

**ANALISIS NILAI KONSTANTA DAUN TANAMAN BELIMBING DAN SAWO BERBASIS
PENGOLAHAN CITRA DIGITAL**

***ANALYSIS OF LEAF CONSTANT VALUES OF STARFRUIT AND SAPODILLA PLANTS
BASED ON DIGITAL IMAGE PROCESSING***

Dzulkarnaen Sadewa¹, ¹Farchan Mushaf Al Ramadhani², Sajuri³

^{1,2,3}Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pekalongan

ABSTRACT

Leaf area is an important parameter in plant physiology studies because it is directly related to photosynthetic activity and plant productivity. However, conventional methods for measuring leaf area still face limitations in terms of cost, equipment, and efficiency. This study aimed to analyze the leaf constant values of starfruit and sapodilla plants based on digital image processing as a foundation for applying the Montgomery method. A total of 40 leaf samples from each species were analyzed using digital imagery via ImageJ software to obtain the measured leaf area, which was then compared to the predicted leaf area using the Montgomery equation. The resulting leaf constants were 0.520 for starfruit and 0.642 for sapodilla, with a stable and consistent value distribution. Prediction accuracy evaluation using R^2 , RMSE, NRMSE, NSE, and Willmott's index showed low error rates and very high model efficiency. These findings suggest that the obtained leaf constants are reliable for rapid and non-destructive estimation of leaf area. This method has the potential for broader application in supporting precision agriculture and efficient monitoring of tropical plant growth.

Key-words: digital image processing, leaf area, leaf constant, Montgomery method

INTISARI

Luas daun merupakan parameter penting dalam studi fisiologi tanaman karena berhubungan langsung dengan aktivitas fotosintesis dan produktivitas tanaman. Namun, pengukuran luas daun secara konvensional masih menghadapi keterbatasan biaya, alat, dan efisiensi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai konstanta daun tanaman belimbing dan sawo berbasis pengolahan citra digital sebagai dasar penerapan metode Montgomery. Sampel sebanyak 40 daun dari masing-masing spesies dianalisis menggunakan citra digital melalui perangkat lunak ImageJ untuk memperoleh luas daun terukur, yang kemudian dibandingkan dengan luas daun hasil prediksi menggunakan persamaan Montgomery. Konstanta daun yang diperoleh sebesar 0,520 untuk belimbing dan 0,642 untuk sawo, dengan distribusi nilai yang stabil dan konsisten. Evaluasi akurasi prediksi menggunakan parameter R^2 , RMSE, NRMSE, NSE, dan indeks Willmott menunjukkan tingkat kesalahan yang rendah dan efisiensi model yang sangat tinggi. Hasil ini menunjukkan bahwa nilai konstanta yang diperoleh dapat diandalkan untuk estimasi luas daun secara cepat dan non-destruktif. Metode ini berpotensi diterapkan lebih luas dalam mendukung pertanian presisi dan efisiensi pemantauan pertumbuhan tanaman tropis.

Kata kunci: konstanta daun, luas daun, metode Montgomery, pengolahan citra digital

¹ Alamat penulis untuk korespondensi: Farchan Mushaf Al Ramadhani. Email: farchan.mushaf@gmail.com

PENDAHULUAN

Tanaman hortikultura memiliki peran penting dalam sektor pertanian Indonesia, baik sebagai sumber pangan, ekonomi, maupun konservasi lingkungan (Afriyanti et al., 2023). Di antara berbagai parameter fisiologis tanaman, luas daun merupakan indikator vital untuk mengukur laju fotosintesis, pertumbuhan, dan produktivitas tanaman (Ali et al., 2022). Namun, pengukuran luas daun secara konvensional masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan alat, biaya tinggi, serta kebutuhan keahlian khusus (da Silva et al., 2025). Oleh karena itu, diperlukan metode alternatif yang lebih efisien, sederhana, dan terjangkau untuk mendapatkan data luas daun secara akurat.

