

Pemodelan Sortasi Buah Cabai Berdasarkan Karakteristik Morfologi Melalui Pendekatan Analisis Citra Digital

Arifah Husna^{1*}, Fatiyah Rahmah², Honesh Setia N³, Latifah Dwi S⁴, Yussy Purwaningsih⁵

¹⁻⁵ Program Studi Agroekoteknologi, Universitas Trunojoyo Madura, Indonesia

*Penulis Korespondensi: arifah.husna@trunojoyo.ac.id

Abstract. *Sorting is an important stage in postharvest handling of chili peppers to obtain products with uniform quality. Manual sorting processes generally require more time and have the potential to produce errors due to observer subjectivity. This study aimed to model chili pepper (*Capsicum* sp.) sorting using a digital image analysis approach with ImageJ software and to compare its measurement effectiveness with conventional manual methods. The study employed an experimental method with a quantitative approach through several stages, including manual measurement, image acquisition, image processing using ImageJ, and data analysis. The observed parameters included fruit size, object area, color intensity, and visual characteristics of chili peppers. The results showed that measurements obtained using ImageJ exhibited a similar trend to manual measurements in identifying the relative size of chili fruits. The object area values generated through image analysis indicated variations in size among samples, while color characteristics reflected differences in fruit maturity levels. The use of ImageJ provided a more objective, faster, and more consistent measurement process compared to manual methods. Digital image analysis has potential for further development as an automated sorting system in chili postharvest handling.*

Keywords: *Capsicum Sp; Digital Image Analysis; Fruit Morphometry; Fruit Sorting; ImageJ.*

Abstrak. Sortasi merupakan tahapan penting dalam penanganan pascapanen cabai untuk memperoleh produk dengan kualitas yang seragam. Proses sortasi secara manual umumnya memerlukan waktu lebih lama dan berpotensi menimbulkan kesalahan akibat subjektivitas pengamat. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan sortasi buah cabai (*Capsicum* sp.) menggunakan pendekatan analisis citra digital dengan software *ImageJ* serta membandingkan efektivitas pengukuran dengan metode manual. Penelitian menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif melalui tahapan pengukuran manual, akuisisi citra, pengolahan citra menggunakan *ImageJ*, dan analisis data. Parameter yang diamati meliputi ukuran buah, luas area objek, intensitas warna, serta karakteristik visual buah cabai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengukuran menggunakan *ImageJ* memiliki kecenderungan yang sesuai dengan hasil pengukuran manual dalam mengidentifikasi ukuran relatif buah cabai. Nilai luas area objek hasil analisis citra menunjukkan variasi ukuran antar sampel, sedangkan karakteristik warna memperlihatkan adanya perbedaan tingkat kematangan buah. Penggunaan *ImageJ* mampu memberikan proses pengukuran yang lebih objektif, cepat, dan konsisten dibandingkan metode manual. Analisis citra digital berpotensi dikembangkan sebagai sistem sortasi otomatis pada penanganan pascapanen cabai.

Kata kunci: Analisis Citra Digital; *Capsicum Sp*; *ImageJ*; Morfometri Buah; Pemilahan Buah.

1. LATAR BELAKANG

Cabai (*Capsicum* sp.) merupakan salah satu komoditas hortikultura yang memiliki nilai ekonomi tinggi serta menjadi kebutuhan penting bagi masyarakat dan industri pangan. Kualitas cabai yang dipasarkan sangat dipengaruhi oleh keseragaman karakteristik fisik buah, seperti ukuran, bentuk, dan tingkat kematangan. Keseragaman mutu tersebut menjadi faktor penting dalam menentukan nilai jual produk, efisiensi distribusi, dan penerimaan konsumen. Oleh karena itu, proses sortasi menjadi tahapan penting dalam penanganan pascapanen cabai.

Sortasi buah cabai umumnya dilakukan berdasarkan karakteristik fisik seperti panjang, diameter, dan ukuran buah secara keseluruhan. Namun, pada praktiknya proses pengukuran

dan sortasi masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat ukur seperti penggaris atau jangka sorong. Metode pengukuran manual memiliki beberapa keterbatasan, antara lain membutuhkan waktu yang relatif lebih lama, memerlukan tenaga kerja yang lebih banyak, serta berpotensi menimbulkan kesalahan pengukuran akibat faktor manusia (*human error*). Selain itu, tingkat subjektivitas operator dalam menentukan kategori ukuran juga dapat menyebabkan hasil pengelompokan menjadi kurang konsisten.

