

Identifikasi Nilai Konstanta Daun Kopi Arabika dan Robusta Menggunakan Pengolahan Citra Digital

M. Raditya Panca Ardana¹, Farchan Mushaf Al Ramadhani^{*2}, Sajuri³

¹Mahasiswa Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Pekalongan, Indonesia

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

Email: ²farchan.mushaf@gmail.com

Abstrak

Kopi arabika dan robusta merupakan komoditas dengan kontribusi signifikan terhadap ekspor pertanian Indonesia, sehingga diperlukan metode pemantauan pertumbuhan tanaman yang efisien. Metode pengukuran luas daun langsung di lapangan umumnya tidak efisien, sehingga pendekatan matematis sederhana seperti metode Montgomery menjadi alternatif yang praktis. Namun, nilai konstanta daun (k) spesifik untuk kedua jenis kopi belum tersedia, khususnya dalam konteks pengolahan citra digital. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai konstanta daun kopi arabika dan robusta berbasis data morfometrik hasil pengolahan citra digital. Pengambilan data dilakukan melalui pengambilan citra daun dengan latar belakang kontras menggunakan *smartphone*, kemudian citra diproses dengan *software* ImageJ untuk memperoleh luas daun aktual. Pengukuran panjang dan lebar daun dilakukan secara manual untuk menghitung nilai k , yang selanjutnya divalidasi melalui analisis statistik evaluatif. Nilai konstanta daun yang diperoleh yaitu sebesar 0,747 untuk arabika dan 0,701 untuk robusta, dengan nilai R^2 sebesar 0,9954 dan 0,9953. Evaluasi statistik menunjukkan $RMSE$ dan $NRMSE$ rendah serta nilai NSE dan indeks Willmott (d) mendekati 1. Hasil ini membuka peluang penerapan metode estimasi luas daun secara cepat dan presisi dalam praktik pertanian kopi skala lapangan dan riset agronomi.

Kata Kunci: Kopi Arabika, Kopi Robusta, Konstanta Daun, Luas Daun, Pengolahan Citra

Abstract

Arabica and robusta coffee are key commodities with significant contributions to Indonesia's agricultural exports, necessitating efficient methods for monitoring plant growth. Direct leaf area measurement in the field is generally inefficient; thus, simple mathematical approaches such as the Montgomery method offer a practical alternative. However, specific leaf constant (k) values for both coffee types remain unavailable, particularly within the context of digital image processing. This study aims to identify the leaf constant values of arabica and robusta coffee based on morphometric data extracted from digital image analysis. Data collection involved capturing leaf images with a contrasting background using a smartphone, followed by image processing with ImageJ software to obtain actual leaf area. Leaf length and width were measured manually to calculate the k values, which were then validated through statistical evaluation. The resulting leaf constants were 0.747 for arabica and 0.701 for robusta, with determination coefficients (R^2) of 0.9954 and 0.9953, respectively. Statistical evaluations showed low RMSE and NRMSE values, along with NSE and Willmott's index (d) values approaching 1. These results open up opportunities for the application of rapid and precise leaf area estimation methods in field-scale coffee farming practices and agronomic research.

Keywords: Arabica Coffee, Robusta Coffee, Leaf Constant, Leaf Area, Image Processing

1. PENDAHULUAN

Tanaman kopi merupakan salah satu komoditas perkebunan strategis yang memiliki nilai ekonomi tinggi, baik di tingkat nasional maupun global (Afiatan et al., 2024; Rico et al., 2021). Dua jenis kopi yang paling banyak dibudidayakan dan dikonsumsi di dunia adalah kopi arabika (*Coffea arabica*) dan kopi robusta (*Coffea canephora*) (Gaspar & Ramos, 2016), dengan kontribusi terhadap produksi kopi global masing-masing sekitar 60% dan 40% (Krishnan et al., 2021). Di Indonesia, kopi merupakan komoditas unggulan ekspor, di mana pada tahun 2023 ekspor kopi mencapai sebesar 279.937 ton (Badan Pusat Statistik, 2024). Untuk meningkatkan produktivitas dan efisiensi budidaya tanaman kopi,

diperlukan metode evaluasi pertumbuhan tanaman yang cepat, akurat, dan efisien, salah satunya melalui estimasi luas daun sebagai indikator penting pertumbuhan tanaman.

