
BIOFARM
Jurnal Ilmiah Pertanian
ISSN Print: 0216-5430; ISSN Online: 2301-6442
Vol. 22, No. 2, Oktober 2026

Evaluasi Estimasi Luas Daun Total Tanaman Nanas (*Ananas comosus*) Menggunakan Metode Average Leaf Area (Metode Ala) Berbasis Pengukuran Image J

Evaluation Of Total Leaf Area Estimation In Pineapple (Ananas comosus) Using The Average Leaf Area Method Based On Imagej Measurements

Dewi Ratih Rizki Damaiyanti [*1], Akbar Saitama[1], Ahmad Ilham Akbar[1],Nungki Kusuma Astuti[2], Pandu Risantyo[2]
[1]Fakultas Bioindustri Pertanian dan Kehutanan, Universitas Brawijaya, Indonesia
[2]PT Great Giant Pineapple, Indonesia
*Korespondensi Penulis: dewi.ratihrd@ub.ac.id

ABSTRAK
Pengukuran luas daun diperlukan untuk mengevaluasi pertumbuhan vegetatif tanaman nanas. Metode Average Leaf Area (ALA) menawarkan pendekatan sederhana berdasarkan jumlah daun dan rata-rata luas per helai, tetapi ketepatannya perlu dievaluasi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi estimasi luas daun total tanaman nanas menggunakan metode ALA berbasis pengukuran ImageJ. Data berasal dari 25 tanaman yang meliputi jumlah daun dan luas daun total hasil ImageJ sebagai acuan operasional. Koefisien ALA dihitung dari rata-rata luas per helai setiap tanaman, kemudian dikalikan dengan jumlah daun untuk memperoleh estimasi luas daun total. Evaluasi menggunakan regresi linear, ANOVA regresi, bias, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), dan validasi internal leave-one-out cross-validation (LOOCV). Rerata luas daun ImageJ sebesar 5.526,13 cm²/tanaman, sedangkan estimasi ALA sebesar 5.326,59 cm²/tanaman, dengan koefisien ALA 175,6791 cm²/helai. Hubungan kedua pendekatan menghasilkan R^2 sebesar 0,8483. Evaluasi pada data pembentukan menghasilkan bias −199,54 cm²/tanaman, MAE 1.016,16 cm²/tanaman, dan RMSE 1.236,75 cm²/tanaman. LOOCV menghasilkan bias −207,85 cm²/tanaman, MAE 1.058,50 cm²/tanaman, RMSE 1.288,28 cm²/tanaman, serta rerata kesalahan persentase absolut 20,98%. Metode ALA memiliki hubungan linear yang kuat dengan ImageJ, tetapi ketepatannya bervariasi antar tanaman. Penggunaannya sebagai pendugaan awal perlu mempertimbangkan toleransi kesalahan dan pengujian pada kelompok tanaman baru.

Kata kunci**:** *ALA, luas daun, ImageJ, iPhone*

ABSTRACT
Leaf area measurement is essential for evaluating vegetative growth in pineapple. The average leaf area (ALA) method provides a simple estimation approach based on leaf number and mean individual leaf area, but its performance requires evaluation. This study evaluated total pineapple leaf area estimated using an ImageJ-based ALA method. Data from 25 plants comprised leaf number and total leaf area measured using ImageJ as an operational reference. The ALA coefficient was calculated by averaging the individual plants' mean leaf areas and multiplied by each plant's leaf number to estimate total leaf area. Evaluation included linear regression, regression ANOVA, bias, mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and internal leave-one-out cross-validation (LOOCV). Mean total leaf area was 5,526.13 cm²/plant for ImageJ and 5,326.59 cm²/plant for ALA, with an ALA coefficient of 175.6791 cm²/leaf. The linear relationship between the approaches yielded an R^2 of 0.8483. Evaluation using the coefficient-development dataset produced a bias of −199.54 cm²/plant, MAE of 1,016.16 cm²/plant, and RMSE of 1,236.75 cm²/plant. LOOCV produced a bias of −207.85 cm²/plant, MAE of 1,058.50 cm²/plant, RMSE of 1,288.28 cm²/plant, and mean absolute percentage error of 20.98%. Although ALA showed a strong linear relationship with ImageJ, estimation performance varied among plants. Its use for preliminary estimation should consider acceptable error limits and further evaluation using an independent group of plants.