Salah satu pendekatan yang digunakan untuk memperkirakan luas daun adalah metode Montgomery (1911), yang menggunakan persamaan Luas Daun (LA) = $L \times W \times k$, di mana L adalah panjang daun, W adalah lebar daun, dan k adalah konstanta spesifik daun suatu tanaman. Metode ini menawarkan kepraktisan dalam estimasi luas daun (Koyama, 2023) tanpa harus menggunakan perangkat mahal seperti *Leaf Area Meter* (LAM) atau metode lain seperti *gravimetri* dan *scanning*. Untuk dapat mengaplikasikan metode ini secara optimal, nilai konstanta daun (k) dari setiap spesies tanaman harus diketahui secara pasti (Meng et al., 2025). Namun demikian, data nilai konstanta daun pada berbagai jenis tanaman tropis, termasuk tanaman belimbing (*Averrhoa carambola*) dan sawo (*Manilkara zapota*), masih terbatas dan belum banyak tersedia dalam literatur ilmiah.

Keterbatasan data tersebut menghambat pemanfaatan metode Montgomery secara luas dalam penelitian maupun praktik agronomi di lapangan. Di sisi lain, perkembangan teknologi pengolahan citra digital telah membuka peluang baru dalam pengukuran parameter morfologi

daun secara non-destruktif, cepat, dan presisi tinggi (Li et al., 2023; Ngo et al., 2022). Meskipun teknologi ini semakin berkembang, integrasinya dengan analisis nilai konstanta daun untuk tanaman tropis masih relatif jarang dilakukan. Kondisi ini mencerminkan adanya celah penelitian yang perlu diisi guna memperkuat validitas dan kepraktisan metode pengukuran luas daun yang lebih sederhana dan efisien.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai konstanta daun tanaman belimbing dan sawo berbasis pengolahan citra digital sebagai langkah awal untuk memperluas penerapan metode Montgomery dalam pengukuran luas daun. Melalui pendekatan ini, diharapkan dapat diperoleh data yang akurat dan dapat digunakan secara praktis oleh petani, peneliti, maupun pemangku kepentingan di bidang pertanian. Temuan dari studi ini diharapkan mampu memberikan kontribusi terhadap pengembangan teknologi pertanian presisi serta memperkaya basis data morfometrik tanaman tropis lokal. Oleh karena itu, topik penelitian ini memiliki urgensi tinggi dalam mendukung inovasi metode pengukuran parameter tanaman yang lebih adaptif, efisien, dan aplikatif.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Agroteknologi Universitas Pekalongan dengan objek penelitian berupa daun tanaman belimbing varietas Dewi dan sawo varietas Manila. Masing-masing sampel terdiri dari 40 helai daun yang diambil secara acak dari tanaman sehat dan berumur seragam. Peralatan yang digunakan meliputi *smartphone* dengan resolusi kamera 12 MP, tripod vertikal dan horizontal, alas akrilik transparan, kertas manila putih sebagai latar, objek tuntun berukuran 5×5 cm, penggaris, serta *software* ImageJ dan *Microsoft Excel*.

Penelitian ini merupakan jenis

penelitian identifikasi kuantitatif yang bertujuan untuk memperoleh nilai konstanta daun berdasarkan metode Montgomery. Tahapan dimulai dari pengambilan citra digital daun menggunakan *smartphone* dengan posisi dan pencahayaan terkendali. Citra yang diperoleh kemudian dianalisis menggunakan *software* ImageJ (Al Ramadhani et al., 2024) untuk menghitung luas daun dalam satuan cm^2 (disebut sebagai Luas Daun Terukur). Setelah itu, dimensi daun yaitu panjang (L) dan lebar (W) diukur secara manual menggunakan penggaris dengan ketelitian 0,5 mm. Berdasarkan data luas daun dan dimensi tersebut, nilai konstanta daun (k) dihitung menggunakan Persamaan berikut:

$$k = \frac{LA}{L \times W}$$

Keterangan:

LA : luas daun (cm^2)
L : panjang daun (cm)
W : lebar daun (cm)