Pengukuran luas daun secara langsung di lapangan sering kali menghadapi berbagai kendala teknis dan biaya. Beberapa metode seperti penggunaan kertas milimeter blok, metode gravimetri, pemindaian (*scanning*), serta alat *Leaf Area Meter* (LAM) dinilai kurang efisien karena membutuhkan waktu lama, biaya tinggi, dan perlakuan destruktif terhadap sampel daun (Al Ramadhani et al., 2024; Sudianto & Husna, 2025). Di sisi lain, metode estimasi luas daun menggunakan pendekatan matematis sederhana, seperti metode Montgomery ($LA = L \times W \times k$), menawarkan alternatif praktis dan efisien (Sala et al., 2015). Namun, nilai konstanta daun (k) dalam metode ini bersifat spesifik terhadap jenis tanaman (Al Ramadhani, 2024; Sala et al., 2015) dan belum tersedia secara pasti untuk tanaman kopi arabika dan robusta, terutama dalam konteks pengukuran berbasis citra digital.

Celah inilah yang menjadi fokus dari penelitian ini, yaitu belum tersedianya informasi nilai konstanta daun kopi arabika dan robusta yang diperoleh dari data morfometrik hasil pengolahan citra digital. Pada berbagai studi, pengolahan citra digital telah terbukti efektif dalam mengekstraksi parameter morfologi daun seperti panjang (L) dan lebar (W) secara non-destruktif dan efisien (da Silva et al., 2025a; da Silva et al., 2025b). Namun demikian, belum banyak penelitian yang secara sistematis mengidentifikasi nilai konstanta daun dari spesies kopi tersebut menggunakan pendekatan ini. Oleh karena itu, diperlukan riset yang mampu menghubungkan data hasil pengolahan citra digital dengan pendekatan matematis sederhana untuk estimasi luas daun.

Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi nilai konstanta daun tanaman kopi arabika dan robusta berbasis pengolahan citra digital, sehingga diharapkan dapat digunakan dalam perhitungan cepat luas daun menggunakan metode Montgomery. Dengan adanya konstanta ini, pengukuran luas daun menjadi lebih praktis, hemat biaya, dan aplikatif di berbagai skala budidaya, mulai dari penelitian hingga praktik lapangan. Mengingat daun merupakan organ utama dalam proses fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif tanaman, maka luas daun berkorelasi erat dengan produktivitas kopi (Júnior et al 2022; Taugourdeau et al 2014). Oleh karena itu, identifikasi nilai konstanta daun ini secara tidak langsung mendukung peningkatan produksi kopi melalui optimalisasi pertumbuhan tanaman yang dapat dipantau secara kuantitatif dan efisien. Lebih jauh, hasil penelitian ini akan memberikan kontribusi penting dalam pengembangan metode pertanian presisi (*precision agriculture*), khususnya dalam pemantauan pertumbuhan tanaman kopi secara efisien dan berkelanjutan. Dengan pendekatan ini, petani dan peneliti dapat mengakses teknologi yang lebih murah namun tetap akurat dalam mendukung pengambilan keputusan agronomis.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Pekalongan. Sampel daun kopi arabika dan kopi robusta diambil dari tanaman yang sehat yang ada di Kabupaten Pekalongan. Penelitian dilaksanakan dari Februari hingga Mei 2025.

2.2. Alat dan Bahan

Bahan utama dalam penelitian ini adalah daun segar dari tanaman kopi arabika dan robusta, masing-masing sebanyak 40 helai daun utuh. Alat yang digunakan meliputi *smartphone* dengan resolusi kamera 12 MP, tripod vertikal, papan akrilik transparan, kertas manila putih sebagai latar belakang, objek tuntun berukuran 5×5 cm sebagai skala referensi, penggaris (akurasi 0,5 mm), laptop, dan perangkat lunak pengolahan citra ImageJ. Semua perangkat tersebut digunakan untuk mengukur luas daun dan dimensi daun secara presisi dan non-destruktif.

2.3. Prosedur Pengambilan dan Pengolahan Data

Langkah awal adalah pengambilan citra digital daun menggunakan *smartphone* yang dipasang pada tripod vertikal, dengan memastikan pencahayaan merata dan latar belakang kontras tinggi untuk

memudahkan segmentasi citra. Setiap daun difoto bersama objek tuntun untuk kalibrasi ukuran. Setelah itu, citra daun diproses menggunakan *software* ImageJ 1.51j8 untuk menghitung luas daun terukur (*actual leaf area*) dalam satuan cm^2 berdasarkan perhitungan jumlah piksel yang telah dikonversi terhadap skala aktual.