Keywords: ALA, Leaf area, Image J, iPhone

PENDAHULUAN

Luas daun merupakan parameter

penting dalam analisis pertumbuhan tanaman karena menggambarkan ukuran permukaan daun yang berperan dalam penerimaan cahaya dan pertukaran gas. Pengukuran luas daun mendukung penilaian perkembangan vegetatif serta respons tanaman terhadap kondisi lingkungan. Perkembangan luas daun ialah salah satu variabel utama untuk menguantifikasi pertumbuhan dan fungsi fisiologis tanaman (Müller-Linow et al., 2019). Sejalan dengan itu, Montès et al. (2024) menjelaskan bahwa karakter morfologi daun sangat penting untuk memahami produktivitas dan interaksi tanaman dengan lingkungan. Oleh karena itu, metode pengukuran luas daun yang konsisten diperlukan untuk menghasilkan data yang dapat dibandingkan dan ditafsirkan secara tepat.

Pada tanaman nanas (Ananas comosus), pengamatan karakter daun merupakan bagian penting dalam evaluasi pertumbuhan vegetatif. Pada penelitian Etame Kossi et al. (2025), menggunakan jumlah daun aktif, panjang dan lebar daun D, serta ukuran luas daun untuk mengevaluasi respons tanaman nanas terhadap tinggi guludan dan kerapatan tanaman. Pengamatan jumlah daun dapat dilengkapi dengan pengukuran luas daun karena kedua parameter tersebut memberikan informasi yang berbeda. Jumlah daun menunjukkan banyaknya organ daun, sedangkan luas daun menggambarkan ukuran permukaannya. Dengan demikian, tanaman dengan jumlah daun yang sama belum tentu memiliki luas daun total yang sama, sehingga informasi ukuran daun diperlukan untuk melengkapi penilaian pertumbuhan.

Estimasi luas daun nanas melalui model matematis telah dikembangkan oleh Santos et al. (2018). Pada kultivar ‘Pérola’, luas daun D dapat diestimasi berdasarkan panjang dan lebar daun tersebut, sedangkan luas daun total tanaman dapat diestimasi berdasarkan luas daun D. Model estimasi luas daun D menghasilkan koefisien determinasi sebesar 0,97, sementara model estimasi luas daun total berdasarkan luas daun D menghasilkan koefisien determinasi sebesar 0,68. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kemampuan model bergantung pada hubungan antara variabel penduga dan sasaran estimasi. Penelitian tersebut juga menekankan perlunya mempertimbangkan karakteristik kultivar dalam penerapan model luas daun. Oleh karena itu, penggunaan suatu metode estimasi pada nanas memerlukan evaluasi kesesuaian terhadap karakteristik sampel dan kondisi pengukuran yang digunakan.

Perkembangan pengolahan citra digital menyediakan alternatif pengukuran luas daun melalui analisis gambar menggunakan perangkat lunak, termasuk ImageJ. Dũng dan Minh (2021) menunjukkan bahwa kombinasi foto telepon pintar dan ImageJ dapat digunakan untuk mengukur luas daun serta luas proyeksi tajuk. Pada pengujian objek persegi dengan luas diketahui, rata-rata kesalahan relatif pengukuran sebesar 0,9%. Sementara itu, Getman-Pickering et al. (2020) melaporkan bahwa pada pengujian objek daun buatan dengan luas diketahui, rata-rata perbedaan hasil pengukuran ImageJ terhadap luas acuan sebesar 3,2%. Kedua penelitian tersebut mendukung potensi pengukuran berbasis citra, sekaligus menunjukkan pentingnya pengujian terhadap objek atau ukuran pembanding sebelum hasilnya diterapkan dalam penelitian tanaman.