Seluruh nilai konstanta daun yang diperoleh dari setiap sampel kemudian dianalisis secara statistik deskriptif untuk mendapatkan rata-rata, standar deviasi, serta distribusi nilai melalui visualisasi *boxplot*. Analisis *boxplot* digunakan untuk menilai konsistensi nilai konstanta daun dari masing-masing spesies. Nilai konstanta yang stabil dan tersebar secara simetris menunjukkan bahwa nilai tersebut layak digunakan untuk memprediksi luas daun secara praktis. Setelah diperoleh nilai rata-rata konstanta daun yang representatif, nilai tersebut digunakan kembali dalam persamaan Montgomery untuk menghitung Luas Daun yang Diprediksi pada persamaan berikut:

$$LA_{\text{prediksi}} = L \times W \times k_{\text{rata-rata}}$$

Langkah berikutnya adalah melakukan evaluasi akurasi model dengan membandingkan Luas Daun Terukur dan Luas Daun yang Diprediksi. Analisis dilakukan menggunakan pendekatan statistik evaluatif (Al Ramadhani, 2024; Al Ramadhani et al., 2023), meliputi koefisien determinasi (R^2), *root mean square error* (RMSE), *normalized root mean square error* (NRMSE), *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), dan *Willmott's index of agreement* (d) (Persamaan 3-7). Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan tingkat hubungan linier yang kuat, sedangkan RMSE dan NRMSE mengukur tingkat kesalahan prediksi dengan semakin kecil nilainya menunjukkan akurasi yang tinggi. Indikator NSE dan *indeks Willmott* (d) digunakan untuk menilai efisiensi model prediksi dengan nilai mendekati 1 menunjukkan kinerja model yang sangat baik.

$$R^2 = \frac{\left[\sum (O_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{P}) \right]^2}{\left[\sum (O_i - \bar{O})^2 \times \sum (P_i - \bar{P})^2 \right]}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}}$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \times 100$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2}$$

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2}$$

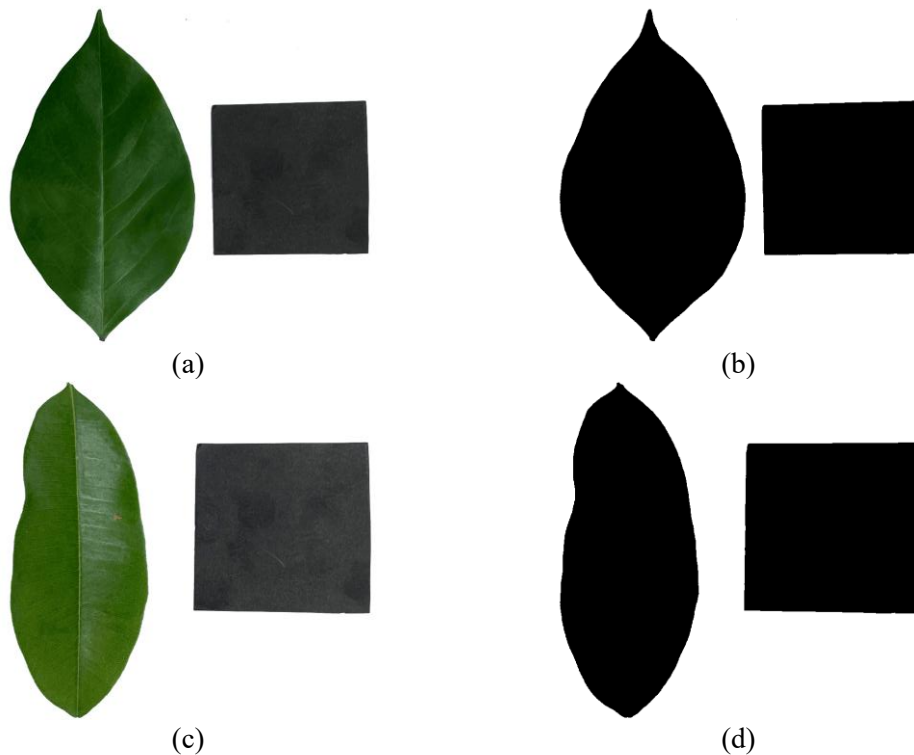
Keterangan:

O_i : data hasil pengamatan
 $\bar{O}$: rata-rata data hasil pengamatan
 P_i : data hasil prediksi
 $\bar{P}$: rata-rata data hasil prediksi
 n : jumlah data
 d : *index of agreement*

