,99	1,65
D11	55,72	54,04	1,68	3,11
D12	63,05	63,03	0,02	0,03
D13	59,80	58,33	1,47	2,52
D14	65,77	66,09	0,32	0,48
D15	57,76	58,54	0,78	1,33
D16	62,10	60,80	1,30	2,14

D17	67,12	67,92	0,80	1,18
D18	65,36	66,79	1,43	2,14
D19	60,75	59,96	0,79	1,32
D20	63,32	60,79	2,53	4,16
D21	55,05	55,37	0,32	0,58
D22	58,03	57,70	0,33	0,57
D23	58,44	55,73	2,71	4,86
D24	69,43	71,18	1,75	2,46
D25	59,39	57,33	2,06	3,59
D26	66,72	66,42	0,30	0,45
D27	64,00	66,13	2,13	3,22
D28	62,78	62,76	0,02	0,03
D29	64,41	65,56	1,15	1,75
D30	70,11	68,15	1,96	2,88
D31	57,08	56,57	0,51	0,90
D32	66,04	64,46	1,58	2,45
D33	60,07	60,50	0,43	0,71
D34	64,68	63,62	1,06	1,67
D35	68,07	68,65	0,58	0,84
D36	63,73	62,39	1,34	2,15
D37	65,09	64,22	0,87	1,35
D38	58,71	59,67	0,96	1,61
D39	62,51	59,99	2,52	4,20
D40	60,47	62,00	1,53	2,47

*Sumber: Data penelitian, diolah*

**Tabel 4.** Ringkasan statistik validasi

<b>Metrik</b>	<b>Nilai</b>
<b>Jumlah sampel</b>	40
<b>Rata-rata luas ImageJ</b>	62,9163 cm <sup>2</sup>
<b>Rata-rata luas kertas milimeter</b>	62,5940 cm <sup>2</sup>
<b>Simpangan baku ImageJ</b>	4,1825 cm <sup>2</sup>
<b>Simpangan baku kertas milimeter</b>	4,3431 cm <sup>2</sup>
<b>Bias rata-rata</b>	0,3222 cm <sup>2</sup>
<b>MAE</b>	1,2018 cm <sup>2</sup>
<b>MAPE</b>	1,9382%
<b>RMSE</b>	1,4429 cm <sup>2</sup>

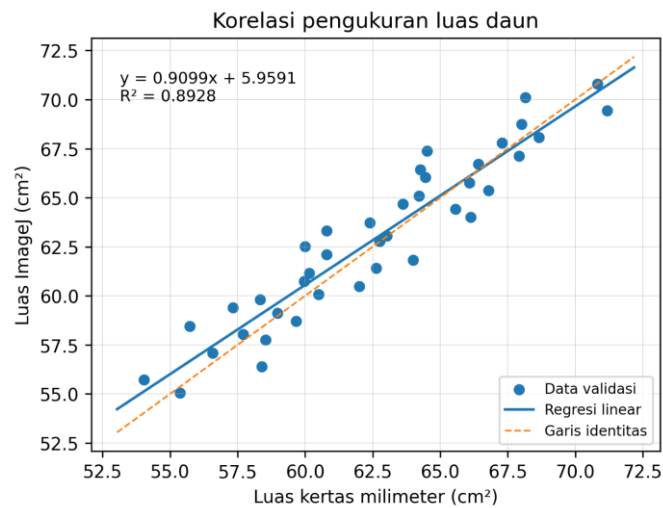
<b>Koefisien korelasi Pearson</b>	0,9449
<b>R<sup>2</sup></b>	0,8928
<b>Persamaan regresi</b>	$y = 0,9099x + 5,9591$
<b>Batas kesesuaian 95%</b>	-2,4694 sampai 3,1139 cm <sup>2</sup>

*Sumber: Data penelitian, diolah*

### **Interpretasi Statistik dan Kesesuaian Metode**

Rata-rata luas daun berdasarkan ImageJ adalah 62,9163 cm<sup>2</sup>, sedangkan rata-rata luas daun berdasarkan kertas milimeter adalah 62,5940 cm<sup>2</sup>. Bias rata-rata sebesar 0,3222 cm<sup>2</sup> menunjukkan bahwa pada dataset ini ImageJ cenderung menghasilkan nilai sedikit lebih tinggi dibandingkan metode kertas milimeter. Akan tetapi, besaran bias tersebut relatif kecil dibandingkan rentang luas daun yang diamati.