Langkah berikutnya adalah pengukuran panjang dan lebar daun secara manual menggunakan penggaris. Data panjang (L) dan lebar (W) daun tersebut kemudian digunakan untuk menghitung nilai konstanta daun (k) berdasarkan rumus Montgomery (1911) dalam Persamaan 1.

$$k = \frac{LA}{L \times W} \quad (1)$$

dengan LA = luas daun terukur (dari pengolahan citra), L = panjang daun (cm), dan W = lebar daun.

2.4. Analisis Data dan Evaluasi Model

Nilai konstanta daun dari masing-masing sampel dianalisis menggunakan *software* Microsoft Excel 2021 untuk mendapatkan nilai rata-rata, simpangan baku, kuartil, serta visualisasi sebaran data melalui boxplot. Jika sebaran data menunjukkan pola yang normal dan simetris, maka nilai rata-rata konstanta daun digunakan sebagai dasar dalam perhitungan luas daun yang diprediksi (*predicted leaf area*) dengan menggunakan rumus Montgomery dalam Persamaan 2.

$$LA = L \times W \times k \quad (2)$$

Perbandingan antara luas daun terukur (*actual leaf area*) dengan luas daun yang diprediksi (*predicted leaf area*) kemudian dianalisis menggunakan metode statistik evaluatif. Parameter statistik yang digunakan untuk menilai akurasi model prediksi adalah koefisien determinasi, *root mean square error* ($RMSE$), *normalized root mean square error* ($NRMSE$), *Nash-Sutcliffe Efficiency*, dan *Willmott's index of Agreement* (d) (Al Ramadhani, 2024; Al Ramadhani et al., 2023). Koefisien determinasi atau R^2 menunjukkan kekuatan hubungan linear antara luas daun terukur dan luas daun yang diprediksi. $RMSE$ untuk mengukur besarnya galat rata-rata kuadrat. $NRMSE$ merupakan $RMSE$ yang dinormalisasi terhadap rata-rata pengamatan. NSE digunakan untuk mengetahui efisiensi prediksi terhadap nilai rata-rata observasi. Sedangkan *Willmott's Index of Agreement* (d) digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian antara prediksi dan observasi. Rumus perhitungan masing-masing indikator dapat dilihat pada Persamaan 3-7.

$$R^2 = \frac{[\sum(O_i - \bar{O}) - (P_i - \bar{P})]^2}{(\sum(O_i - \bar{O})^2) \times (\sum(P_i - \bar{P})^2)} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (4)$$

$$NRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum(P_i - O_i)^2}{n}} \times 100 \quad (5)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(O_i - \bar{O})^2} \quad (6)$$

$$d = 1 - \frac{\sum(P_i - O_i)^2}{\sum(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (7)$$

Keterangan:

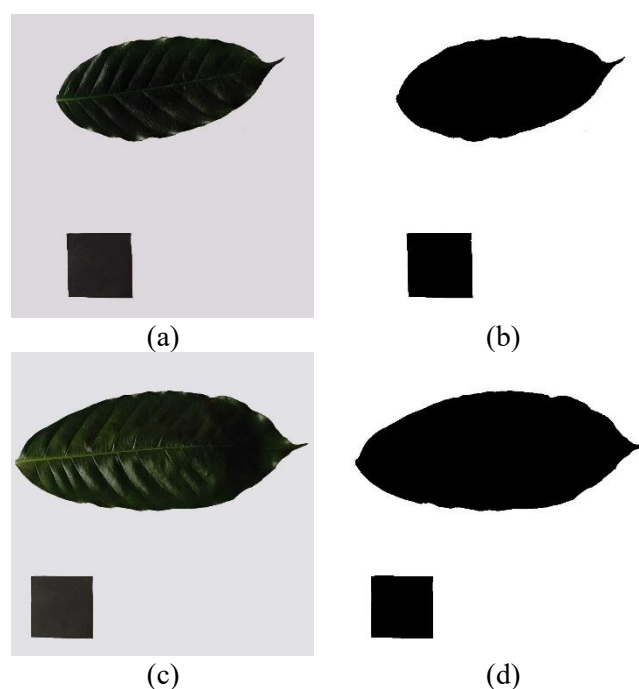
O_i : data hasil pengamatan
 $\bar{O}$: rata-rata data hasil pengamatan
 P_i : data hasil prediksi