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan citra digital merupakan tahap krusial dalam penelitian ini untuk memperoleh data luas daun secara akurat dan non-destruktif (Sudianto & Husna, 2025). Gambar 1 memperlihatkan proses pengambilan dan pengolahan citra daun tanaman belimbing dan sawo. Pada Gambar 1(a) dan 1(c) ditampilkan citra asli daun belimbing dan sawo yang disandingkan dengan objek tuntun berwarna hitam berukuran 5×5 cm. Objek tuntun tersebut berfungsi sebagai acuan skala konversi dari satuan piksel ke satuan sentimeter persegi (cm^2) dalam perangkat lunak ImageJ,

sehingga memungkinkan luas daun dapat dihitung secara kuantitatif berdasarkan perbandingan jumlah piksel antara daun dan objek tuntun (Al Ramadhani et al., 2024). Setelah dilakukan kalibrasi skala, citra asli dikonversi menjadi citra biner (Gambar 1b dan 1d), yang memisahkan objek daun dari latar belakang dan menghasilkan area hitam solid yang merepresentasikan bentuk dan ukuran daun secara presisi (Kurmi & Gangwar, 2022). Hasil pengolahan ini menghasilkan luas daun terukur, yang menjadi dasar dalam perhitungan nilai konstanta daun melalui metode Montgomery.

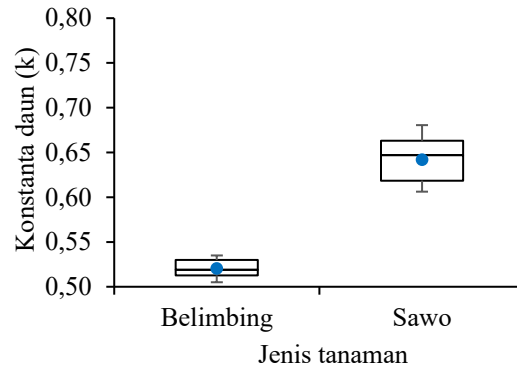
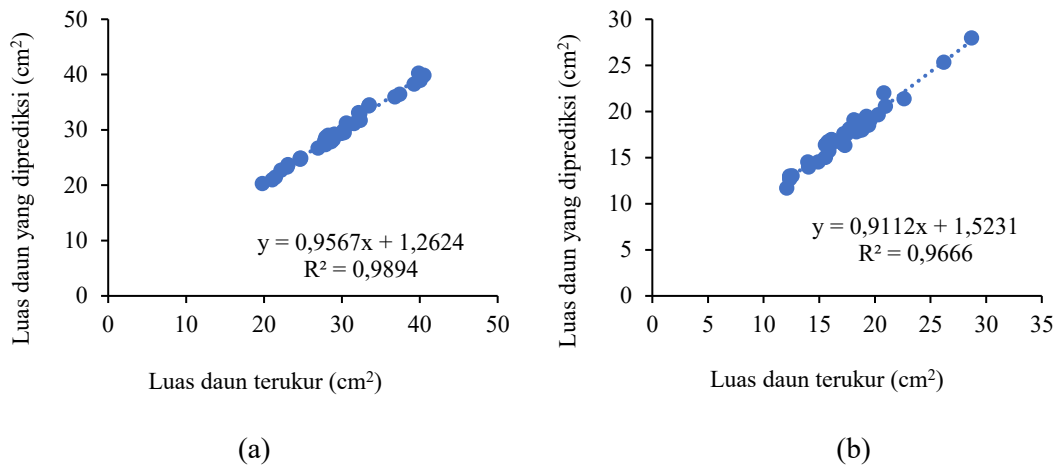


Gambar 1. Pengolahan dan Pengukuran Luas Daun Berbasis Pengolahan Citra Digital; (a) Citra Asli Daun Belimbing, (b) Citra Biner Daun Belimbing, (c) Citra Asli Daun Sawo, (d) Citra Biner Daun Sawo

Tabel 1. Hasil Pengukuran Luas Daun Berbasis Pengolahan Citra Digital Dan Pengukuran Dimensi Daun Untuk Daun Belimbing Dan Sawo