Nilai MAE sebesar 1,2018 cm<sup>2</sup> menunjukkan bahwa rata-rata selisih absolut antara ImageJ dan kertas milimeter relatif rendah. Nilai MAPE sebesar 1,9382% menunjukkan bahwa rata-rata error relatif berada di bawah 5%, sehingga metode ImageJ dapat dikategorikan memiliki kesesuaian praktis yang baik pada kondisi penelitian ini. Nilai RMSE sebesar 1,4429 cm<sup>2</sup> sedikit lebih besar daripada MAE, yang menunjukkan adanya beberapa sampel dengan error lebih tinggi, tetapi tidak membentuk deviasi ekstrem. Koefisien determinasi sebesar 0,8928 dan koefisien korelasi Pearson sebesar 0,9449 menunjukkan hubungan linear yang kuat antara hasil ImageJ dan kertas milimeter.

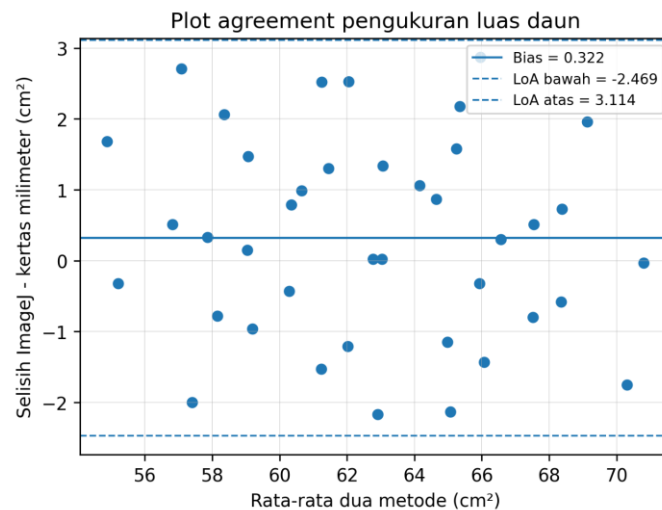


**Gambar 7:** Grafik korelasi antara pengukuran luas daun menggunakan ImageJ dan kertas milimeter.

*Sumber: Data penelitian, diolah*

Grafik korelasi pada Gambar 7 menunjukkan bahwa titik-titik data mengikuti kecenderungan linear positif. Persamaan regresi yang diperoleh adalah  $y = 0,9099x + 5,9591$ , dengan  $y$  menyatakan luas hasil ImageJ dan  $x$  menyatakan luas hasil kertas milimeter. Kemiringan regresi yang lebih kecil dari satu menunjukkan bahwa perbedaan antara dua metode tidak sepenuhnya konstan pada seluruh rentang data. Walaupun demikian, nilai  $R^2$  yang mendekati 0,90 menunjukkan bahwa sebagian besar variasi hasil ImageJ dapat dijelaskan oleh variasi hasil kertas milimeter.

Plot kesesuaian pada Gambar 8 memperlihatkan selisih ImageJ dikurangi kertas milimeter terhadap rata-rata dua metode. Bias rata-rata adalah  $0,3222 \text{ cm}^2$ , dengan batas kesesuaian bawah  $-2,4694 \text{ cm}^2$  dan batas kesesuaian atas  $3,1139 \text{ cm}^2$ . Sebagian besar titik berada di sekitar garis bias dan tidak menunjukkan pola peningkatan selisih yang sangat jelas terhadap besarnya luas daun. Temuan ini mendukung interpretasi bahwa perbedaan antar metode masih berada pada tingkat yang dapat diterima untuk penggunaan praktis, terutama pada konteks pembelajaran, penelitian awal, dan pengukuran laboratorium sederhana.



**Gambar 8:** Plot kesesuaian antara ImageJ dan metode kertas milimeter.  
*Sumber: Data penelitian, diolah*

## Pembahasan

Hasil penelitian ini sejalan dengan kecenderungan riset pengolahan citra tanaman yang menunjukkan bahwa citra digital dapat mempercepat pengukuran parameter morfologi tanaman. Dibandingkan metode manual, ImageJ memberikan beberapa keunggulan: proses pengukuran lebih cepat setelah parameter dibuat, citra sumber tetap terdokumentasi, segmentasi dapat diperiksa ulang, dan keluaran pengukuran dapat diekspor untuk analisis statistik. Keunggulan lain adalah fleksibilitas untuk mengukur parameter morfologi tambahan dari citra yang sama. Dengan demikian, ImageJ bukan hanya alat pengukur luas, tetapi juga dapat menjadi bagian dari workflow fenotiping sederhana yang murah dan dapat direplikasi.

Kerangka operasional yang digabungkan dalam penelitian ini memperkuat posisi metode ImageJ karena menunjukkan detail proses sejak citra awal sampai keluaran kuantitatif. Pada tahap awal, citra daun dengan penggaris menyediakan basis kalibrasi. Pada tahap prapemrosesan, pengubahan brightness dan contrast memperbaiki pemisahan objek. Pada tahap segmentasi, *thresholding* dan transformasi biner memisahkan daun dari latar belakang. Pada tahap pengukuran, fitur *Analyze Particles* mengubah objek tersegmentasi menjadi nilai area dalam cm<sup>2</sup>. Rangkaian ini menjadikan hasil validasi 40 sampel tidak berdiri sendiri, tetapi terhubung dengan prosedur operasional yang dapat diulang.