Hasil pengukuran berbasis citra dengan image j dipengaruhi oleh cara objek direpresentasikan. Koyama (2023) menjelaskan bahwa bentuk daun yang tiga dimensi dapat menyebabkan estimasi luas lebih rendah ketika diukur melalui gambar dua dimensi. Penempatan daun secara rata dan penggunaan acuan skala menjadi bagian penting dalam prosedur pengukuran tersebut. Selain itu, keragaman bentuk, ukuran, dan warna daun dapat menjadi tantangan dalam proses analisis otomatis (Montès et al., 2024). Menurut Müller-Linow et al. (2019), konsistensi pengambilan gambar, kalibrasi skala, dan penentuan batas daun perlu diperhatikan agar perbedaan hasil pengukuran dapat dievaluasi secara tepat.Perbandingan metode diberikan oleh Umam et al. (2024), yang mengukur luas daun kayu putih menggunakan ImageJ, kertas milimeter, dan gravimetri menunjukkan rata-rata kesalahan pengukuran ImageJ terhadap metode kertas milimeter sebesar 8,46%, sedangkan terhadap metode gravimetri

sebesar 47,31%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa besarnya penyimpangan hasil pengukuran dapat bergantung pada metode pembanding.

Average Leaf Area (ALA) ialah salah satu metode pendugaan luas daun total berdasarkan rata-rata luas per helai daun dan jumlah daun tanaman (Widaryanto et al,, 2019). kebutuhan untuk mengevaluasi hubungan sekaligus perbedaan hasil estimasi ImageJ dan metode ALA. Analisis regresi dapat menggambarkan pola hubungan kedua metode, tetapi nilai koefisien determinasi yang tinggi belum cukup untuk menyatakan bahwa hasil pengukurannya memiliki kesesuaian yang baik. Kim dan Lee (2022) membahas penilaian kesesuaian melalui ukuran berbasis selisih absolut dan indeks konkordansi, dengan mempertimbangkan konteks pengukuran serta batas perbedaan yang dapat diterima. Oleh karena itu, analisis hubungan perlu dilengkapi dengan pemeriksaan selisih untuk mengidentifikasi kecenderungan salah satu metode menghasilkan nilai yang lebih tinggi atau lebih rendah.

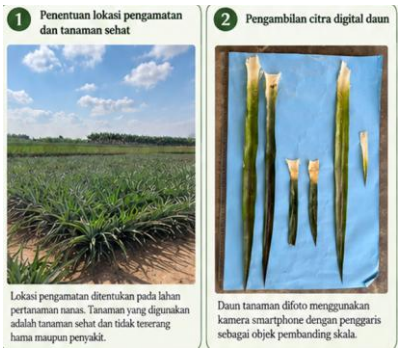
Sumber yang ditelaah memberikan dasar bagi penggunaan analisis citra, pemodelan luas daun nanas, dan evaluasi perbandingan metode, tetapi belum memberikan bukti langsung mengenai perbandingan ImageJ dan metode ALA pada sampel nanas dalam penelitian ini. Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini bertujuan membandingkan estimasi luas daun menggunakan ImageJ dan metode ALA pada tanaman nanas, menganalisis hubungan hasil kedua metode melalui regresi, serta mengevaluasi selisih hasil pengukurannya. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi ketepatan estimasi luas daun total tanaman nanas menggunakan metode Average Leaf Area (ALA), berdasarkan rata-rata luas per helai daun yang diperoleh melalui ImageJ dan jumlah daun, dengan membandingkannya terhadap luas daun total hasil pengukuran ImageJ pada tanaman pengujian.

BAHAN DAN METODE

Penelitian dilaksanakan pada bulan juli – Agustus 2026 di PG 1 Divisi 2 Plot 75 Lokasi 86, PT Great Giant Pineapple, Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung. Bahan penelitian berupa tanaman nanas (*Ananas comosus*) kultivar GP3 berumur 8 bulan yang berasal dari bibit *shucker* ukuran sedang kelas 3. Alat yang digunakan meliputi penggaris, kamera smartphone iPhone 13 beresolusi 12 MP, dan perangkat lunak ImageJ. Kertas karton berwarna biru digunakan sebagai latar belakang pengambilan citra daun tanaman nanas.

Tahapan yang digunakan ada dua tahap, yaitu penentuan faktor koreksi secara destruktif dan estimasi luas daun secara non destruktif. Tahap pertama menggunakan tiga tanaman sampel sehat yang dipilih secara *purposive sampling*. Tanaman dicabut, kemudian daunnya dipisahkan dan dikelompokkan berdasarkan posisi daun A–F. Panjang dan lebar maksimum setiap helai daun diukur, kemudian daun difoto menggunakan kamera smartphone dengan penggaris sebagai acuan skala dan kertas karton berwarna biru sebagai latar belakang. Validasi dilakukan dengan membandingkan luas hasil pengukuran ImageJ dengan luas objek standar potongan kertas ukuran 10 cm x 10 cm. Penggaris pada foto digunakan untuk kalibrasi skala, sedangkan pemotretan daun: latar biru, jarak kamera tetap, kamera tegak lurus terhadap bidang objek, serta objek dan penggaris berada pada bidang yang sama dan rata. Citra daun selanjutnya diproses menggunakan Image J untuk memperoleh luas daun dalam satuan cm^2.