Sampel	Belimbing				Sawo			
	Luas Daun (cm ²)	Panjang (cm)	Lebar (cm)	<i>k</i>	Luas Daun (cm ²)	Panjang (cm)	Lebar (cm)	<i>k</i>
1	27,944	10	5,5	0,508	12,069	7	2,6	0,663
2	24,657	9,3	5,1	0,520	16,07	8,3	3,1	0,625
3	30,248	9,9	5,8	0,527	17,628	8,2	3,4	0,632
4	28,274	9,3	6	0,507	19,006	7,5	3,8	0,667
5	28,396	11	5	0,516	15,624	8	3,2	0,610
6	29,056	11	5,1	0,518	19,445	9,3	3,1	0,674
7	23,081	9,5	4,8	0,506	17,292	7,7	3,3	0,681
8	28,905	8,9	6,1	0,532	20,939	8,9	3,6	0,654
9	31,591	9,5	6,3	0,528	18,651	8	3,5	0,666
10	22,198	9,7	4,5	0,509	20,295	8,5	3,6	0,663
11	33,516	8,5	7,8	0,506	19,36	7,9	3,7	0,662
12	26,943	9,5	5,4	0,525	19,573	8,5	3,5	0,658
13	40,566	11,1	6,9	0,530	17,706	8,3	3,4	0,627
14	40,082	10,4	7,3	0,528	20,793	9,8	3,5	0,606
15	32,371	10,7	5,7	0,531	18,659	8,2	3,6	0,632
16	33,460	12	5,5	0,507	17,203	8,3	3,3	0,628
17	37,446	10	7	0,535	12,357	7,2	2,8	0,613
18	29,235	10	5,6	0,522	15,559	8,5	3	0,610
19	40,059	10,4	7,2	0,535	17,096	7,6	3,4	0,662
20	39,866	10,6	7,3	0,515	17,413	8,8	3,1	0,638
21	30,753	9,3	6,4	0,517	14,052	7,5	2,9	0,646
22	27,802	9,8	5,5	0,516	15,553	7,8	3	0,665
23	21,466	8,6	4,8	0,520	16,103	8,8	3	0,610
24	24,727	9,2	5,2	0,517	28,674	9,9	4,4	0,658
25	22,992	8	5,6	0,513	26,183	8,4	4,7	0,663
26	27,902	10,1	5,2	0,531	15,87	7	3,5	0,648
27	36,820	9,1	7,6	0,532	18,112	8,5	3,5	0,609
28	32,172	9,1	7	0,505	18,321	8,4	3,3	0,661
29	29,933	8,3	6,8	0,530	17,138	8,3	3,1	0,666
30	28,646	9,7	5,7	0,518	22,616	9	3,7	0,679
31	21,086	9,6	4,2	0,523	19,252	8,2	3,7	0,635
32	28,631	9,4	5,7	0,534	18,83	8,5	3,3	0,671
33	32,31	8,9	7,1	0,511	18,632	8,9	3,2	0,654
34	29,048	9,2	6,1	0,518	14,909	7,8	2,9	0,659
35	27,745	9,4	5,6	0,527	15,792	8,4	3,1	0,606
36	30,305	9	6,3	0,534	12,347	7,5	2,7	0,610
37	24,681	9,2	5,2	0,516	16,086	8,5	3,1	0,610
38	30,588	10	6	0,510	13,969	7,8	2,9	0,618
39	39,274	9,2	8	0,534	12,345	7,9	2,5	0,625
40	19,814	7,8	5	0,508	12,55	7,8	2,6	0,619

Sumber: Analisis Data Primer

Gambar 2. *Boxplot* Konstanta Daun Belimbing Dan Sawo

Gambar 3. Grafik Korelasi Luas Daun Terukur Berbasis Pengolahan Citra Digital Dengan Luas Daun Yang Diprediksi Berbasis Pengukuran Konstanta Daun; (a) Belimbing, dan (b) Sawo

Tabel 2. Hasil Analisis Statistik Luas Daun Terukur Dengan Luas Daun Yang Diprediksi Untuk Tanaman Belimbing Dan Sawo

Tanaman	RMSE	NRMSE	NSE	d
Alpukat	Belimbing	0,588	0,020	0,988
Manggis	Sawo	0,655	0,037	0,963

Sumber: Analisis Data Primer

Pengukuran luas daun terukur tanaman belimbing dan sawo dilakukan dengan pendekatan berbasis pengolahan citra digital untuk memperoleh luas daun yang akurat dan efisien (Madhavi et al., 2022; Tech et al., 2018). Selain luas daun, pengukuran dimensi panjang dan lebar daun juga dicatat untuk menghitung

nilai konstanta daun (k), yaitu rasio antara luas daun dengan hasil perkalian panjang dan lebar daun. Berdasarkan data pada Tabel 1, nilai konstanta daun untuk tanaman belimbing berkisar antara 0,505 hingga 0,535, sedangkan untuk tanaman sawo berkisar antara 0,606 hingga 0,681. Hal ini menunjukkan adanya

perbedaan karakter morfometrik antara kedua jenis daun (Chuanromanee et al., 2019). Nilai k yang relatif stabil pada masing-masing jenis daun mengindikasikan potensi penggunaan parameter ini sebagai faktor koreksi dalam prediksi luas daun tanpa perlu proses pengolahan citra secara berulang.