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

Evaluasi terhadap akurasi prediksi dilakukan dengan membandingkan nilai R^2 , $RMSE$, $NRMSE$, NSE , dan d terhadap standar penilaian yang umum digunakan dalam validasi model prediksi (da Silva et al., 2025b; Sala et al., 2015). Nilai R^2 , NSE , dan d mendekati 1 menunjukkan akurasi yang tinggi, sedangkan nilai $RMSE$ dan $NRMSE$ yang rendah menunjukkan tingkat kesalahan prediksi yang rendah (Al Ramadhani, 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan citra digital menjadi salah satu pendekatan yang efektif dalam mengukur luas daun secara non-destruktif, efisien, dan akurat (Zhang, 2020). Pada penelitian ini, pengambilan citra daun kopi arabika dan robusta dilakukan dengan menggunakan latar belakang kontras dan objek tuntun berukuran 5×5 cm sebagai acuan skala. Gambar 1 menunjukkan tahapan awal pengolahan citra digital, dimulai dari citra asli daun (Gambar 1a dan 1c) hingga hasil segmentasi menggunakan metode *threshold* (Gambar 1b dan 1d). Proses *thresholding* bertujuan untuk memisahkan objek daun dari latar belakang sehingga diperoleh citra daun dalam bentuk biner (hitam-putih) yang dapat diolah lebih lanjut oleh *software ImageJ*. Hasil citra biner inilah yang kemudian digunakan untuk menghitung luas daun aktual (luas daun terukur). Dari visualisasi ini terlihat bahwa bentuk dan batas daun dapat teridentifikasi dengan jelas, yang menunjukkan metode ini layak untuk digunakan dalam pengukuran morfometrik daun kopi.



Gambar 1. Pengolahan dan pengukuran luas daun berbasis pengolahan citra digital; (a) citra asli daun kopi arabika, (b) citra hasil *threshold* daun kopi arabika, (c) citra asli daun kopi robusta, dan (d) citra hasil *threshold* kopi robusta

Pengukuran luas daun terukur dari tanaman kopi arabika dan robusta dilakukan dengan memanfaatkan pengolahan citra digital menggunakan *software ImageJ* serta pengukuran dimensi daun (panjang dan lebar) secara manual. Data hasil pengukuran tersebut disajikan dalam Tabel 1, yang mencakup luas daun terukur (dalam cm²), panjang daun, lebar daun, serta nilai konstanta daun (k) yang dihitung menggunakan rumus Montgomery. Berdasarkan data tersebut, nilai konstanta daun kopi arabika bervariasi antara 0,736 hingga 0,764, sedangkan kopi robusta menunjukkan variasi nilai k antara 0,686 hingga 0,714. Rata-rata konstanta daun yang diperoleh dari 40 sampel adalah sebesar 0,747 untuk

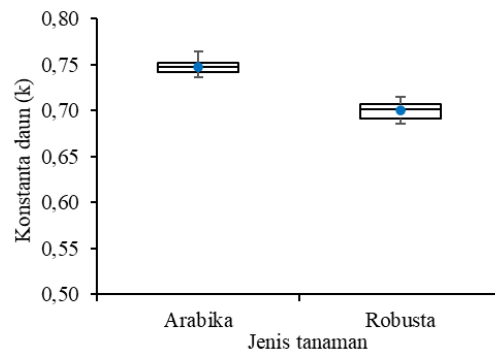
kopi arabika dan 0,701 untuk kopi robusta, yang menunjukkan nilai k dari kopi arabika sedikit lebih tinggi dibandingkan robusta. Hal ini dapat mengindikasikan adanya perbedaan struktur morfologis antara kedua jenis daun, khususnya dalam hal perbandingan antara panjang, lebar, dan luas daun.