Tahap kedua dilakukan secara nondestruktif pada 25 tanaman sampel yang dipilih menggunakan metode *purposive sampling*. Pengamatan meliputi tinggi tanaman serta pengukuran panjang dan lebar setiap helai daun tanpa mencabut tanaman. Estimasi luas setiap helai daun dihitung berdasarkan hasil perkalian panjang dan lebar daun dengan faktor koreksi rata-rata yang diperoleh pada tahap pertama. Luas daun total setiap tanaman kemudian dihitung dengan menjumlahkan estimasi luas seluruh helai daun pada tanaman tersebut.

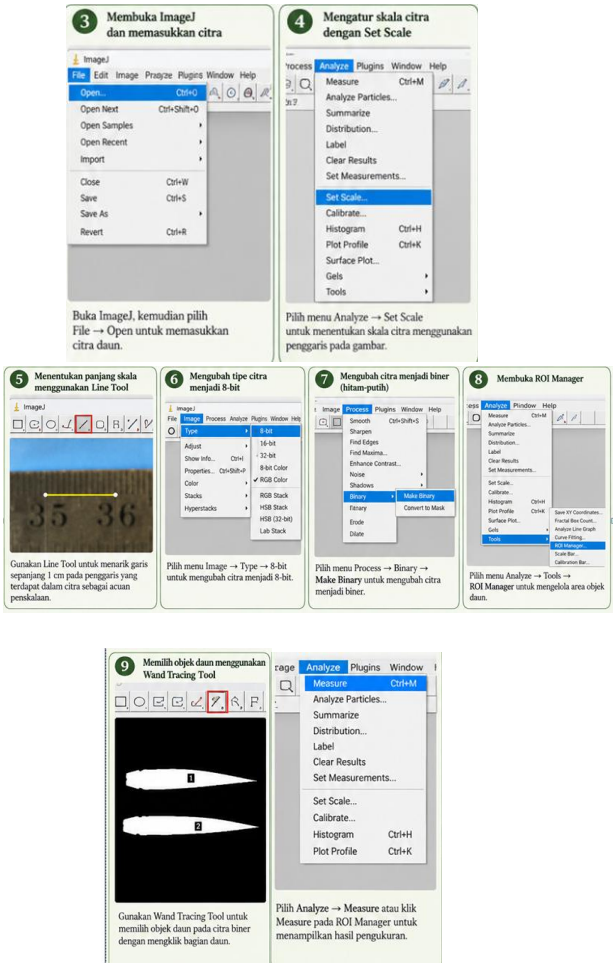


Gambar 1. Pengambilan data luas daun melalui citra digital

Tahapan Pengolahan Citra Luas Daun dengan ImageJ

Pengambilan foto daun dilakukan dengan jarak kamera terhadap bidang daun yang dipertahankan tetap pada seluruh sampel dengan jarak sekitar 35 cm. Kamera ditempatkan tegak lurus terhadap bidang pemotretan, sedangkan daun diletakkan dengan permukaan atas menghadap kamera dan orientasi sumbu panjang yang konsisten. Penggaris sebagai acuan skala ditempatkan pada bidang yang sama dengan daun. Setiap helai daun diratakan secara hati-hati tanpa diregangkan agar tidak mengubah bentuk dan dimensinya. Pada daun yang melengkung, bagian pangkal dan ujung ditahan menggunakan selotipd pada batas helaian daun yang dianalisis. Pemotretan dilakukan setelah seluruh helaian berada dalam kondisi rata, tidak terlipat, dan tidak saling menutupi sehingga batas daun dapat diidentifikasi dengan jelas pada ImageJ.