Hasil perolehan nilai konstanta daun (k) dari tanaman belimbing dan sawo pada Tabel 1 kemudian dianalisis secara statistik menggunakan visualisasi boxplot untuk menilai kestabilan dan distribusinya. Gambar 2 menunjukkan perbedaan yang cukup mencolok antara kedua spesies, nilai konstanta daun belimbing cenderung lebih rendah dan berada dalam kisaran sempit. Sebaliknya, konstanta daun sawo memiliki nilai yang lebih tinggi dengan rentang sebaran yang juga lebih luas.

Rata-rata nilai k daun belimbing sebesar 0,520, sedangkan pada daun sawo sebesar 0,642. Hasil ini mengindikasikan bahwa daun belimbing memiliki bentuk yang relatif lebih seragam dibandingkan daun sawo, yang ditunjukkan oleh penyebaran nilai konstanta yang lebih sempit. Konsistensi nilai konstanta ini penting dalam mendukung validitas metode Montgomery, karena konstanta yang stabil akan meningkatkan akurasi prediksi luas daun hanya berdasarkan panjang dan lebar daun.

Tahapan selanjutnya yaitu melakukan analisis korelasi antara luas daun terukur berdasarkan hasil pengolahan citra digital dengan luas daun yang diprediksi menggunakan nilai konstanta daun rata-rata. Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana konstanta daun yang diperoleh mampu merepresentasikan kondisi aktual daun dalam estimasi luasnya (Sala et al., 2015). Dengan menggunakan nilai konstanta rata-rata dalam persamaan Montgomery, luas daun prediktif dihitung dan dibandingkan terhadap luas daun aktual dari hasil analisis citra. Hubungan antara kedua variabel ini divisualisasikan dalam

bentuk grafik *scatter plot* korelasi yang ditampilkan pada Gambar 3.

Gambar 3 menunjukkan hubungan linier yang sangat kuat antara luas daun terukur dan luas daun yang diprediksi untuk kedua jenis tanaman. Pada daun belimbing (Gambar 3a), diperoleh persamaan regresi $y = 0,9567x + 1,2625$ dengan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9894, yang menunjukkan bahwa lebih dari 98% variasi dalam prediksi luas daun dapat dijelaskan oleh data hasil pengolahan citra. Sementara itu, daun sawo (Gambar 3b) juga menunjukkan korelasi yang tinggi dengan persamaan regresi $y = 0,9112x + 1,5231$ dan R^2 sebesar 0,9666. Hasil ini mengindikasikan bahwa metode prediksi menggunakan konstanta daun cukup akurat dan dapat diandalkan untuk kedua spesies, meskipun terdapat sedikit deviasi pada data sawo yang kemungkinan disebabkan oleh keragaman bentuk atau adanya pencilaan. Secara keseluruhan, grafik korelasi ini memperkuat validitas penggunaan konstanta daun yang diperoleh dari pendekatan pengolahan citra digital sebagai parameter penting dalam mengestimasi luas daun secara praktis dan efisien.

Tahapan selanjutnya adalah melakukan analisis statistik evaluatif untuk menilai akurasi model prediksi luas daun berdasarkan nilai konstanta daun yang diperoleh. Analisis dilakukan dengan membandingkan luas daun terukur hasil pengolahan citra digital dengan luas daun yang diprediksi menggunakan konstanta daun rata-rata dari masing-masing jenis tanaman. Parameter statistik yang digunakan meliputi *RMSE*, *NRMSE*, *NSE*, dan *Willmott's index of agreement* (d). Keempat parameter ini memberikan gambaran menyeluruh terkait performa model prediksi dari sisi kesalahan (error), efisiensi, dan tingkat kesesuaian antara nilai prediksi dan nilai aktual (Ramadhani et al 2023; Al Ramadhani et al 2024). Hasil analisis statistik tersebut dapat dilihat secara lengkap pada Tabel 2.