Meskipun demikian, hasil yang baik tidak berarti bahwa ImageJ bebas dari potensi error. Sumber error utama dapat berasal dari akuisisi citra, kalibrasi, dan segmentasi. Kamera yang tidak tegak lurus terhadap bidang daun dapat menghasilkan distorsi perspektif. Penggaris yang tidak berada pada bidang yang sama dengan daun dapat menyebabkan kesalahan skala. Pencahayaan yang tidak merata dapat memunculkan bayangan yang ikut tersegmentasi sebagai objek, sedangkan latar belakang dengan kontras rendah dapat membuat batas daun tidak terdeteksi secara akurat. Threshold yang terlalu rendah dapat memasukkan latar belakang ke area daun, sedangkan threshold yang terlalu tinggi dapat menghilangkan sebagian area daun, terutama pada daun dengan warna tidak homogen atau tepi yang tipis.

Pada sisi metode pembandingan, kertas milimeter juga memiliki ketidakpastian. Operator harus menentukan perlakuan terhadap kotak yang tertutup sebagian oleh tepi daun. Pada daun dengan tepi bergerigi atau bentuk tidak beraturan, estimasi kotak sebagian dapat menghasilkan variasi antar pengukur. Oleh karena itu, perbedaan ImageJ terhadap kertas milimeter tidak selalu dapat ditafsirkan sebagai kesalahan ImageJ semata. Sebagian deviasi dapat muncul dari ketidakpastian metode manual. Interpretasi hasil harus menyatakan bahwa ImageJ memiliki kesesuaian yang baik terhadap metode kertas milimeter, bukan bahwa ImageJ menghasilkan nilai yang identik atau sepenuhnya menggantikan semua metode referensi.

Jika dibandingkan dengan pendekatan pengukuran modern berbasis *deep learning*, ImageJ memiliki posisi metodologis yang berbeda. Metode *deep learning* dapat memberikan otomatisasi tinggi dan cocok untuk *high-throughput* phenotyping, tetapi membutuhkan dataset beranotasi, proses pelatihan model, validasi komputasional, dan kemampuan pemrograman yang lebih tinggi. ImageJ lebih sesuai untuk kebutuhan praktis dengan jumlah sampel kecil sampai menengah, kondisi laboratorium sederhana, dan pembelajaran pengolahan citra dasar. Untuk konteks publikasi jurnal nasional, kekuatan naskah ini terletak pada prosedur yang jelas, integrasi kerangka operasional, validasi kuantitatif, dan pembahasan keterbatasan, bukan pada klaim kebaruan algoritmik.

Berdasarkan keseluruhan hasil, ImageJ layak digunakan sebagai alternatif pengukuran luas daun berbasis citra digital pada kondisi akuisisi yang terkontrol. Akan tetapi, klaim akurasi perlu dibatasi pada jenis sampel, rentang luas daun, dan prosedur

segmentasi yang digunakan. Untuk memperkuat validitas eksternal, penelitian berikutnya perlu menambah variasi spesies, bentuk daun, dan rentang ukuran, serta membandingkan hasil ImageJ dengan leaf area meter sebagai metode referensi yang lebih kuat. Analisis sensitivitas terhadap metode *thresholding* otomatis seperti Otsu, Triangle, Yen, dan Huang juga perlu dilakukan agar kestabilan hasil segmentasi dapat dinilai secara lebih komprehensif.

#### 4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa ImageJ dapat digunakan untuk mengukur luas daun berbasis citra digital melalui tahapan kalibrasi skala, prapemrosesan citra, konversi grayscale, median filtering, *thresholding*, segmentasi objek, dan analisis partikel. Kerangka operasional yang ditambahkan memperjelas proses pengukuran dari citra awal, pengubahan level terang, peningkatan kontras, transformasi biner, pendeteksian objek, hingga keluaran luas daun. Pada contoh pengukuran awal, kalibrasi citra menggunakan skala 26,372 piksel/cm menghasilkan luas daun sebesar 44,894 cm<sup>2</sup>.