Pengolahan citra dilakukan menggunakan perangkat lunak ImageJ melalui beberapa tahapan. Citra daun dibuka melalui menu *File → Open*, kemudian skala citra ditetapkan melalui menu *Analyze → Set Scale* berdasarkan penggaris yang terdapat pada gambar. Panjang skala ditentukan menggunakan *Line Tool*, kemudian citra diubah menjadi format 8-bit melalui menu *Image → Type → 8-bit*. Citra selanjutnya dikonversi menjadi citra biner menggunakan menu *Process → Binary → Make Binary*. Area daun ditentukan melalui *ROI Manager* dan *Wand Tracing Tool*, kemudian seleksi objek disimpan untuk pengukuran luas daun. Hasil pengukuran digunakan untuk memperoleh luas daun aktual dalam satuan cm².



Gambar 2. Proses *scanning* luas daun dengan imageJ

Desain Penelitian dan Objek Pengukuran

Penelitian menggunakan pendekatan evaluasi metode untuk membandingkan estimasi luas daun total berdasarkan *Average Leaf Area* (ALA) dengan pengukuran ImageJ. Analisis luas daun total adalah satu tanaman, sedangkan pengukuran panjang dan lebar dilakukan pada setiap helaian daun yang diamati. Sebanyak 25 tanaman dipilih dan dihitung luas daun dengan metode ALA Daun yang disertakan adalah daun pada tanaman nanas umur 8 bulan, sehat dan daun yang membuka sempurna.

Pengukuran Luas Daun dengan Metode ALA

Luas daun total setiap tanaman merupakan penjumlahan luas seluruh helaian yang memenuhi kriteria:

$$A_t = \sum_{k=1}^{N_t} A_{tk}$$

Keterangan: A_t = luas daun total tanaman ke-t (cm²/tanaman); A_{tk} = luas helaian ke-k pada tanaman ke-t (cm²); N_t = jumlah helaian yang diukur.

Metode ALA diadaptasi dari Widaryanto et al. (2019), dengan mengganti pengukuran luas daun sampel menggunakan Leaf Area Meter menjadi ImageJ. Rata-rata luas per helai ditentukan dari kelompok pembentuk rata-rata:

$$\overline{A}_s = \frac{\sum_{j=1}^{m} A_{sj}}{\sum_{j=1}^{m} N_{sj}}$$

Keterangan: $\overline{A}_s$ = rata-rata luas per helai (cm²/helai); A_{sj} = luas daun total tanaman pembentuk rata-rata ke-j (cm²); N_{sj} = jumlah daunnya (helai); m = jumlah tanaman pembentuk rata-rata. Estimasi luas daun total tanaman pengujian dihitung menggunakan:

$$X_i = N_i \overline{A}_s$$

Keterangan: X_i = estimasi ALA tanaman pengujian ke-i (cm²/tanaman); N_i = jumlah daun tanaman tersebut. Hasil estimasi dipasangkan dengan luas daun total hasil ImageJ pada tanaman yang sama, dinyatakan sebagai Y_i. Rata-rata ALA ditetapkan sebelum evaluasi dan tidak disesuaikan menggunakan data pengujian.

Kerangka operasional penelitian

Penelitian diawali dengan penentuan contoh tanaman secara random pada umur dan varietas yang sama, pemberian kode, mengamati jumlah daun, menghitung luas daun per tanaman dengan image j, menghitung luas daun per tanaman dengan metode ALA. Pada pengujian, jumlah daun digunakan untuk menghitung estimasi ALA; pengukuran seluruh helaian dengan Image J menghasilkan luas daun total per tanaman. Hasil setiap pendekatan kemudian dianalisis regresi, ANOVA regresi, serta validasi.

Metode Pembanding, Analisis Regresi dan Validasi

Regresi linear

Model hubungan estimasi ALA (X_i) dengan pengukuran ImageJ (Y_i) adalah:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i$$

Persamaan hasil pendugaan:

$$\hat{Y}_i = a + bX_i$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}$$

$$a = \overline{Y} - b\overline{X}$$

Keterangan: a = estimasi intersep; b = estimasi kemiringan; β_0 dan β_1 = parameter populasi; ε_i = galat model; $\hat{Y}_i$ = prediksi regresi; $\overline{X}$ dan $\overline{Y}$ = rata-rata variabel kelompok pengujian; n = jumlah tanaman pengujian. Variabel X harus memiliki variasi agar regresi dapat dihitung.