Menurut Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018) Perkembangan teknologi pengolahan citra digital memberikan peluang untuk mengatasi keterbatasan tersebut melalui proses identifikasi dan pengukuran objek secara otomatis. Salah satu perangkat lunak yang banyak digunakan dalam analisis citra adalah ImageJ. Menurut Buzna, C., & Sala, F. (2022) Software ini mampu mengolah citra digital dan mengekstraksi berbagai parameter morfologi objek, seperti panjang, lebar, luas area, serta parameter geometri lainnya. Penggunaan ImageJ memungkinkan pengukuran karakteristik fisik buah dilakukan tanpa kontak langsung dengan objek sehingga proses pengukuran dapat berlangsung lebih cepat dan lebih objektif.

Meskipun metode analisis citra digital telah banyak dikembangkan pada berbagai komoditas pertanian, pengujian efektivitas penggunaan ImageJ sebagai alternatif pengukuran pada proses sortasi buah cabai masih perlu dikaji lebih lanjut. Perlu dilakukan evaluasi mengenai tingkat ketepatan hasil pengukuran, efisiensi waktu kerja, serta tingkat kesesuaian antara hasil pengukuran manual dengan hasil pengukuran berbasis citra digital (Gong *et al.*, 2021) Analisis tersebut penting untuk mengetahui sejauh mana penggunaan ImageJ dapat menggantikan atau meningkatkan proses pengukuran konvensional dalam kegiatan sortasi.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk memodelkan sortasi buah cabai menggunakan pendekatan analisis citra digital dengan memanfaatkan software ImageJ serta membandingkan efektivitas pengukuran secara manual dengan pengukuran berbasis citra digital. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai tingkat akurasi dan efisiensi penggunaan ImageJ sehingga dapat menjadi dasar pengembangan sistem sortasi cabai yang lebih cepat, objektif, dan mendukung penerapan teknologi pascapanen modern.

2. KAJIAN TEORITIS

Sortasi merupakan salah satu tahapan penting dalam penanganan pascapanen hasil hortikultura yang bertujuan untuk mengelompokkan produk berdasarkan karakteristik tertentu seperti ukuran, bentuk, warna, dan mutu fisik lainnya. Pada komoditas cabai, keseragaman ukuran menjadi aspek penting karena berkaitan dengan kualitas produk, harga jual, efisiensi

pengemasan, serta kebutuhan pasar. Proses sortasi yang baik dapat meningkatkan nilai tambah produk dan mempermudah proses distribusi. Secara umum, pengukuran karakteristik ukuran buah seperti panjang dan diameter masih banyak dilakukan secara manual menggunakan alat ukur konvensional. Namun, metode tersebut memiliki beberapa kelemahan, di antaranya memerlukan waktu relatif lama, ketelitian yang dipengaruhi kemampuan operator, serta potensi munculnya kesalahan pengukuran akibat faktor subjektivitas manusia (Konara *et al.*, 2024).

Perkembangan teknologi pengolahan citra digital telah memberikan alternatif metode pengukuran yang lebih cepat dan objektif pada berbagai bidang pertanian. Analisis citra digital bekerja dengan memperoleh informasi dari suatu objek melalui proses akuisisi gambar, pengolahan citra, segmentasi objek, dan ekstraksi parameter tertentu. Salah satu perangkat lunak yang sering digunakan dalam analisis citra adalah ImageJ, yang mampu melakukan pengukuran dimensi objek seperti panjang, lebar, luas area, dan parameter morfologi lainnya. Keunggulan penggunaan perangkat lunak tersebut terletak pada kemampuannya melakukan pengukuran tanpa kontak langsung terhadap objek sehingga dapat mengurangi pengaruh subjektivitas pengamat dan meningkatkan konsistensi hasil pengukuran (Lingga *et al.*, 2025).