Tabel 1. Hasil pengukuran luas daun terukur berbasis pengolahan citra digital dan pengukuran dimensi daun untuk daun kopi arabika dan robusta

Sampel	Kopi Arabika				Kopi Robusta			
	Luas Daun Terukur (cm ²)	Panjang (cm)	Lebar (cm)	k	Luas Daun Terukur (cm ²)	Panjang (cm)	Lebar (cm)	k
1	79,192	15,6	6,9	0,736	135,890	24,3	8	0,699
2	80,009	15	7	0,762	206,050	26,7	11	0,702
3	93,269	16,5	7,4	0,764	132,800	21,2	9,1	0,688
4	54,567	12,1	6,1	0,739	160,960	24,5	9,3	0,706
5	78,912	15,7	6,7	0,750	129,810	21,9	8,6	0,689
6	78,481	15,8	6,6	0,753	112,460	20,8	7,8	0,693
7	64,888	14,1	6,1	0,754	117,890	20,1	8,3	0,707
8	98,871	18,4	7,3	0,736	178,980	24,9	10,1	0,712
9	84,119	15,8	7,2	0,739	194,580	26,2	10,5	0,707
10	77,455	14,8	7,1	0,737	201,020	26,1	10,9	0,707
11	70,871	13,5	6,9	0,761	120,140	21,4	8	0,702
12	70,312	14,1	6,7	0,744	144,830	22,7	9,2	0,693
13	71,855	13,6	7	0,755	168,900	21,6	11,3	0,692
14	90,240	16,6	7,3	0,745	161,870	23,1	9,9	0,708
15	74,061	15,7	6,4	0,737	181,530	24,2	10,5	0,714
16	82,031	15,1	7,3	0,744	204,790	24,9	11,9	0,691
17	65,617	14,3	6,1	0,752	160,050	23,4	9,6	0,712
18	80,876	14,7	7,4	0,743	138,930	22,1	9	0,698
19	71,918	14,9	6,5	0,743	189,670	22,5	12,2	0,691
20	79,977	14,9	7,1	0,756	144,250	21,1	9,9	0,691
21	83,456	16,1	6,9	0,751	143,460	22,9	8,9	0,704
22	76,645	15,7	6,5	0,751	181,650	22,1	11,7	0,703
23	71,514	14,2	6,8	0,741	174,890	24,5	10	0,714
24	67,603	14,1	6,5	0,738	195,340	23,2	12,2	0,690
25	69,222	14,8	6,3	0,742	142,510	20,2	10,2	0,692
26	65,095	14	6,2	0,750	146,760	20	10,7	0,686
27	100,995	17,1	7,8	0,757	191,460	24,6	10,9	0,714
28	82,060	16,3	6,8	0,740	145,290	21,8	9,7	0,687
29	103,054	17,8	7,8	0,742	190,760	24,5	11,1	0,701
30	75,242	14	7,2	0,746	189,980	23,6	11,7	0,688
31	65,788	13,6	6,4	0,756	228,330	26,9	12	0,707
32	78,175	15,5	6,7	0,753	177,380	22,6	11	0,714
33	93,359	16,9	7,4	0,747	125,880	20,5	8,9	0,690
34	104,159	18	7,7	0,752	209,610	26,3	11,2	0,712
35	63,972	13,2	6,5	0,746	193,340	26,2	10,6	0,696
36	74,965	13,3	7,5	0,752	198,510	24,6	11,4	0,708
37	72,949	15	6,5	0,748	238,230	26,9	12,6	0,703
38	88,436	16,4	7,2	0,749	139,180	21,2	9,2	0,714
39	83,631	14,7	7,7	0,739	200,580	25,8	11	0,707
40	100,458	17,2	7,8	0,749	187,420	24,2	11,2	0,691

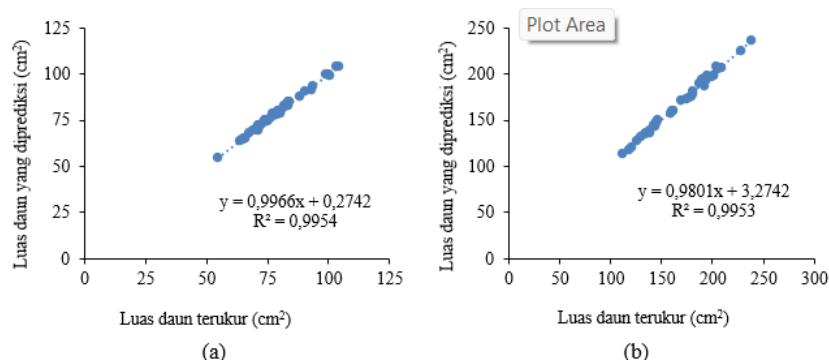
Visualisasi distribusi nilai konstanta daun kopi arabika dan robusta disajikan dalam bentuk boxplot pada Gambar 2. Berdasarkan gambar tersebut, terlihat bahwa nilai konstanta daun kopi arabika memiliki sebaran yang lebih tinggi dengan nilai median sebesar 0,747, sedangkan kopi robusta memiliki median sebesar 0,702. Sebaran nilai pada kedua jenis tanaman menunjukkan persebaran data yang relatif simetris dan tidak terdapat nilai pencilan (*outlier*), yang mengindikasikan bahwa data cukup homogen dan tidak ada nilai ekstrem yang menyimpang. Panjang *whisker* pada boxplot kopi arabika sedikit lebih