Berdasarkan Tabel 2, nilai *RMSE* dan *NRMSE* pada daun belimbing masing-masing adalah 0,588 dan 0,020, sedangkan pada daun sawo adalah 0,655 dan 0,037. Nilai-nilai tersebut menunjukkan bahwa tingkat kesalahan prediksi tergolong sangat rendah untuk kedua spesies tanaman, dengan prediksi pada belimbing sedikit lebih presisi dibandingkan sawo. Selain itu, nilai *NSE* sebesar 0,988 untuk belimbing dan 0,963 untuk sawo mengindikasikan bahwa model prediksi memiliki efisiensi yang sangat tinggi, karena nilai *NSE* mendekati 1 menandakan model yang hampir sempurna. Hal ini diperkuat oleh *Willmott's index of agreement* (*d*) yang juga sangat tinggi, yaitu 0,997 untuk belimbing dan 0,990 untuk sawo. Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa penggunaan konstanta daun hasil penelitian ini mampu menghasilkan estimasi luas daun yang sangat akurat dan andal.

Jika dibandingkan dengan studi terdahulu (Susilo, 2015), sebagian besar penelitian yang menggunakan metode Montgomery hanya menyebutkan nilai konstanta tanpa verifikasi akurasi prediksi secara statistik. Penelitian ini tidak hanya berhasil memperoleh konstanta daun spesifik untuk tanaman belimbing dan sawo, tetapi juga memverifikasi keandalannya melalui pendekatan statistik yang komprehensif (Sala et al., 2015; Yu et al., 2020). Temuan ini memiliki nilai kebaruan karena mengintegrasikan metode pengolahan citra digital dengan perhitungan konstanta daun untuk tanaman tropis lokal yang selama ini belum banyak dieksplorasi. Keuntungan praktis dari hasil penelitian ini adalah tersedianya parameter prediktif yang dapat digunakan oleh petani, peneliti, maupun pelaku agribisnis untuk mengestimasi luas daun secara cepat, murah, dan tanpa memerlukan alat khusus. Dengan demikian, konstanta daun yang diperoleh berpotensi besar untuk mendukung pertanian presisi dan efisiensi pengukuran

dalam studi ekofisiologi tanaman (Nasution et al., 2021; Sala et al., 2015).

KESIMPULAN

1. Nilai konstanta daun tanaman belimbing dan sawo berbasis pengolahan citra digital sebagai dasar penerapan metode Montgomery dalam estimasi luas daun secara efisien dan non-destruktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai konstanta daun yang diperoleh adalah sebesar 0,520 untuk tanaman belimbing dan 0,642 untuk tanaman sawo, yang masing-masing menunjukkan stabilitas dan konsistensi nilai berdasarkan analisis statistik deskriptif.
2. Evaluasi akurasi menggunakan parameter R^2 , *RMSE*, *NRMSE*, *NSE*, dan indeks Willmott menghasilkan nilai yang sangat baik, menunjukkan bahwa konstanta daun yang diperoleh valid untuk digunakan dalam memprediksi luas daun.

SARAN

1. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas pengujian validitas konstanta pada berbagai kondisi lingkungan dan fase pertumbuhan. Perluasan penerapan identifikasi konstanta pada jenis tanaman lainnya guna meningkatkan generalisasi dan aplikasi metode ini dalam pertanian presisi juga dapat dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriyanti, G., Mariya, A., Natalia, C., Nispuana, S., Wijaya, M. F., & Phalepi, M. Y. (2023). *The role of the agricultural sector on economic growth in Indonesia*. Indonesia Journal of Multidisciplinary Sciences (IJOMS), 2(1), 167–179. <https://doi.org/10.59066/ijoms.v2i1.325>