Penerapan analisis citra digital pada proses sortasi komoditas hortikultura menunjukkan adanya potensi peningkatan efisiensi proses pengukuran dan pengelompokan produk. Kemampuan perangkat lunak dalam mengidentifikasi karakteristik fisik objek secara terukur memungkinkan diperolehnya data yang lebih seragam dan proses kerja yang lebih efektif dibandingkan metode konvensional (Martin *et al.*, 2021). Dengan karakteristik fisik buah cabai yang dapat divisualisasikan dan diukur melalui citra digital, pendekatan berbasis perangkat lunak diperkirakan dapat menghasilkan kesesuaian pengukuran yang baik serta mendukung proses sortasi yang lebih cepat dan konsisten.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis efektivitas pengukuran ukuran buah cabai secara manual dan berbasis analisis citra digital menggunakan software ImageJ. Penelitian dilakukan melalui tahapan pengambilan sampel, pengukuran manual, akuisisi citra, pengolahan citra menggunakan perangkat lunak ImageJ, dan analisis hasil pengukuran.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi kamera digital atau kamera smartphone dengan resolusi memadai, komputer/laptop, software ImageJ, penggaris, jangka sorong (caliper), tripod, alas berwarna kontras (putih atau hitam), serta perangkat pencahayaan

tambahan apabila diperlukan. Bahan yang digunakan berupa sampel buah cabai (*Capsicum* sp.) dengan variasi ukuran yang mewakili ukuran kecil, sedang, dan besar.

Pengambilan Sampel

Sampel buah cabai diambil secara acak dari hasil panen yang memiliki variasi ukuran. Jumlah sampel yang digunakan sebanyak ± 50 –100 buah agar mewakili keragaman populasi. Sampel dibersihkan dari kotoran yang menempel sebelum dilakukan pengukuran.

Pengukuran Secara Manual

Setiap buah cabai diukur menggunakan metode konvensional sebagai data pembanding. Parameter yang diamati meliputi: (a) Panjang buah (cm). (b) Diameter buah (cm). (c) Waktu pengukuran per sampel (detik).

Panjang buah diukur dari pangkal hingga ujung buah menggunakan penggaris atau jangka sorong, sedangkan diameter diukur pada bagian tengah buah. Pengukuran dilakukan sebanyak tiga kali pada setiap sampel, kemudian dihitung nilai rata-ratanya.

Akuisisi Citra Digital

Buah cabai diletakkan pada alas dengan warna kontras untuk mempermudah proses segmentasi objek. Pengambilan gambar dilakukan dengan jarak kamera yang tetap, posisi kamera tegak lurus terhadap objek, dan kondisi pencahayaan yang seragam. Pada setiap pengambilan gambar ditambahkan objek referensi dengan ukuran diketahui, misalnya penggaris atau skala kalibrasi, untuk mengubah satuan piksel menjadi satuan panjang sebenarnya.

Analisis Citra Menggunakan ImageJ

Tahapan pengolahan citra menggunakan software ImageJ meliputi: (a) Memasukkan citra ke dalam software ImageJ. (b) Melakukan kalibrasi skala menggunakan objek referensi. (c) Mengubah citra menjadi format yang sesuai untuk proses analisis. (d) Melakukan segmentasi objek untuk memisahkan buah cabai dari latar belakang. (e) Mengukur parameter panjang, diameter, dan luas objek. (f) Menyimpan hasil pengukuran untuk dianalisis lebih lanjut.

Data hasil pengukuran citra digunakan untuk membentuk model sortasi berdasarkan kategori ukuran buah.

Data hasil pengukuran manual dan pengukuran menggunakan software ImageJ dianalisis secara deskriptif dan kuantitatif. Analisis yang dilakukan meliputi:

- a. Perhitungan nilai rata-rata dan standar deviasi hasil pengukuran panjang dan diameter buah cabai.