panjang dibandingkan robusta, yang mengindikasikan variasi nilai k arabika cenderung lebih luas namun tetap dalam batas wajar. Nilai kuartil atas (Q_3) dan kuartil bawah (Q_1) dari kedua jenis kopi menunjukkan konstanta daun kopi arabika secara umum lebih tinggi dibandingkan robusta, yang mencerminkan adanya perbedaan struktur morfologis antar kedua spesies kopi tersebut. Karena sebaran nilai konstanta pada kedua jenis kopi relatif homogen dan tidak menunjukkan penyimpangan ekstrem, maka rata-rata nilai konstanta yang diperoleh dapat digunakan untuk menghitung luas daun yang diprediksi menggunakan metode Montgomery (Al Ramadhani, 2024; Kruschke, 2015), yang selanjutnya dibandingkan dengan luas daun terukur untuk menguji validitas model prediktif tersebut.



Gambar 2. Boxplot konstanta daun kopi arabika dan robusta

Berdasarkan sebaran nilai konstanta daun yang relatif homogen dan tidak menunjukkan penyimpangan ekstrem, maka langkah berikutnya dalam penelitian ini adalah menguji performa prediktif dari metode Montgomery dengan menggunakan nilai rata-rata konstanta daun untuk masing-masing jenis kopi. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan luas daun yang diprediksi menggunakan persamaan Montgomery (panjang, lebar, dan nilai konstanta rata-rata) terhadap luas daun terukur yang diperoleh dari pengolahan citra digital. Analisis ini berfungsi untuk menilai seberapa akurat pendekatan matematis sederhana tersebut dalam merepresentasikan kondisi aktual morfometrik daun. Hubungan antara nilai prediksi dan pengukuran aktual divisualisasikan dalam bentuk grafik korelasi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Korelasi luas daun terukur hasil pengolahan citra digital dengan luas daun yang diprediksi hasil pengukuran dengan metode konstanta daun; (a) kopi arabika, dan (b) kopi robusta

Gambar 3 menunjukkan hasil korelasi antara luas daun terukur dan luas daun yang diprediksi pada kedua jenis tanaman kopi. Gambar 3a menunjukkan hasil untuk kopi arabika dengan persamaan regresi linier $y = 0,9966x + 0,2742$ dan koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9954, sedangkan Gambar 3b untuk kopi robusta menunjukkan persamaan $y = 0,9801x + 3,2742$ dengan R^2 sebesar 0,9953. Nilai R^2 yang sangat tinggi pada kedua grafik menunjukkan adanya hubungan linear yang sangat kuat antara data hasil pengolahan citra digital dan hasil prediksi menggunakan metode konstanta daun. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan Montgomery yang dikalibrasi dengan konstanta hasil penelitian mampu memprediksi luas daun dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Perbedaan kecil dalam

kemiringan garis regresi dan *intercept* antara arabika dan robusta mencerminkan variasi morfologi daun. Namun secara umum, keduanya menunjukkan model ini sangat reliabel untuk diterapkan pada kedua jenis kopi.

Setelah dilakukan analisis korelasi antara luas daun terukur dan luas daun yang diprediksi, tahapan selanjutnya adalah melakukan evaluasi statistik untuk mengukur akurasi dan performa model prediksi yang digunakan. Evaluasi ini penting untuk mengetahui seberapa besar galat (*error*) yang terjadi serta seberapa baik model dalam merepresentasikan data aktual. Beberapa parameter statistik yang digunakan dalam analisis ini meliputi *Root Mean Square Error (RMSE)*, *Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)*, *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)*, dan *Willmott's Index of Agreement (d)*. Hasil analisis statistik tersebut disajikan dalam Tabel 2, yang mencerminkan kualitas model prediksi luas daun berbasis konstanta daun untuk masing-masing jenis kopi.