Pengujian dilakukan pada taraf 5% dengan derajat bebas pembilang 1 dan penyebut $n - 2$. Nilai p < 0,05 menunjukkan hubungan linear yang signifikan. Hasil disajikan sebagai persamaan regresi, R², tabel ANOVA, dan diagram pencar yang dilengkapi garis regresi serta garis identitas Y = X.

Uji Validasi

Uji validasi pada kedua metode luas daun meliputi bias, MAE, dan RMSE dinyatakan dalam cm²/tanaman. Bias positif menunjukkan estimasi berlebih, sedangkan bias negatif menunjukkan estimasi lebih rendah daripada ImageJ. MAE dan RMSE yang lebih kecil menunjukkan kesalahan lebih kecil. Selisih X dan Y digunakan untuk menilai estimasi ALA asli; residual regresi digunakan untuk mengevaluasi model regresi. Signifikansi regresi dan R² tidak menjadi satu-satunya dasar penilaian kesesuaian (Kim dan Lee, 2022).

$$\text{Bias} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|X_i - Y_i|$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)^2}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

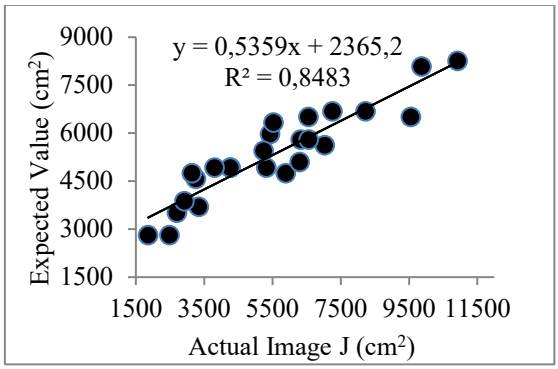
Tabel 1 menunjukkan bahwa hasil pengukuran Image J antara 1.863,87–10.928,28 cm²/tanaman, dengan rerata sebesar 5.526,13 cm²/tanaman. Estimasi menggunakan metode Average Leaf Area (ALA) berkisar antara 2.810,87–8.256,92 cm²/tanaman, dengan rerata sebesar 5.326,59 cm²/tanaman. Estimasi ALA lebih rendah sebesar 199,54 cm²/tanaman dibandingkan Image J. Rentang estimasi ALA yang lebih sempit menunjukkan bahwa penggunaan satu rata-rata luas per helai belum sepenuhnya merepresentasikan variasi luas daun per tanaman. Montès et al. (2024) menunjukkan bahwa keragaman ukuran, bentuk, dan warna daun menjadi tantangan dalam pengembangan metode pengukuran karakter daun.

helai daun dan menghasilkan estimasi ALA sebesar 6.500,13 cm²/tanaman. Namun, luas daun hasil ImageJ masing-masing sebesar 6.555,87 dan 9.559,91 cm²/tanaman. Akibatnya, error kedua tanaman berbeda, yaitu 0,85% dan 32,01%. Hal ini menunjukkan bahwa kesamaan jumlah daun belum menjamin kesamaan luas daun total. Santos et al. (2018) menunjukkan bahwa luas daun nanas 'Pérola' dapat diestimasi berdasarkan panjang dan lebarnya, kemudian digunakan untuk menduga luas daun total tanaman. Temuan tersebut memberikan dasar untuk mempertimbangkan variabel ukuran daun sebagai pelengkap jumlah daun,

Evaluasi kesalahan pada data pembentukan menghasilkan bias sebesar −199,54 cm²/tanaman, mean absolute error (MAE) sebesar 1.016,16 cm²/tanaman, dan root mean square error (RMSE) sebesar 1.236,75 cm²/tanaman. Bias negatif menunjukkan bahwa ALA secara rata-rata mengestimasi lebih rendah daripada ImageJ. Namun, besarnya MAE memperlihatkan bahwa selisih individual tetap cukup besar meskipun bias rata-rata lebih kecil. Selisih