- b. Perhitungan persentase selisih atau tingkat kesalahan pengukuran (*error percentage*) antara hasil pengukuran manual dan hasil pengukuran menggunakan ImageJ menggunakan rumus:

$$\text{Persentase kesalahan (\%)} = \left[\frac{|M-I|}{M} \times 100 \right] \dots\dots\dots (i)$$

Keterangan:

M = hasil pengukuran manual

I = hasil pengukuran menggunakan ImageJ

- c. Uji korelasi untuk mengetahui tingkat hubungan antara hasil pengukuran manual dan hasil pengukuran menggunakan ImageJ.
- d. Analisis efektivitas dilakukan berdasarkan tingkat kesesuaian hasil pengukuran dan waktu yang dibutuhkan pada masing-masing metode.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa buah cabai yang dianalisis memiliki variasi ukuran dan karakteristik warna. Berdasarkan estimasi pengukuran manual menggunakan skala penggaris pada citra, panjang buah cabai berkisar antara 2,5–3,4 cm. Cabai dengan ukuran terbesar ditemukan pada sampel 4 dengan panjang sekitar 3,4 cm, sedangkan ukuran terkecil terdapat pada sampel 3 dengan panjang sekitar 2,5 cm. Variasi ukuran tersebut menunjukkan adanya keragaman karakteristik morfologi yang dapat digunakan sebagai dasar dalam proses sortasi.

Tabel 1. Perbandingan hasil pengukuran manual dan analisis citra digital menggunakan *ImageJ* pada buah cabai (*Capsicum* sp.).

Sampel	Warna dominan cabai	Panjang manual (cm)*	Kategori visual	Luas ImageJ	Mean ImageJ
1	Kuning pucat	3,1	Sedang	2,211	85,790
2	Merah	2,8	Kecil	1,832	84,962
3	Oranye kemerahan	2,5	Kecil	1,418	129,086
4	Kuning-oranye	3,4	Sedang	±1,415	-
5	Kuning-merah (transisi)	3,2	Sedang	1,797	89,278

Keterangan: Pengukuran dengan alat bantu penggaris dan *software Image-J*

Hasil analisis menggunakan *software ImageJ* menunjukkan nilai luas area objek berkisar antara 1,418–2,211. Nilai area terbesar diperoleh pada sampel 1 sebesar 2,211, sedangkan nilai terkecil diperoleh pada sampel 3 sebesar 1,418. Secara umum terlihat kecenderungan bahwa sampel dengan ukuran visual lebih besar menghasilkan nilai area yang lebih tinggi. Namun

demikian, hubungan tersebut tidak selalu linear karena ImageJ mengukur keseluruhan luas proyeksi objek dua dimensi, bukan hanya panjang objek. Bentuk buah yang melengkung, diameter buah, dan posisi objek saat pemotretan dapat memengaruhi nilai area yang dihasilkan.



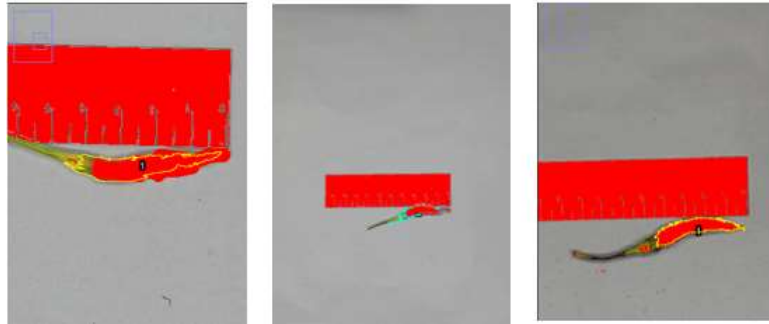
Gambar 1. Sampel Buah Cabai (*Capsicum* sp.) Dengan Variasi Ukuran dan Tingkat Kematangan.

Perbandingan antara pengukuran manual dan pengukuran berbasis ImageJ menunjukkan bahwa kedua metode memiliki kecenderungan hasil yang relatif serupa dalam mengidentifikasi ukuran relatif buah cabai. Pengukuran manual memberikan informasi dimensi secara langsung melalui parameter panjang, sedangkan ImageJ memberikan parameter yang lebih kompleks berupa luas objek dan karakteristik intensitas citra (Misra *et al.*, 2022). Penggunaan ImageJ memiliki kelebihan berupa proses pengukuran yang lebih objektif dan mampu mengurangi subjektivitas pengamat dibandingkan metode manual.