Tabel 2. Hasil analisis statistik luas daun terukur hasil pengolahan citra digital dengan luas daun yang diprediksi hasil pengukuran dengan metode konstanta daun

Tanaman	RMSE	NRMSE	NSE	d
Kopi Arabika	0.795	0.01	0.995	0.999
Kopi Robusta	2.207	0.013	0.995	0.999

Tabel 2 menunjukkan nilai *RMSE* untuk kopi arabika sebesar 0,795 cm² dan *NRMSE* sebesar 0,01, sedangkan kopi robusta memiliki nilai *RMSE* sebesar 2,207 cm² dengan *NRMSE* sebesar 0,013. Nilai *RMSE* yang relatif rendah pada kedua jenis kopi mengindikasikan bahwa kesalahan prediksi luas daun tergolong kecil. Selain itu, nilai *NSE* sebesar 0,995 baik pada arabika maupun robusta yang menunjukkan model prediktif memiliki efisiensi yang sangat tinggi dalam merepresentasikan variasi data observasi dibandingkan dengan nilai rata-rata. Indeks kesesuaian Willmott (*d*) juga sangat tinggi, yaitu 0,999 pada kedua jenis kopi, yang mengindikasikan tingkat kesesuaian yang hampir sempurna antara nilai prediksi dan nilai aktual (Al Ramadhani et al., 2023). Keseluruhan hasil ini memperkuat bahwa metode estimasi luas daun menggunakan konstanta yang diperoleh dari pengolahan citra digital sangat akurat dan dapat diandalkan.

Secara umum, temuan penelitian ini sejalan dengan hasil studi serupa yang menggunakan metode matematis sederhana untuk estimasi luas daun, seperti pada tanaman jagung, kedelai, dan cabai (de Sá et al., 2022; Elings, 2000; Nazeri et al., 2021), yang juga menunjukkan nilai *R*² dan *NSE* tinggi ketika dikombinasikan dengan pengolahan citra digital. Namun, penelitian ini memiliki keunggulan tersendiri karena berhasil mengidentifikasi nilai konstanta daun spesifik untuk dua varietas kopi utama secara empiris melalui pendekatan non-destruktif dan berbasis teknologi digital. Keberhasilan ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan metode pertanian presisi, karena memungkinkan pengukuran cepat, murah, dan efisien terhadap parameter pertumbuhan tanaman secara akurat (Fu et al., 2025; Sala et al., 2021). Selain itu, ketersediaan nilai konstanta daun untuk kopi arabika dan robusta merupakan suatu *novelty* atau kebaruan penelitian yang membuka peluang luas dalam pemantauan pertumbuhan tanaman di skala penelitian maupun praktik lapangan, yang sebelumnya belum banyak dijelaskan secara eksplisit dalam literatur.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengidentifikasi nilai konstanta daun kopi arabika dan robusta dengan pendekatan metode Montgomery berbasis pengolahan citra digital secara non-destruktif dan efisien. Nilai konstanta daun yang diperoleh adalah sebesar 0,747 untuk kopi arabika dan 0,701 untuk kopi robusta, yang kemudian digunakan untuk memprediksi luas daun berdasarkan panjang dan lebar daun. Validasi model prediksi menunjukkan hasil yang sangat baik, dengan nilai *R*² sebesar 0,9954 untuk arabika dan 0,9953 untuk robusta, *RMSE* masing-masing sebesar 0,795 dan 2,207, *NRMSE* sebesar 0,010 dan 0,013, serta nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE)* sebesar 0,995 dan indeks Willmott (*d*) sebesar 0,999 untuk kedua jenis kopi. Hasil ini menunjukkan pendekatan konstanta daun mampu menghasilkan estimasi luas daun yang sangat akurat dan konsisten dengan hasil pengukuran citra digital. Temuan ini tidak hanya mendukung penggunaan metode matematis sederhana dalam estimasi luas daun,

tetapi juga memberikan kontribusi terhadap efisiensi pemantauan pertumbuhan tanaman kopi dalam bidang pertanian presisi.