Tabel 1. Perbandingan Luas Daun Image J dan Metode Ala

Tanaman	Luas Daun (cm²/tanaman)		Selisih absolut (cm²/tanaman)	Error (%)	Akurasi relatif* (%)
	Image J	ALA			
1	5.323,70	4.919,02	404,68	7,6	92,4
2	6.329,92	5.797,41	532,51	8,41	91,59
3	3.261,67	4.567,66	1.305,99	40,04	59,96
4	6.555,87	6.500,13	55,74	0,85	99,15
5	10.928,28	8.256,92	2.671,36	24,44	75,56
6	7.265,18	6.675,81	589,37	8,11	91,89
7	7.036,65	5.621,73	1.414,92	20,11	79,89
8	5.893,46	4.743,34	1.150,12	19,52	80,48
9	3.344,19	3.689,26	345,07	10,32	89,68
10	2.707,74	3.513,58	805,84	29,76	70,24
11	2.491,21	2.810,87	319,66	12,83	87,17
12	6.299,78	5.094,69	1.205,09	19,13	80,87
13	9.871,95	8.081,24	1.790,71	18,14	81,86
14	9.559,91	6.500,13	3.059,78	32,01	67,99
15	1.863,87	2.810,87	947	50,81	49,19
16	5.431,82	5.973,09	541,27	9,96	90,04
17	4.274,37	4.919,02	644,65	15,08	84,92
18	2.923,33	3.864,94	941,61	32,21	67,79
19	6.565,99	5.797,41	768,58	11,71	88,29
20	5.241,97	5.446,05	204,08	3,89	96,11
21	4.267,08	4.919,02	651,94	15,28	84,72
22	5.534,40	6.324,45	790,05	14,28	85,72
23	8.229,20	6.675,81	1.553,39	18,88	81,12
24	3.811,03	4.919,02	1.107,99	29,07	70,93
25	3.140,65	4.743,34	1.602,69	51,03	48,97
Rerata	**5.526,13**	**5.326,59**	**1.016,16**	**20,14**	**79,86**



Gambar 1. Hubungan antara Luas Daun Image J dan Metode ALA

Hubungan antara luas daun dengan image j dan metode ALA bersifat linear positif (Gambar 1). Nilai R^2 sebesar 0,8483 menunjukkan bahwa 84,83%. Koefisien determinasi tersebut bukan ukuran akurasi sebesar 84,83%. Rahimikhoob et al. (2023) menunjukkan regresi linear, jaringan saraf tiruan, adaptive neuro-fuzzy inference system, support vector regression, dan analisis citra pada daun selada. Analisis citra memberikan kinerja terbaik di antara pendekatan yang diuji. Temuan tersebut menunjukkan perlunya mengevaluasi alternatif pendekatan sesuai data dan karakter tanaman, tanpa mengasumsikan bahwa satu model akan memberikan kinerja yang sama pada seluruh spesies.

ImageJ sebagai acuan operasional tetap memiliki keterbatasan teknis. Koyama (2023) menjelaskan bahwa representasi daun tiga dimensi melalui citra dua dimensi dapat menyebabkan estimasi luas yang lebih rendah. Müller-Linow et al. (2019) juga menekankan pentingnya segmentasi dalam memisahkan objek tanaman dari latar belakang. Selain itu, Getman-Pickering et al. (2020) menemukan rata-rata perbedaan sebesar 3,2% antara ImageJ dan luas diketahui pada objek daun buatan. Hasil tersebut mendukung perlunya pengendalian kerataan daun, posisi kamera, kalibrasi skala, dan batas segmentasi. Akan tetapi, nilai error penelitian lain tidak dapat langsung dibandingkan dengan MAPE ALA dalam penelitian ini karena objek, satuan analisis, dan metode pembandingnya berbeda. Data yang tersedia juga belum dapat memisahkan kesalahan pengukuran ImageJ dari keterbatasan estimasi ALA.

Validasi internal menggunakan leave-one-out cross-validation (LOOCV) dilakukan dengan mengestimasi setiap tanaman menggunakan rata-rata luas per helai dari 24 tanaman lainnya. Hasilnya menunjukkan bias sebesar −207,85 cm²/tanaman, MAE sebesar 1.058,50 cm²/tanaman, RMSE sebesar 1.288,28 cm²/tanaman, dan MAPE sebesar 20,98%. Kesalahan tersebut sedikit lebih tinggi daripada evaluasi pada data pembentukan. Hasil ini menunjukkan bahwa kecenderungan kesalahan tetap muncul ketika tanaman yang diuji tidak digunakan dalam pembentukan rata-rata untuk prediksinya. Meskipun demikian, LOOCV merupakan validasi internal dan belum membuktikan kemampuan estimasi pada kelompok tanaman, kultivar, atau kondisi budidaya yang berbeda.