Selain ukuran, warna buah cabai juga menunjukkan variasi yang cukup jelas. Menurut Öner, F., & Odabaş, M. S. (2023) sampel yang diamati terdiri atas cabai berwarna kuning pucat, merah, oranye, serta kombinasi kuning-merah. Variasi warna tersebut menggambarkan perbedaan tingkat kematangan buah (Patton *et al.*, 2022). Cabai berwarna kuning pucat cenderung merepresentasikan fase perkembangan awal, sedangkan warna merah menunjukkan tingkat kematangan yang lebih tinggi akibat akumulasi pigmen karotenoid dan kapsantin. Pada cabai dengan warna transisi seperti kuning-merah atau oranye, perubahan warna menunjukkan proses pematangan yang masih berlangsung (Rueden *et al.*, 2017).

Nilai intensitas (*Mean*) pada ImageJ juga menunjukkan variasi antar sampel. Sampel 3 memiliki nilai intensitas tertinggi sebesar 129,086, sedangkan sampel lain berkisar antara 84–89. Nilai intensitas tersebut dipengaruhi oleh warna objek, tingkat kecerahan permukaan buah, serta pencahayaan selama proses pengambilan citra. Warna buah yang lebih terang cenderung menghasilkan nilai intensitas lebih tinggi dibandingkan warna yang lebih gelap. Hal ini menunjukkan bahwa analisis citra digital tidak hanya dapat digunakan untuk karakterisasi ukuran, tetapi juga berpotensi digunakan dalam identifikasi tingkat kematangan buah berdasarkan karakteristik warna.

Menurut Sudianto, A. I., & Husna, A. (2025) secara keseluruhan, penggunaan software ImageJ menunjukkan potensi yang baik dalam mendukung proses sortasi buah cabai karena mampu memberikan pengukuran yang cepat, konsisten, dan objektif. Kombinasi parameter ukuran dan warna memungkinkan pengembangan model sortasi yang lebih komprehensif dibandingkan pengukuran manual konvensional.



Gambar. 2. Hasil Segmentasi Buah Cabai (*Capsicum* sp.) Menggunakan Software *Imagej*.

Berdasarkan foto hasil akuisisi citra, objek buah cabai ditempatkan pada latar belakang berwarna abu-abu dengan tambahan penggaris sebagai skala referensi. Penggunaan latar belakang yang relatif homogen membantu proses segmentasi objek pada software ImageJ karena dapat meningkatkan kontras antara objek dan latar belakang. Akan tetapi, dari hasil proses *thresholding* terlihat masih terdapat beberapa area non-objek yang ikut terdeteksi, seperti bagian penggaris dan sejumlah titik kecil di sekitar objek. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengaturan parameter *threshold* sangat memengaruhi keberhasilan pemisahan objek dengan latar belakang.

Pada proses analisis citra menggunakan metode *Threshold Color* pada ruang warna HSB (*Hue, Saturation, Brightness*), cabai berhasil diidentifikasi berdasarkan perbedaan karakteristik warna terhadap lingkungan di sekitarnya. Namun, beberapa sampel menunjukkan bentuk seleksi yang belum mengikuti kontur buah secara sempurna. Hal tersebut terutama terlihat pada bagian tangkai dan area tepi buah yang memiliki warna mendekati latar belakang atau memiliki intensitas pencahayaan yang berbeda. Akibatnya, sebagian area objek dapat tidak terhitung atau justru terdapat bagian luar objek yang ikut terdeteksi sehingga memengaruhi nilai luas area yang diperoleh.

Menurut Umam, K., Hidayat, T., & Sudianto, A. I. (2023) Perbedaan posisi dan orientasi buah cabai pada saat pengambilan gambar juga terlihat memengaruhi hasil pengukuran citra. Pada beberapa sampel buah diletakkan secara horizontal, sedangkan sampel lain berada pada posisi vertikal atau sedikit melengkung (Vale *et al.* 2020). Variasi posisi tersebut dapat memengaruhi luas proyeksi objek yang terbaca oleh ImageJ karena perangkat lunak

menganalisis objek berdasarkan tampilan dua dimensi. Buah yang memiliki tingkat kelengkungan lebih tinggi dapat menghasilkan nilai area yang berbeda meskipun memiliki panjang yang relatif sama (Ibrahim I, 2026). Oleh karena itu, keseragaman posisi objek selama akuisisi citra menjadi faktor penting untuk meningkatkan konsistensi hasil pengukuran.