- Al Ramadhani, F. M. (2024). *Identifikasi nilai konstanta daun tanaman rambutan dan jambu air berbasis pengolahan citra digital*. Jurnal Penelitian Inovatif (JUPIN), 4(2), 655–664. <https://doi.org/10.54082/jupin.400>
- Al Ramadhani, F. M., Bowo, C., & Slameto. (2023). *The use of aquacrop model for soybean in various water availability within a lysimeter system*. Journal of Applied and Agricultural Science and Technology, 7(4), 399–413. <https://doi.org/10.55043/jaast.v7i4.153>
- Al Ramadhani, F. M., Sajuri, Amin, R., & Lutfiana, A. (2024). *Metode pengukuran luas daun tanaman menggunakan bantuan objek tuntun berbasis pengolahan citra digital*. Jurnal Pertanian Agros, 26(4), 1677–1688. <https://doi.org/10.37159/jpa.v26i4.4832>
- Ali, M. A. S. Al, Yousif, A. J. M. Al, & Mohsen, M. H. (2022). *The leaf area of forest trees: Its importance and how to measure it*. European Journal of Research Development and Sustainability (EJRDS), 3(5), 13–15.
- Chuanromanee, T. S., Cohen, J. I., & Ryan, G. L. (2019). *Morphological Analysis of Size and Shape (MASS): An integrative software program for morphometric analyses of leaves*. Applications in Plant Sciences, 7(9), Article e11288. <https://doi.org/10.1002/aps3.11288>
- da Silva, K. G. F., Maciel, L. M. da S., Villela, S. M., Pedrini, H., Morais, L. E., & Vieira, M. B. (2025). *Non-destructive leaf area estimation based on a semantic segmentation deep neural network*. Computers and Electronics in Agriculture, 237, 110551. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2025.110551>
- Koyama, K. (2023). *Leaf area estimation by photographing leaves sandwiched between transparent clear file folder sheets*. Horticulturae, 9(6), Article 709. <https://doi.org/10.3390/horticulturae9060709>
- Kurmi, Y., & Gangwar, S. (2022). *A leaf image localization-based algorithm for different crops disease classification*. Information Processing in Agriculture, 9(3), 456–474. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2021.03.001>
- 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, Article 1163700. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1163700>
- Madhavi, B. G. K., Bhujel, A., Kim, N. E., & Kim, H. T. (2022). *Measurement of overlapping leaf area of ice plants using digital image processing technique*. Agriculture, 12(9), Article 1321. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091321>
- Meng, Y., Ratkowsky, D. A., Yao, W., Heng, Y., & Shi, P. (2025). *The geometric series hypothesis of leaf area distribution and its link to the calculation of the total leaf area per shoot of Sasaella kongosanensis 'Aureostriatus'*. Plants, 14(1), Article 73. <https://doi.org/10.3390/plants14010073>
- Montgomery, E. G. (1911). *Correlation studies in corn* (Annual report No. 24). Agricultural Experimental Station.
- Nasution, I. S., Satriyo, P., Ichwana, Yolanda, S., & Alma, A. (2021). *Non-destructive measurement of leaf area and leaf number of hydroponic pak-choy plants (Brassica rapa)*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 644, Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/644/1/012004>

- Ngo, U. Q., Ngo, D. T., Nguyen, H. T., & Bui, T. D. (2022). *Digital image processing methods for estimating leaf area of cucumber plants*. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 25(1), 317–328. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v25.i1.pp317-328>
- Sala, F., Arsene, G. G., Iordănescu, O., & Boldea, M. (2015). *Leaf area constant model in optimizing foliar area measurement in plants: A case study in apple tree*. Scientia Horticulturae, 193, 218–224. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.07.008>
- 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.
- Susilo, D. E. H. (2015). *Identifikasi nilai konstanta bentuk daun untuk pengukuran luas daun metode panjang kali lebar pada tanaman hortikultura di tanah gambut*. Anterior Jurnal, 14(2), 139–146. <https://doi.org/10.33084/anterior.v14i2.178>
- Tech, A. R. B., da Silva, A. L. C., Meira, L. A., Oliveira, M. E. de, & Pereira, L. E. T. (2018). *Methods of image acquisition and software development for leaf area measurements in pastures*. Computers and Electronics in Agriculture, 153, 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.025>
- Yu, X., Shi, P., Schrader, J., & Niklas, K. J. (2020). *Nondestructive estimation of leaf area for 15 species of vines with different leaf shapes*. American Journal of Botany, 107(11), 1481–1490. <https://doi.org/10.1002/ajb2.1560>