Implikasi penelitian ini adalah bahwa metode ALA berpotensi digunakan untuk pendugaan awal luas daun total nanas melalui jumlah daun dan koefisien rata-rata luas per helai. Namun, ketepatannya belum seragam antar tanaman dan belum cukup untuk menyatakan bahwa metode tersebut dapat menggantikan ImageJ untuk seluruh tujuan pengukuran. Pengembangan selanjutnya dapat menguji pengelompokan tanaman berdasarkan karakter ukuran daun, penambahan variabel biometrik, dan validasi pada tanaman baru. Penetapan kelayakan penggunaan ALA perlu mempertimbangkan batas kesalahan yang dapat diterima sesuai tujuan penelitian atau pengamatan budidaya.

SIMPULAN

Penelitian menunjukkan bahwa estimasi luas daun total tanaman nanas menggunakan metode *Average Leaf Area* (ALA) memiliki hubungan linear yang kuat dengan pengukuran ImageJ, dengan R^2 sebesar 0,8483. Artinya, hubungan regresi tersebut menjelaskan 84,83% variasi luas daun total hasil ImageJ, bukan menunjukkan akurasi estimasi sebesar 84,83%. Validasi silang LOOCV menghasilkan bias −207,85 cm²/tanaman, MAE 1.058,50 cm²/tanaman, RMSE 1.288,28 cm²/tanaman, dan MAPE 20,98%.

DAFTAR PUSTAKA

Dũng, M. N., and Minh, T. Á. 2021. Xác định diện tích lá và tán lá bằng phầm mềm ImageJ với hình chụp của iPhone 6s Plus [Measurement of leaf area and canopy by ImageJ software and digital image of iPhone 6s Plus]. Tạp chí Khoa học Đại học Cần Thơ, 57(6), 53–63. https://doi.org/10.22144/ctu.jvn.2021.172

Etame Kossi, G. M., Beyegue, H. D., Boukong, A., Ossogo, R. G., and Lidjo, L. 2025. Optimizing pineapple production under waterlogged soil condition in low input management using adequate ridge tillage height and plant density. *Frontiers in Plant Science, 16*, 1570261. https://doi.org/10.3389/fpls.2025.1570261

Getman-Pickering, Z. L., Campbell, A., Aflitto, N., Grele, A., Davis, J. K., and Ugine, T. A. 2020. LeafByte: A mobile application that measures leaf area and herbivory quickly and accurately. *Methods in Ecology and Evolution, 11*(2), 215–221. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13340

Kim, J., and Lee, J.-H. 2022. A novel graphical evaluation of agreement. *BMC Medical Research Methodology, 22*, 51. https://doi.org/10.1186/s12874-022-01532-w

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

Montès, N., Tosini, L., Laffont-Schwob, I., Le Bagousse-Pinguet, Y., and Folzer, H. 2024. FAMeLeS: A multispecies and fully automated method to measure morphological leaf traits. *Methods in Ecology and Evolution, 15*(3), 484–492. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14287

Müller-Linow, M., Wilhelm, J., Briese, C., Wojciechowski, T., Schurr, U., and Fiorani, F. 2019. Plant Screen Mobile: An open-source mobile device app for plant trait analysis. *Plant Methods, 15*, 2. https://doi.org/10.1186/s13007-019-0386-z

Rahimikhoob, H., Delshad, M., and Habibi, R. 2023. Leaf area estimation in lettuce: Comparison of artificial intelligence-based methods with image analysis technique. *Measurement, 222*, 113636. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113636

Santos, M. P. dos, Maia, V. M., Oliveira, F. S., Pegoraro, R. F., Santos, S. R. dos, and Aspiazú, I. 2018. Estimation of total leaf area and D leaf area of pineapple from biometric characteristics. *Revista Brasileira de Fruticultura, 40*(6), e-556. https://doi.org/10.1590/0100-29452018556

Suarez, E., Blaser, M., and Sutton, M. 2025. Automating leaf area measurement in citrus: The development and validation of a Python-based tool. *Applied Sciences, 15*(17), 9750. https://doi.org/10.3390/app15179750

Widaryanto, E., Roviq, M., and Saitama, A. 2019. An effective method of leaf area measurement of sweet potatoes. *Bioscience Research, 16*(2), 1423–1431. https://www.isisn.org/BR16(2)2019/1423-1431-16(2)2019BR19-214.pdf