Validasi terhadap 40 sampel daun menunjukkan bahwa hasil ImageJ memiliki kesesuaian yang baik terhadap metode kertas milimeter. Rata-rata luas daun berdasarkan ImageJ adalah 62,9163 cm<sup>2</sup>, sedangkan rata-rata luas daun berdasarkan kertas milimeter adalah 62,5940 cm<sup>2</sup>. Nilai MAE sebesar 1,2018 cm<sup>2</sup>, MAPE sebesar 1,9382%, RMSE sebesar 1,4429 cm<sup>2</sup>, dan R<sup>2</sup> sebesar 0,8928 menunjukkan bahwa error pengukuran relatif rendah dan hubungan kedua metode tergolong kuat. Dengan demikian, ImageJ dapat digunakan sebagai alternatif praktis, murah, dan replikatif untuk pengukuran luas daun pada kondisi akuisisi citra yang terkontrol.

Penelitian lanjutan disarankan menggunakan jumlah sampel yang lebih besar, mencakup beberapa spesies dan bentuk daun, serta membandingkan hasil ImageJ dengan leaf area meter. Uji sensitivitas terhadap pencahayaan, resolusi citra, posisi kamera, dan beberapa metode *thresholding* otomatis perlu dilakukan untuk mengetahui kestabilan hasil segmentasi. Pengembangan macro ImageJ atau workflow semiotomatis juga diperlukan agar proses pengukuran dapat dilakukan lebih konsisten, terutama ketika jumlah citra bertambah banyak.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- Bambang, B., Santoso, & Haryadi. (2008). Metode Pengukuran Luas Daun Jarak Pagar. *Magrobis: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian*, 8(1), 17–22.
- Easlon, H. M., & Bloom, A. J. (2014). *Easy Leaf Area: Automated Digital Image Analysis for Rapid and Accurate Measurement of Leaf Area. Applications in Plant Sciences*, 2(7), 1400033. <https://doi.org/10.3732/apps.1400033>
- Guswanto, J. (2009). *Perbandingan Metode Pengukuran Luas Daun*. Universitas Muhammadiyah Malang.
- ImageJ. (2026). *ImageJ Release Notes*. <https://imagej.net/ij/source/release-notes.html>
- Koyama, K. (2023). Leaf Area Estimation by Photographing Leaves Sandwiched between Transparent Clear File Folder Sheets. *Horticulturae*, 9(6), 709. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060709>
- Li, M., Liao, Y., Lu, Z., Sun, M., & Lai, H. (2023). Non-Destructive Monitoring Method for Leaf Area of Brassica napus Based on Image Processing and Deep Learning. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1163700. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163700>
- Maraveas, C. (2024). Image Analysis Artificial Intelligence Technologies for Plant Phenotyping: Current State of the Art. *AgriEngineering*, 6(3), 3375–3407. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6030193>
- Olivoto, T. (2022). Lights, Camera, Pliman! An R Package for Plant Image Analysis. *Methods in Ecology and Evolution*, 13(4), 789–798. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13803>
- Qiao, D., Yang, J., Bai, B., Li, G., Wang, J., Li, Z., Liu, J., & Liu, J. (2024). Non-Destructive Monitoring of Peanut Leaf Area Index by Combining UAV Spectral and Textural Characteristics. *Remote Sensing*, 16(12), 2182. <https://doi.org/10.3390/rs16122182>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 Years of Image Analysis. *Nature Methods*, 9(7), 671–675. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Schroeder, A. B., Dobson, E. T. A., Rueden, C. T., Tomancak, P., Jug, F., & Eliceiri, K. W. (2021). The ImageJ Ecosystem: Open-Source Software for Image Visualization, Processing, and Analysis. *Protein Science*, 30(1), 234–249. <https://doi.org/10.1002/pro.3993>
- Suarez, E., Andrade, D., & Velasquez-Vasconez, P. A. (2025). Automating Leaf Area Measurement in Citrus Using Scanned Images and Python-Based Image Processing. *Applied Sciences*, 15(17), 9750. <https://doi.org/10.3390/app15179750>
- Sudianto, A. I., & Husna, A. (2025). Application of Digital Image Processing to the Measurement of Leaf Area Index (LAI) of Rice Plants (*Oryza sativa* L.). *Jurnal SimanteC*, 13(2), 163–170. <https://doi.org/10.21107/simantec.v13i2.30151>
- Sutoyo. (2009). *Pengenalan Citra*. Universitas Gadjah Mada.

- Velasquez-Vasconez, P. A., & Andrade Díaz, D. (2024). *LeafArea* Package: A Tool for Estimating Leaf Area in Andean Fruit Species. *International Journal of Plant Biology*, 15(1), 102–109. <https://doi.org/10.3390/ijpb15010009>
- Zhang, Y., Li, Y., Cao, X., Wang, Z., Chen, J., Li, Y., Zhong, Z., Bai, R., Yang, P., Pan, F., & Fu, X. (2025). Leaf Area Estimation in Small-Seeded Broccoli Using a Lightweight Instance Segmentation Framework Based on Improved YOLOv11-AreaNet. *Frontiers in Plant Science*, 16, 1622713. <https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1622713>