Berdasarkan karakteristik warna buah pada foto, sampel menunjukkan tingkat kematangan yang berbeda, ditandai dengan adanya warna kuning pucat, kuning-oranye, oranye, hingga merah (Ranganna 2019). Perubahan warna tersebut berkaitan dengan proses degradasi klorofil dan peningkatan akumulasi pigmen karotenoid selama pematangan buah (Relf D 2020). Perbedaan warna tersebut tidak hanya memengaruhi karakteristik visual, tetapi juga berpengaruh terhadap hasil identifikasi citra digital. Cabai dengan warna yang lebih kontras terhadap latar belakang cenderung lebih mudah disegmentasi dibandingkan cabai dengan warna yang mendekati warna lingkungan sekitar (Taiz *et al* 2021). Hal ini terlihat dari variasi nilai intensitas (*Mean*) yang diperoleh pada hasil analisis ImageJ.

Secara keseluruhan, hasil pengamatan menunjukkan bahwa keberhasilan analisis citra digital tidak hanya dipengaruhi oleh ukuran objek, tetapi juga dipengaruhi oleh kualitas citra yang dihasilkan (Sonka *et al* 2021). Faktor seperti pencahayaan, warna objek, posisi peletakan sampel, dan ketepatan pengaturan *threshold* memiliki peran penting terhadap akurasi hasil pengukuran (Wang *et al* 2020). Oleh karena itu, standarisasi proses pengambilan gambar perlu diperhatikan agar model sortasi yang dikembangkan dapat menghasilkan pengukuran yang lebih akurat dan konsisten.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, penggunaan pendekatan analisis citra digital menggunakan software ImageJ dapat dimanfaatkan dalam proses sortasi buah cabai (*Capsicum* sp.) berdasarkan karakteristik ukuran dan warna buah. Hasil pengukuran menunjukkan adanya variasi ukuran antar sampel yang ditunjukkan melalui perbedaan nilai luas area objek hasil analisis citra. Pengukuran menggunakan ImageJ memiliki kecenderungan yang sejalan dengan hasil pengukuran manual dalam mengidentifikasi ukuran relatif buah cabai, sehingga metode ini dapat digunakan sebagai alternatif pengukuran konvensional. Selain itu, analisis citra digital juga mampu mengidentifikasi variasi warna buah yang berkaitan dengan tingkat kematangan, sehingga informasi yang diperoleh tidak hanya terbatas pada ukuran fisik tetapi juga karakteristik visual objek. Meskipun demikian, hasil pengukuran dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti

pencahayaannya, posisi objek, kualitas citra, dan ketepatan proses *thresholding*. Secara umum, pemanfaatan ImageJ menunjukkan potensi yang baik dalam mendukung sistem sortasi buah cabai yang lebih cepat, objektif, dan konsisten dibandingkan metode manual.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, diperlukan standarisasi proses pengambilan citra agar hasil pengukuran memiliki tingkat akurasi yang lebih tinggi. Beberapa aspek yang perlu diperhatikan meliputi penggunaan latar belakang dengan warna yang kontras, pengaturan pencahayaan yang seragam, posisi peletakan objek yang konsisten, serta penggunaan skala kalibrasi yang sama pada setiap sampel. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk menambah jumlah sampel agar variasi data yang diperoleh lebih representatif serta melakukan pengukuran parameter lain seperti diameter, luas permukaan, tingkat kematangan, dan karakteristik warna secara lebih rinci. Selain itu, pengembangan metode analisis dapat diarahkan pada sistem klasifikasi atau sortasi otomatis berbasis pengolahan citra digital dan kecerdasan buatan sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses pascapanen secara lebih luas.