DAFTAR PUSTAKA

- Afiatan, A. S., Supriyanto, E. A., Al Ramadhani, F. M., & Firmansyah, D. (2024). Analisis kesesuaian lahan tanaman kopi arabika berbasis sistem informasi geografis di Kecamatan Paninggaran Kabupaten Pekalongan. *Jurnal Penelitian Inovatif*, 4(3), 1759–1770. <https://doi.org/10.54082/jupin.682>
- 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>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Statistik Kopi Indonesia 2023* (Vol. 8). Badan Pusat Statistik.
- da Silva, K. G. F., Maciel, L. M. da S., Villela, S. M., Pedrini, H., Morais, L. E., & Vieira, M. B. (2025a). 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>
- da Silva, T. I., Ribeiro, J. E. da S., Santos, T. S. dos, Correia, M. R. S., Ribeiro, M. C. B. de O., Mendonça, A. J. T., da Silva, A. G. C., Oliveira, P. H. de A., Coêlho, E. dos S., Barros Júnior, A. P., da Silva, E. F., Rubio-Casal, A. E., de Lima, J. L. M. P., da Silva, T. G. F., & Jardim, A. M. da R. F. (2025). Can a non-destructive method predict the leaf area of species in the Caatinga Biome? *Diversity*, 17(4), 1–15. <https://doi.org/10.3390/d17040234>
- de Sá, L. G., Albuquerque, C. J. B., Valadares, N. R., Brito, O. G., Mota, A. N., Fernandes, A. C. G., & de Azevedo, A. M. (2022). Area estimation of soybean leaves of different shapes with artificial neural networks. *Acta Scientiarum - Agronomy*, 44, 1–9. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.54787>
- Elings, A. (2000). Estimation of leaf area in tropical maize. *Agronomy Journal*, 92(3), 436–444. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923436x>
- Fu, W., Chen, Z., Cheng, Q., Li, Y., Zhai, W., Ding, F., Kuang, X., Chen, D., & Duan, F. (2025). Maize leaf area index estimation based on machine learning algorithm and computer vision. *Agriculture*, 15(12), 1–22. <https://doi.org/10.3390/agriculture15121272>
- Gaspar, S., & Ramos, F. (2016). Caffeine: Consumption and Health Effects. In B. Caballero, P. M. Finglas, & F. Toldrá (Eds.), *Encyclopedia of Food and Health* (pp. 573–578). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384947-2.00099-4>
- Júnior, C. A. M. de A., Martins, G. D., Xavier, L. C. M., Vieira, B. S., Gallis, R. B. de A., Fraga Junior, E. F., Martins, R. S., Paes, A. P. B., Mendonça, R. C. P., & Lima, J. V. do N. (2022). Estimating coffee plant yield based on multispectral images and machine learning models. *Agronomy*, 12(12), 1–15. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123195>
- Krishnan, S., Matsumoto, T., Nagai, C., Falconer, J., Shriner, S., Long, J., Medrano, J. F., & Vega, F. E. (2021). Vulnerability of coffee (*Coffea* spp.) genetic resources in the United States. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 68(7), 2691–2710. <https://doi.org/10.1007/s10722-021-01217-1>
- Kruschke, J. K. (2015). Metric Predicted Variable with One Nominal Predictor. In J. Kruschke (Ed.), *Doing Bayesian Data Analysis* (pp. 553–581). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-405888-0.00019-2>

- Montgomery, E. G. (1911). *Correlation studies in corn. Annual report no. 24. Agricultural Experimental Station.*
- Nazeri, B., Crawford, M. M., & Tuinstra, M. R. (2021). Estimating leaf area index in row crops using wheel-based and airborne discrete return light detection and ranging data. *Frontiers in Plant Science*, 12, 1–14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.740322>
- Rico, Darma, R., Salman, D., & Mahyuddin. (2021). Problems identification of Arabica coffee commodities on traditional farming in Indonesia: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 886, 1–16. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/886/1/012069>
- 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>
- Sala, F., Dobrei, A., & Herbei, M. V. (2021). Leaf area calculation models for vines based on foliar descriptors. *Plants*, 10(11), 1–15. <https://doi.org/10.3390/plants10112453>
- 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.
- Taugourdeau, S., le Maire, G., Avelino, J., Jones, J. R., Ramirez, L. G., Quesada, M. J., Charbonnier, F., Gómez-Delgado, F., Harmand, J.-M., Rapidel, B., Vaast, P., & Roupsard, O. (2014). Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 192, 19–37. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.042>
- Zhang, W. (2020). Digital image processing method for estimating leaf length and width tested using kiwifruit leaves (*Actinidia chinensis* Planch). *PLoS ONE*, 15(7), 1–14. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235499>

Halaman Ini Dikosongkan