DAFTAR REFERENSI

- Buzna, C., & Sala, F. (2022). Non-destructive method to determining the leaf area in hemp (*Cannabis sativa* L.). *Life Science and Sustainable Development*, 3(2), 25–32. <https://doi.org/10.58509/lssd.v3i2.203>
- Cannayen, I., Igathinathane, C., Flores, J., & Sidhu, H. (2025). Crop row identification and plant cluster segmentation for stand count from UAS imagery based on profile and geometry. *Smart Agricultural Technology*, 11, Article 100938. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.100938>
- Gong, Y., Duan, B., Fang, S., Zhu, R., Wu, X., Ma, Y., & Zhu, B. (2021). Remote estimation of leaf area index with unmanned aerial vehicle imaging for different rice cultivars throughout the growing season. *Plant Methods*, 17(1), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s13007-021-00789-4>
- Ibrahim, I. (2026). Pengukuran luas daun berbasis citra digital menggunakan ImageJ dengan validasi metode kertas milimeter. *Informasi: Jurnal Informatika dan Sistem Informasi*, 18(1), 86–105. <https://doi.org/10.37424/informasi.v18i1.558>
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, 147, 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Konara, B., Krishnapillai, M., & Galagedara, L. (2024). Recent trends and advances in utilizing digital image processing for crop nitrogen management. *Remote Sensing*, 16(23), Article 4514. <https://doi.org/10.3390/rs16234514>
- Lingga, E. W., Putra, G. M. D., & Widhiantari, I. A. (2025). Measurement accuracy of pakcoy (*Brassica rapa* L.) leaf area using digital image processing in a vertical hydroponic

- system with root zone cooling. *J-AGENT (Journal of Agricultural Engineering and Technology)*, 3(4), 350–368.
- Martin, T. N., Fipke, G. M., Winck, J. E. M., & Marchese, J. A. (2021). ImageJ software as an alternative method for estimating leaf area in oats. *Acta Agronómica*, 69(3), 206–212. <https://doi.org/10.15446/acag.v69n3.69401>
- Misra, T., Sharma, A., Kumar, S., & Singh, R. (2022). Leaf area assessment using image processing and support vector regression in rice. *Indian Journal of Agricultural Sciences*, 91(3), 387–392. <https://doi.org/10.56093/ijas.v91i3.112496>
- Öner, F., & Odabaş, M. S. (2023). Non-destructive leaf area measurement using mathematical modeling for paddy varieties. *Black Sea Journal of Agriculture*, 6(4), 339–342. <https://doi.org/10.47115/bsagriculture.1280946>
- Patton, A. J., Hardebeck, G. A., & Fry, J. D. (2022). Counting dandelion blooms in field plots using an image processing program. *International Turfgrass Society Research Journal*, 14(1), 92–98. <https://doi.org/10.1002/its2.32>
- Ranganna, S. (2019). *Handbook of analysis and quality control for fruit and vegetable products* (2nd ed.). Tata McGraw-Hill.
- Relf, D. (2020). *Postharvest handling and quality management of horticultural crops*. Springer.
- Rueden, C. T., Schindelin, J., Hiner, M. C., DeZonia, B. E., Walter, A. E., Arena, E. T., & Eliceiri, K. W. (2017). ImageJ2: ImageJ for the next generation of scientific image data. *BMC Bioinformatics*, 18, Article 529. <https://doi.org/10.1186/s12859-017-1934-z>
- Sonka, M., Hlavac, V., & Boyle, R. (2020). *Image processing, analysis, and machine vision* (5th ed.). Cengage Learning.
- 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>
- Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2021). *Plant physiology and development* (7th ed.). Sinauer Associates.
- Umam, K., Hidayat, T., & Sudianto, A. I. (2023). Perhitungan luas daun berbasis pemrosesan citra digital. *Teknotan: Jurnal Industri Teknologi Pertanian*, 17(2), 121–130. <https://doi.org/10.24198/jt.vol17n2.5>
- Vale, A. M. P. G., Uccesu, M., Di Ruberto, C., Loddo, A., Soares, J. M., & Bacchetta, G. (2020). A new automatic approach to seed image analysis: From acquisition to segmentation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 177, Article 105117.
- Wang, N., Zhang, N., & Wang, M. (2020). Wireless sensors in agriculture and food industry: Recent development and future perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*, 50(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.09.003>